



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA PARA  
ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA FATIGA MECÁNICA  
POR FLEXIÓN EN PROBETAS DE POLÍMEROS  
IMPRESOS EN 3D”**

**Trabajo de titulación**

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO MECÁNICO**

**AUTOR: LUIS ASDRUBAL CASTAGNETO FLORENCIA**

**DIRECTOR: ING. JORGE ISAÍAS CAICEDO REYES**

Riobamba- Ecuador

2020

**©2020, Luis Asdrúbal Castagneto Florencia**

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 el Derecho de Autor.

Yo, Luis Asdrúbal Castagneto Florencia, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal académica de los contenidos de este trabajo de titulación, el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Politécnica del Chimborazo.

Riobamba, 21 de septiembre de 2020



**Luis Asdrúbal Castagneto Florencia**  
**092210420-3**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: Proyecto técnico denominado, **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA PARA ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA FATIGA MECÁNICA POR FLEXIÓN EN PROBETAS DE POLÍMEROS IMPRESOS EN 3D**, realizado por el señor: **LUIS ASDRÚBAL CASTAGNETO FLORENCIA** ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Msc. Edwin Fernando Viteri Núñez <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>	_____	21-09-2020
Ing. Jorge Isaiás Caicedo Reyes <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACION</b>	 Firmado electrónicamente por: <b>JORGE ISAIAS CAICEDO REYES</b>	21-09-2020
Ing. Miguel Ángel Escobar Guachambala <b>MIEMBRO DE TRIBUNAL</b>	MIGUEL ANGEL ESCOBAR GUACHAMBAL A  Firmado digitalmente por MIGUEL ANGEL ESCOBAR GUACHAMBAL Fecha: 2020.10.16 13:22:16 -05'00'	21-09-2020

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo investigativo lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darme la fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados. A mi querida esposa y a mis pequeños hijos por su amor, dedicación y sacrificio en todos estos años, quienes me han encaminado y me han brindado un sincero y cálido cariño, sin esperar nada a cambio, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. No pueden faltar mis estimados docentes que de una u otra manera han aportado para poder alcanzar este objetivo y en especial a aquellos que me abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos que contribuyen permanentemente a mi crecimiento personal y profesional.

Luis

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por bendecirme la vida, por guiarme a lo largo de mi vida, a mi familia por ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

Agradezco profundamente la ESPOCH, en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica, a su personal docente y administrativo que conjuntamente tuvieron el afán de ayudarme a cumplir con el sueño de engrandecer mi vida profesional, ya que con su arduo trabajo han compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de esta anhelada carrera.

Agradezco al Ing. Isaías Caicedo por haber sido tan excelente ser humano y amigo, de igual manera al Ing. Miguel Escobar y al Ing. Edwin Viteri, por haberme apoyado y ayudado en la culminación de esta carrera profesional.

¡Muchas Gracias!

Luis

## TABLA DE CONTENIDO

INDICE DE TABLAS.....	xiii
INDICE DE FIGURAS.....	xiv
INDICE DE ANEXOS .....	xvii
RESUMEN.....	xviii
ABSTRACT .....	xix
INTRODUCCIÓN .....	1

### CAPÍTULO I

1.	DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA .....	2
1.1.	Antecedentes .....	2
1.2.	Planteamiento del problema. ....	3
1.3.	Justificación.....	6
1.3.1.	<i>Justificación teórica.....</i>	6
1.3.2.	<i>Justificación metodológica.....</i>	7
1.3.3.	<i>Justificación práctica.....</i>	7
1.4.	Alcance.....	7
1.5.	Objetivos.....	7
1.5.1.	<i>Objetivo General.....</i>	7
1.5.2.	<i>Objetivos Específicos.....</i>	7

### CAPÍTULO II

2.	REVISIÓN DE LA LITERATURA O FUNDAMENTOS TEÓRICOS. ....	9
2.1.	Introducción a los polímeros. ....	9
2.2.	Fenómeno de la fatiga.....	10
2.3.	Fases de fallo por fatiga.....	11
2.3.1.	<i>Inicio y propagación de la grieta.....</i>	11

2.3.1.1.	<i>Inicio</i> .....	11
2.3.1.2.	<i>Propagación</i> .....	12
2.3.1.3.	<i>Rotura</i> .....	12
<b>2.4.</b>	<b>Teorías del fenómeno de fatiga mecánica.</b> .....	<b>13</b>
<b>2.4.1.</b>	<b><i>Fenómeno de fatiga con alto número de ciclos</i></b> .....	<b>13</b>
<b>2.4.2.</b>	<b><i>Fenómeno de fatiga con bajo número de ciclos.</i></b> .....	<b>13</b>
<b>2.4.3.</b>	<b><i>Mecánica lineal de la fractura por fatiga.</i></b> .....	<b>13</b>
<b>2.5.</b>	<b>Ensayos en laboratorios de fatiga por flexión rotativa</b> .....	<b>14</b>
<b>2.5.1.</b>	<b><i>Fenómeno de flexión rotativa en voladizo.</i></b> .....	<b>14</b>
<b>2.5.2.</b>	<b><i>Fenómeno de flexión rotativa sobre dos apoyos.</i></b> .....	<b>14</b>
<b>2.5.3.</b>	<b><i>Fenómeno de flexión rotativa sobre dos apoyos cargados.</i></b> .....	<b>14</b>
<b>2.6.</b>	<b>Comportamiento de los polímeros.</b> .....	<b>15</b>
<b>2.7.</b>	<b>Fatiga por fallo mecánico.</b> .....	<b>16</b>
<b>2.8.</b>	<b>Mecanismos de fallo por fatiga de los materiales poliméricos.</b> .....	<b>16</b>
<b>2.8.1.</b>	<b><i>Comportamiento macroscópico</i></b> .....	<b>16</b>
<b>2.8.2.</b>	<b><i>Comportamiento Microscópico.</i></b> .....	<b>18</b>
<b>2.9.</b>	<b>Alternativas para las diversas máquinas de ensayos de fatiga mecánica.</b> .....	<b>18</b>
<b>2.9.1.</b>	<b><i>Ensayo de fatiga con máquina prototipo viga en voladizo.</i></b> .....	<b>18</b>
<b>2.9.2.</b>	<b><i>Ensayo de fatiga con máquina tipo R.R. Moore</i></b> .....	<b>19</b>
<b>2.9.3.</b>	<b><i>Ensayo de fatiga con máquina automatizada tipo FATIMAT.</i></b> .....	<b>20</b>
<b>2.9.4.</b>	<b><i>Análisis de la casa de la calidad.</i></b> .....	<b>20</b>
<b>2.9.5.</b>	<b><i>Casa de la calidad</i></b> .....	<b>22</b>
<b>2.10.</b>	<b>Sistema Eléctrico.</b> .....	<b>23</b>
<b>2.10.1.</b>	<b><i>Sensores comunes actuantes en máquinas de fatiga mecánica.</i></b> .....	<b>23</b>
2.10.1.1.	<i>Sensores inductivos de reluctancia variable (Sensor VR)</i> .....	23
2.10.1.2.	<i>Opto interruptores – optoacopladores.</i> .....	23
2.10.1.3.	<i>Interruptores finales de carrera o de posición.</i> .....	24
2.10.1.4.	<i>Instrumentos para la recopilación de datos.</i> .....	25
2.10.1.5.	<i>Detectores, transductores y sensores.</i> .....	26



2.10.1.6.	<i>Circuitos de acondicionamiento de señales.</i>	26
2.10.1.7.	<i>Convertidores de señal</i>	26
<b>2.10.2.</b>	<b><i>Sensores tradicionales en máquina para ensayos de fatiga.</i></b>	<b>27</b>
2.10.2.1.	<i>Sensor encoder</i>	27
2.10.2.2.	<i>Acondicionamientos electrónicos mediante PLC.</i>	27
2.10.2.3.	<i>Relé.</i>	27
2.10.2.4.	<i>Contactador</i>	28
<b>2.11.</b>	<b>Sistemas de impresión 3D.</b>	<b>28</b>
2.11.1.	<i>Impresoras 3D por Estereolitografía (SLA).</i>	30
2.11.2.	<i>Impresoras 3D de Sinterización Selectiva por Láser.</i>	30
2.11.3.	<i>Impresoras 3D por Inyección.</i>	31
2.11.4.	<i>Tecnología FDM.</i>	31
<b>2.12.</b>	<b>Proceso de impresión.</b>	<b>33</b>
2.12.1.	<i>Componentes de la impresora 3D con tecnología FDM</i>	35
2.12.2.	<i>Parámetros involucrados en el proceso de impresión</i>	37
2.12.3.	<i>Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).</i>	40
2.12.4.	<i>Ácido Poliláctico PLA.</i>	42
<b>2.13.</b>	<b>Ensayo de resistencia a la fatiga en Polímeros en laboratorios.</b>	<b>43</b>
<b>2.14.</b>	<b>Cálculo de vida de Fatiga</b>	<b>44</b>
<b>2.15.</b>	<b>Normas para ensayos a fatiga y para probetas de polímeros.</b>	<b>45</b>
2.15.1.	<i>Clases de probetas para polímeros según norma ASTM.</i>	45
2.15.2.	<i>Resistencia a la fluencia.</i>	45
2.15.2.1.	<i>Fluencia continua.</i>	46
2.15.2.2.	<i>Resistencia a la fluencia por desplazamiento especificado (offset)</i>	46
2.15.2.3.	<i>Resistencia a la fluencia por extensión bajo carga especificada (EUL).</i>	47
2.15.2.4.	<i>Fluencia discontinua</i>	47
<b>2.16.</b>	<b>Estudio de la curva de fatiga en plásticos.</b>	<b>48</b>

### CAPÍTULO III

<b>3.</b>	<b>MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>51</b>
<b>3.1.</b>	<b>Análisis de máquinas existentes en el mercado.....</b>	<b>51</b>
<b>3.1.1.</b>	<i>Descripción general de la máquina para ensayo de fatiga. ....</i>	<b>52</b>
<b>3.1.2.</b>	<i>Selección de la máquina.....</i>	<b>53</b>
<b>3.1.3.</b>	<i>Funcionamiento de la máquina modelo de R.R. Moore. ....</i>	<b>53</b>
3.1.3.1.	<i>Cargas que intervienen en la máquina de Moore. ....</i>	54
<b>3.1.4.</b>	<b>Preparación de las probetas para ensayos de fatiga mecánica.....</b>	<b>56</b>
3.1.4.1.	<i>Diseño de la probeta.....</i>	56
3.1.4.2.	<i>Transformación a STL.....</i>	57
3.1.4.3.	<i>Rebanado del sólido.....</i>	58
<b>3.1.5.</b>	<b>Impresión de probetas.....</b>	<b>59</b>
<b>3.1.6.</b>	<b>Análisis de la deformación de la probeta.....</b>	<b>59</b>
<b>3.1.7.</b>	<b>Diseño de la estructura de la máquina. ....</b>	<b>61</b>
3.1.7.1.	<i>Diseño de columnas por estabilidad.....</i>	62
3.1.7.2.	<i>Diseño de vigas por resistencia a flexión.....</i>	62
3.1.7.3.	<i>Dimensiones de la estructura metálica. ....</i>	63
<b>3.1.8.</b>	<b>Determinación de la potencia requerida para el motor.....</b>	<b>70</b>
<b>3.1.9.</b>	<b>Diseño del eje o flecha conductor y conducido.....</b>	<b>71</b>
3.1.9.1.	<i>Diseño de ejes o flechas sometidos a cargas estáticas.....</i>	73
3.1.9.2.	<i>Diseño de ejes o flechas sometidos a cargas dinámicas. ....</i>	75
3.1.9.2.1.	<i>Cálculo de factor de superficie [Ka].....</i>	76
3.1.9.2.2.	<i>Cálculo del factor de tamaño [Kb].....</i>	76
3.1.9.2.3.	<i>Cálculo del factor de carga [Kc].....</i>	77
3.1.9.2.4.	<i>Cálculo del factor de temperatura [Kd].....</i>	77
3.1.9.2.5.	<i>Cálculo del factor de confiabilidad [Ke].....</i>	77
3.1.9.2.6.	<i>Cálculo del factor de efectos varios [Kf].....</i>	77
3.1.9.2.7.	<i>Cálculo del límite de resistencia a la fatiga.....</i>	78
<b>3.1.10.</b>	<b>Análisis y Selección de soportes de piso y rodamientos. ....</b>	<b>80</b>

3.1.11.	<i>Análisis y selección del acople semiflexible</i> .....	82
3.1.12.	<i>Análisis y selección del sistema de sujeción de la probeta de ensayo.</i> .....	84
3.1.13.	<i>Selección de rodamiento de aplicación de carga.</i> .....	85
3.2.	<b>Diagnóstico de vibraciones.</b> .....	85
3.3.	<b>Esquema eléctrico a instalarse.</b> .....	87

## CAPÍTULO IV

4.	<b>RESULTADOS.</b> .....	89
4.1.	<b>Procesos de maquinado para la construcción de los elementos de máquina...</b>	89
4.1.1.	<i>Maquinado en los mandriles.</i> .....	89
4.1.2.	<i>Maquinado en los ejes.</i> .....	89
4.1.3.	<i>Manufactura de la estructura metálica.</i> .....	91
4.1.5.	<i>Maquinado del porta pesas</i> .....	93
4.1.6.	<i>Maquinado del acople semiflexible</i> .....	93
4.1.7.	<i>Manufactura de la probeta impresa en 3D</i> .....	94
4.2.	<b>Instalación y montaje de los elementos constitutivos de la máquina.</b> .....	96
4.2.1.	<i>Montaje de la estructura metálica.</i> .....	96
4.2.2.	<i>Montaje de las placas y chumaceras</i> .....	96
4.2.3.	<i>Montaje del acople semiflexible al eje del motor</i> .....	97
4.2.4.	<i>Montaje del eje conductor en la chumacera guía.</i> .....	97
4.2.5.	<i>Montaje del eje motriz al acople semiflexible.</i> .....	98
4.2.6.	<i>Montaje de los mandriles en los ejes</i> .....	98
4.2.7.	<i>Montaje del porta pesas con sus respectivas barras y acoples.</i> .....	99
4.2.8.	<i>Montaje de la probeta en los mandriles.</i> .....	99
4.2.9.	<i>Acabado de los elementos mecánicos</i> .....	99
4.3.	<b>Validación de resultados.</b> .....	100
4.3.1.	<i>Resultados de las pruebas experimentales</i> .....	100
4.4.	<b>Estudio de costos</b> .....	102
4.4.1.	<i>Costos directos</i> .....	102

4.4.2.	<i>Costo de materiales, elementos, partes y piezas mecánicas.....</i>	102
4.4.3	<i>Costo de los componentes electrónicos y equipos eléctricos. ....</i>	103
4.4.4	<i>Costo de máquinas y herramientas. ....</i>	103
4.4.5	<i>Costo de mano de obra durante la construcción. ....</i>	103
4.4.6	<i>Costo por el transporte de máquinas, materiales y equipos. ....</i>	104
4.4.7	<i>Total costo directo.....</i>	104
4.5	<b>Costos indirectos.....</b>	104
4.6	<b>Costos totales.....</b>	105
4.7	<b>Estudio comparativo con máquinas similares.....</b>	105
4.8	<b>Rentabilidad de la máquina de fatiga construida.....</b>	105
4.8.1	<i>Estimación de la depreciación.....</i>	106
4.8.2	<i>Cálculo de la depreciación. ....</i>	106
<b>CONCLUSIONES.....</b>		108
<b>RECOMENDACIONES.....</b>		109
<b>GLOSARIO</b>		
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		
<b>ANEXOS</b>		

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-2:</b>	Modelos para fatiga material de la literatura .....	9
<b>Tabla 2-2:</b>	Requerimientos establecidos para la elaboración de la casa de calidad .....	20
<b>Tabla 3-2:</b>	Casa de la calidad .....	22
<b>Tabla 4-2:</b>	Componentes de la impresora BCN3D+. .....	37
<b>Tabla 5-2:</b>	Componentes del cabezal de impresora BCN3D+. .....	37
<b>Tabla 6-2:</b>	Propiedades mecánicas y físicas del ABS. ....	41
<b>Tabla 7-2:</b>	Propiedades mecánicas y físicas del PLA. ....	42
<b>Tabla 1-3:</b>	Configuraciones colocadas en el software CURA.....	59
<b>Tabla 2-3:</b>	Características del lote impreso. ....	59
<b>Tabla 3-3:</b>	Pesos de los componentes de la máquina. ....	65
<b>Tabla 4-3:</b>	Propiedades mecánica acero ASTM A36.....	72
<b>Tabla 5-3:</b>	Características mecánicas de rodamientos soporte tipo Y.....	81
<b>Tabla 6-3:</b>	Características mecánicas chumacera de piso con rodamiento tipo Y. ....	82
<b>Tabla 1-4:</b>	Validación de resultados.....	100
<b>Tabla 2-4:</b>	Resultados de pruebas experimentales .....	100
<b>Tabla 3-4:</b>	Costo de los diferentes materiales, elementos, partes y piezas mecánicas. ....	102
<b>Tabla 4-4:</b>	Costos de los componentes electrónicos y equipos eléctricos.....	103
<b>Tabla 5-4:</b>	Costo de máquinas y herramientas. ....	103
<b>Tabla 6-4:</b>	Costo de mano de obra durante la construcción. ....	104
<b>Tabla 7-4:</b>	Total costo directo .....	104
<b>Tabla 8-4:</b>	Costo total indirecto de fabricación.....	104
<b>Tabla 9-4:</b>	Costo total de la construcción de la máquina. ....	105
<b>Tabla 10-4:</b>	Depreciación y agotamiento de la máquina de fatiga. ....	107

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b>	Ejemplo de prueba de fatiga de amplitud constante.....	5
<b>Figura 1-2:</b>	Fases de falla por fatiga .....	12
<b>Figura 2-2:</b>	Ensayo de flexión rotativa con probeta en voladizo .....	14
<b>Figura 3-2:</b>	Ensayo de flexión rotativa con probeta sobre dos apoyos .....	14
<b>Figura 4-2:</b>	Ensayo de flexión rotativa en probetas sobre dos apoyos cargados.....	15
<b>Figura 5-2:</b>	Evolución del daño en fatiga.....	16
<b>Figura 6-2:</b>	Comportamiento en fatiga del POM. ....	18
<b>Figura 7-2:</b>	Máquina para ensayos de fatiga con probeta en voladizo. ....	19
<b>Figura 8-2:</b>	Máquina para ensayo a fatiga mecánica tipo R.R Moore .....	19
<b>Figura 9-2:</b>	Prototipo para ensayo de fatiga automatizada tipo FATIMAT.....	20
<b>Figura 10-2:</b>	Diagrama de sensor de reluctancia variable o Sensor VR. ....	23
<b>Figura 11-2:</b>	Diagrama de constitución general de un opto interruptor – acoplador. ....	24
<b>Figura 12-2:</b>	Símbolos generales utilizados en interruptores finales de carrera .....	24
<b>Figura 13-2:</b>	Varios tipos de interruptores finales de carrera.....	25
<b>Figura 14-2:</b>	Esquema de datos de señal digital recopilada. ....	25
<b>Figura 15-2:</b>	Esquema de datos de señal análoga recopilada.....	25
<b>Figura 16-2:</b>	Proceso de las etapas de recopilación de datos. ....	26
<b>Figura 17-2:</b>	Esquema general de la conexión de un Relé.....	28
<b>Figura 18-2:</b>	Esquema general del diagrama de contactores.....	28
<b>Figura 19-2:</b>	Primera impresora 3D construida en 2007 denominada Darwin. ....	29
<b>Figura 20-2:</b>	Ejemplo de Impresión 3D por Estereolitografía. ....	30
<b>Figura 21-2:</b>	Ejemplo de Impresión 3D por Sinterización Selectiva por Láser. ....	31
<b>Figura 22-2:</b>	Ejemplo de Impresión 3D por Inyección. ....	31
<b>Figura 23-2:</b>	Esquema de impresora 3D de modelado por deposición fundida (FDM).....	32
<b>Figura 24-2:</b>	Ejemplo de Impresión 3D por deposición de material fundido. ....	33
<b>Figura 25-2:</b>	Proceso de impresión .....	34
<b>Figura 26-2:</b>	Esquema del proceso básico FDM.....	35
<b>Figura 27-2:</b>	Impresora BCN3D+.....	35
<b>Figura 28-2:</b>	Impresora BCN3D+ vista lateral y frontal.....	36
<b>Figura 29-2:</b>	Cabezal de impresora BCN3D+.....	37
<b>Figura 30-2:</b>	Influencia del espesor de capa en el acabado superficial.....	38
<b>Figura 31-2:</b>	Representación del porcentaje de relleno que puede tener una pieza impresa...	39
<b>Figura 32-2:</b>	Diferentes patrones de relleno.....	39
<b>Figura 33-2:</b>	Estructura del ABS. ....	40

<b>Figura 34-2:</b>	Carrete ABS Extrafill "Cobalt Blue".	41
<b>Figura 35-2:</b>	Carrete PLA Extrafill "Natural".	43
<b>Figura 36-2:</b>	Clases de probetas para ensayos en polímeros.	45
<b>Figura 37-2:</b>	Curva de fluencia continua.	46
<b>Figura 38-2:</b>	Esfuerzo a la fluencia por el método de desplazamiento 0,20%.	46
<b>Figura 39-2:</b>	Esfuerzo a la fluencia por el método de extensión 0,50%.	47
<b>Figura 40-2:</b>	Curva esfuerzo deformación con fluencia discontinua.	47
<b>Figura 41-2:</b>	Curva esfuerzo-deformación con fluencia discontinua.	48
<b>Figura 42-2:</b>	Curva S-N típica para el polímero ABS.	48
<b>Figura 43-2:</b>	Curva S-N resultante para la simulación del polímero ABS.	49
<b>Figura 44-2:</b>	Curva S-N resultante para la simulación del polímero ABS.	49
<b>Figura 45-2:</b>	Típicas curvas S-N para diferentes materiales plásticos.	49
<b>Figura 46-2:</b>	Curva S-N resultante para la simulación del polímero ABS.	50
<b>Figura 47-2:</b>	Propiedades ingresadas para la simulación del polímero ABS.	50
<b>Figura 1-3:</b>	Máquina para ensayo de fatiga.	52
<b>Figura 2-3:</b>	Modelo esquemático de Máquina de ensayo de fatiga de R.R Moore.	53
<b>Figura 3-3:</b>	DCL de prototipo de máquina de Moore.	54
<b>Figura 4-3:</b>	Diagrama de fuerza cortante del sistema.	56
<b>Figura 5-3:</b>	Diagrama de momento flector del sistema.	56
<b>Figura 6-2:</b>	Probeta diseñada en base a la norma ASTM D638-02a.	57
<b>Figura 7-3:</b>	Interfaz del software Inventor.	57
<b>Figura 8-3:</b>	Proceso para transformar a un formato STL en el software Inventor.	58
<b>Figura 9-3:</b>	Software Cura utilizado para rebanado de sólido.	58
<b>Figura 10-3:</b>	Esquema del diagrama de cuerpo libre de la viga a ser ensayada.	59
<b>Figura 11-3:</b>	Esquema de la estructura de la máquina.	61
<b>Figura 12-3:</b>	Diagrama de cuerpo libre de la estructura.	66
<b>Figura 13-3:</b>	Características del perfil rectangular 30*50*2 mm.	68
<b>Figura 14-3:</b>	Simulación SW del eje conductor.	79
<b>Figura 15-3:</b>	Simulación de esfuerzos a fatiga del eje conductor.	79
<b>Figura 16-3:</b>	Curva resultante del eje conductor sometido a fatiga.	79
<b>Figura 17-3:</b>	Dimensiones soporte de pie con rodamiento tipo Y.	82
<b>Figura 18-3:</b>	Chumacera y rodamiento UC 205.	82
<b>Figura 19-3:</b>	Lovejoy tipo L-090.	84
<b>Figura 20-3:</b>	Mandril INCCO para sujeción de probeta.	85
<b>Figura 21-3:</b>	Chumacera de presión T205.	85
<b>Figura 22-3:</b>	Esquema del armónico del motor.	87
<b>Figura 23-3:</b>	Vibraciones en los diferentes tipos de máquinas.	87

<b>Figura 24-3:</b>	Esquema del sistema eléctrico .....	87
<b>Figura 25-3:</b>	Circuito de acondicionamiento interior.....	88
<b>Figura 1-4:</b>	Maquinado del eje conductor.....	90
<b>Figura 2-4:</b>	Maquinado del eje conducido. ....	90
<b>Figura 3-4:</b>	Cepillado de los ejes luego del proceso de torneado.....	91
<b>Figura 4-4:</b>	Corte de elementos metálicos. ....	91
<b>Figura 5-4:</b>	Proceso de soldadura MIG de elementos metálicos.....	92
<b>Figura 6-4:</b>	Torneado y roscado de chumaceras de presión.....	92
<b>Figura 7-4:</b>	Proceso de soldadura MIG en porta pesas. ....	93
<b>Figura 8-4:</b>	Lovejoy tipo L-090 .....	94
<b>Figura 9-4:</b>	Torneado del Lovejoy tipo L-090 .....	94
<b>Figura 10-4:</b>	a) Peletizadora CSG 171T b) Horno Eléctrico Nabertherm.....	95
<b>Figura 11-4:</b>	Probeta impresas en 3D en base a la norma ASTM D638-02a.....	95
<b>Figura 12-4:</b>	Control de mallado en las probetas a) PLA b) ABS. ....	95
<b>Figura 13-4:</b>	Composición del mallados en las probetas de PLA Y ABS. ....	95
<b>Figura 14-4:</b>	Montaje de las columnas de la estructura metálica. ....	96
<b>Figura 15-4:</b>	Montaje de las placas y chumaceras. ....	96
<b>Figura 16-4:</b>	Montaje del acople semiflexible al eje del motor .....	97
<b>Figura 17-4:</b>	Montaje del eje en las chumaceras guías. ....	97
<b>Figura 18-4:</b>	Montaje y ajuste de las chumaceras de presión en los ejes.....	97
<b>Figura 19-4:</b>	Montaje del motor en el eje de motriz. ....	98
<b>Figura 20-4:</b>	Acoplamiento del eje al motor eléctrico. ....	98
<b>Figura 21-4:</b>	Montaje de los mandriles en los ejes. ....	98
<b>Figura 22-4:</b>	Montaje del porta pesas con sus respectivas barras y acoples. ....	99
<b>Figura 23-4:</b>	Montaje de la probeta y sujeción en las mordazas.....	99
<b>Figura 24-4:</b>	Acabado de los elementos mecánicos.....	100
<b>Figura 25-4:</b>	Valores experimentales del ABS según simulación.....	101
<b>Figura 26-4:</b>	Curva S-N experimental del ABS.....	101



## **INDICE DE ANEXOS**

- ANEXO A:** MANUAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO
- ANEXO B:** HOJA DE TRABAJO MANTENIMIENTO PREVENTIVO INDICATIVO
- ANEXO C:** HOJA DE VIDA DE EQUIPO
- ANEXO D:** DATASHEET ABS
- ANEXO E:** DATASHEET PLA
- ANEXO F:** CARACTERÍSTICAS PERFIL ESTRUCTURAL RECTANGULAR DIPAC
- ANEXO G:** PLANCHAS LAMINADAS AL CALIENTE DIPAC
- ANEXO H:** HOJA DE DATOS MOTOR MONOFÁSICO WEG
- ANEXO I:** CURVA DE DESEMPEÑO EN CARGA MOTOR WEG
- ANEXO J:** HOJA DE DATOS TÉCNICOS DEL ACERO ESTRUCTURAL ASTM A36
- ANEXO K:** GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO
- ANEXO L:** PLANOS

## RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se trazó el objetivo de diseñar una máquina para ensayos de resistencia a la fatiga mecánica por flexión rotativa y su posterior construcción con la modalidad de bajo costo para ensayar en probetas a base de polímeros impresos en 3D utilizando materiales de origen local en beneficio de los alumnos que realizan las prácticas en el Laboratorio de Mecánica de Materiales de la ESPOCH, para lo cual se analizaron investigaciones de donde se menciona que para dicha aplicación es primordial realizar el diseño de los subsistemas que intervienen en el desarrollo de la máquina como los son el mecánico, eléctrico y electrónico que está compuesto principalmente por motor eléctrico, cojinetes acoplados a chumaceras, acoples termoestables, mordazas, ejes, placas y una estructura que soporte las carga a ser aplicadas además de los pesos muertos respectivos. Continuando con la siguiente fase que fue la construcción de la estructura en base a las características originales del diseño de la máquina seleccionada, además de la implementación de los diferentes elementos de control electrónico, hay que tomar en cuenta que todos los elementos fueron fabricados y luego ensamblados siguiendo las especificaciones de diseño y las normas de seguridad industrial. Como resultado final una vez realizada la construcción de la máquina se logra estudiar de una mejor manera la Ciencia y la Resistencia de los materiales en las prácticas de laboratorio la que nos sugiere la utilización de probetas basadas en la norma ASTM D671, donde se indican los estándares a seguir para este tipo de ensayos, por lo que se recomienda cumplir con un adecuado plan de mantenimiento preventivo indicativo y conservativo para así garantizar la operación de la máquina, alargando su vida útil y realizar un estudio más estricto referente a las vibraciones mecánicas.

**Palabras Clave:** <MÁQUINA ELÉCTRICA>, <FATIGA MECÁNICA>, <ANÁLISIS DE FALLAS>, <CONTROL ELECTRÓNICO>, <DISEÑO MECÁNICO>, <MANTENIMIENTO PREVENTIVO>.

## **ABSTRACT**

In this titling work, the objective of designing a machine for testing resistance to mechanical fatigue by rotary bending was set and its subsequent construction with the low-cost modality to test in specimens based on 3D-printed polymers using source materials for the benefit of the students who carry out the practices in the Materials Mechanics Laboratory of the ESPOCH, for which investigations were analyzed where it is mentioned that for this application it is essential to carry out the design of the subsystems that intervene in the development of the Machine such as the mechanical, electrical and electronic one that is mainly composed of an electric motor, bearings coupled to bearings, thermoset couplings, clamps, shafts, plates and a structure that supports the loads to be applied in addition to the respective dead weights. Continuing with the next phase, which was the construction of the structure based on the original characteristics of the design of the selected machine, in addition to the implementation of the different electronic control elements, it must be taken into account that all the elements were manufactured and then assembled following design specifications and industrial safety standards. As a final result, once the construction of the machine is carried out, it is possible to study in a better way the Science and Resistance of materials in laboratory practices, which suggests the use of test tubes based on the ASTM D671 standard, where the standards to follow for this type of test, so it is recommended to comply with an adequate indicative and conservative preventive maintenance plan in order to guarantee the operation of the machine, lengthening its useful life and carrying out a more strict study regarding mechanical vibrations.

**Key words:** <ELECTRIC MACHINE>, < MECHANICAL FATIGUE>, <FAULT ANALYSIS>, <ELECTRONIC CONTROL>, <MECHANICAL DESIGN>, <PREVENTIVE MAINTENANCE>.

## INTRODUCCIÓN

La máquina de prueba de fatiga se utiliza para determinar la vida útil o la resistencia a la fatiga de un material. Un descuido de las partes rotas en la mayor parte del elemento revisado mostrará que casi todas las fallas ocurren con tensiones por debajo del límite elástico del material.

A este fenómeno mecánico se conoce como la "fatiga", que es la responsable del 90% de las fallas que ocurren en una industria. En el siglo XIX, se consideraba misterioso ya que una fractura por fatiga no exhibía ninguna deformación plástica visible, lo que llevó a creer que la fatiga era un problema de ingeniería. Un avance importante en la comprensión del proceso de falla por fatiga ocurrió en el siglo XX con la ayuda de herramientas más poderosas como la computadora, un poderoso instrumento microscópico, después de lo cual la fatiga no se consideró como un problema de ingeniería sino como un fenómeno material y de diseño. La idea detrás de este trabajo no es proporcionar respuestas a las preguntas sin respuesta, sino resolver la dificultad de responderlas desde una perspectiva diferente. Esto implica definir la naturaleza impredecible de la falla por fatiga mediante la realización de pruebas en varias muestras y explica las técnicas conocidas de prueba de fatiga. En la ciencia de los materiales, la fatiga es un fenómeno de debilitamiento de un material causado por la aplicación repetida de cargas. (Shigley, y otros, 2008). Es el daño progresivo, impredecible y estructural que tiene lugar cuando un material está sujeto a una carga cíclica. Si las cargas aplicadas son mayores que un cierto valor umbral, entonces se comenzarán a formar grietas microscópicas en las áreas concentradas de tensión, como la interfaz del grano o donde hay defectos superficiales. Finalmente, una grieta alcanzará un tamaño crítico, la grieta se expandirá a un ritmo más rápido y la estructura fallará. (Ortiz Berrocal, 2007). (Ñauta, y otros, 2017)

Las fallas por fatiga generalmente involucran tres etapas:

- Iniciación de la grieta.
- Propagación de la grieta.
- Fractura final.

De entre las diversas variedades de máquinas para ensayo de fatiga por flexión rotatorias comerciales, se decide trabajar tomando como punto de partida a la máquina de Moore, para ello se analizan las diferentes configuraciones en función de la aplicación al material que va a ser ensayado en beneficio de los alumnos que utilizan el laboratorio de Resistencia de Materiales ubicado en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la ESPOCH.

# CAPÍTULO I

## 1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

### 1.1. Antecedentes

La impresión 3D, más formalmente conocida como Fabricación Aditiva (AM), ya se está adoptando para la creación rápida de prototipos y la fabricación rápida. Esta revisión proporciona una breve discusión sobre AM y también sobre las tecnologías de AM más empleadas para polímeros. Se han informado los estándares de pruebas mecánicas ASTM e ISO de uso común que han sido utilizados por varios grupos de investigación para probar la resistencia de las piezas impresas en 3D. Además, se incluye un resumen de una cantidad exhaustiva de literatura sobre las propiedades mecánicas de las piezas impresas en 3D, específicamente, propiedades bajo diferentes tipos de carga, tales como tracción, flexión, compresión, fatiga, impacto y otros. También se han discutido propiedades a bajas temperaturas. Además, también se han discutido los efectos de los rellenos, así como el procesamiento posterior sobre las propiedades mecánicas. Por último, se han planteado varias preguntas importantes a considerar en la estandarización de los métodos de prueba mecánica. Actualmente el ámbito de las impresiones 3D están en pleno crecimiento y los materiales con las que se realizan como el ácido láctico, es el ácido carboxílico que mayor presencia tiene en la naturaleza. El PLA es un termo-plástico biodegradable que puede ser procesado para convertirse en un material compuesto, su monómero que es el ácido láctico, se deriva de fuentes vegetales renovables, como el almidón y el azúcar; dicho elemento tiene la propiedad de poder ser degradado en dióxido de carbono y agua por la acción de hongos adecuados. (Simulación de termofluidos de PLA natural y ABS en el proceso de impresión en 3D, 2017).

El PLA puede ser utilizado por sus excelentes propiedades y facilidades de procesamiento, actualmente se puede observar en una amplia gama de aplicaciones tanto en la industria como en productos básicos como son los materiales de embalajes, envases desechables y ácido poliláctico en fibras, que sirve como sustituto de fibras sintéticas y prendas de vestir tales como camisería, vestidos, lencería, etc. (Ren, 2011). Fillamentum PLA Extrafill es un material comercial para la tecnología de impresión 3D FFF (también conocida como FDM). La ventaja de este material es que puede ser utilizado en impresoras 3D fácilmente ya que nos permite una alta calidad de impresión, incluso en detalles difíciles y una excelente laminación y acabado del objeto impreso. El filamento de PLA se hace de ingredientes naturales y es fácilmente biodegradable. Los filamentos de impresión indicados en la marca comercial Fillamentum se producen en una gran variedad de colores de acuerdo con las tablas de colores RAL y Pantone, así como en sus propias

gammas de colores únicos. (Simulación de termofluidos de PLA natural y ABS en el proceso de impresión en 3D, 2017).

Un termoplástico biodegradable se lo considera al ácido poliláctico ya que está hecho a base de fuentes renovables como lo son el almidón de maíz o la caña de azúcar, aparte de usarse en la impresión 3D, se lo puede encontrar en varias aplicaciones como vajillas desechables, implantes médicos o envases de alimentos, además que el más importante beneficio que nos brinda este material en su presentación de filamentos es que es fácil de extruir, por otro lado el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) que también se lo va a estudiar, según la literatura es un termoplástico derivado del petróleo, a éste elemento lo podemos encontrar fácilmente en los sistemas de tuberías de fluidos, así como también en revestimientos de automóviles, cascos de motocicletas y diferentes juguetes como los Legos para niños; para aplicaciones de impresiones en 3D se utiliza este material en la presentación de filamentos ya que cuentan con una resistencia, flexibilidad y durabilidad ligeramente más elevadas que la de los objetos fabricados con filamento PLA, pero el proceso de impresión resulta un poco más complicado por su composición ya que está llena de humos desagradables. (Simulación de termofluidos de PLA natural y ABS en el proceso de impresión en 3D, 2017).

El fenómeno de la fatiga se descubrió en los años 1800 cuando varios científicos realizando estudios pudieron ver que un puente y varios de los elementos constitutivos de un ferrocarril tenían algunas grietas cuando se sujetaban a cargas repetidas. Los elementos mecánicos en su mayoría se encuentran sometidos a diversas cargas, entre ellas las cíclicas por esto, surge la necesidad de efectuar investigaciones que permitan determinar el diverso comportamiento de los materiales, esto mediante varios ensayos que logren recortar los indicadores de errores en los distintos equipos utilizados en el ámbito de la ingeniería, ya que cuando se someten a cargas cíclicas controladas se puede determinar la resistencia a las distintas cargas repetitivas. Para este tipo de actividades, se debe de contar con los diferentes máquinas y equipos de laboratorio para que ayuden a los investigadores del área de resistencia de materiales y directamente en el tema de la fatiga mecánica. (Shigley, y otros, 2008).

Los materiales compuestos a base de polímeros se han convertido en partes claves en varias industrias como la del transporte y la energía alternativa, ya que son más livianos que las aleaciones homogéneas y los metales ferrosos y tienen buenos niveles de resistencia y en los diferentes estudios se hacen pruebas para comprender cómo funcionan estos compuestos de polímeros después de largos períodos de uso, por lo que se suelen utilizar pruebas de fatiga cíclica. (Simulación de termofluidos de PLA natural y ABS en el proceso de impresión en 3D, 2017).

## **1.2. Planteamiento del problema.**

Actualmente la Carrera de Mecánica posee como uno de sus activos fijos una máquina para realizar prácticas con los estudiantes de fatiga mecánica, la misma que debido a los años de uso

se encuentra poco funcional, se podría decir que ha alcanzado tu tiempo límite de vida, tomando en cuenta también que es utilizada para ensayos únicamente en materiales ferrosos. Todos estos acontecimientos previos hacen que haya un desfase en los ensayos de fatiga en los diferentes tipos de materiales además que actualmente la fabricación de objetos 3D a partir de un modelo digital (CAD) este en constante ascenso, debido al adelanto tecnológico que progresa día a día.

Los procesos de fabricación aditiva se originan con el nombre de prototipado rápido, ya que primero se concibió esta tecnología con el único y principal objetivo de construir prototipos, por lo que se construían piezas que sirvan para validar o verificar un nuevo diseño, para que posteriormente se lleven a producción con tecnología no aditiva, como inyección o mecanizado. (Selecting process parameters in RepRap additive manufacturing system for PLA scaffolds manufacture, 2013). En virtud de los inconvenientes presentados es necesario diseñar una máquina para polímeros y realizar esta aplicación para ensayos de fatiga analizando su comportamiento mecánico ya que se puede mejorar la adquisición de los datos y procesamiento de la información adquirida durante el ensayo, al ser destinada únicamente para este tipo de materiales.

Actualmente sabemos que la industria local se ha dedicado únicamente a la importación de partes, productos e insumos formados por polímeros compuestos. Aunque en varias industrias como la automotriz se realizan trabajos artesanales que combinan polímeros y fibra de carbono o de vidrio para manufacturar accesorios de autos que se hacen de forma manual, por lo que sería de mucha utilidad realizar un estudio del comportamiento de los polímeros y fortalecer los conocimientos de los alumnos en el área de resistencia de materiales en polímeros.

El ácido poliláctico y el acrílico nitrilo butadieno son considerados como fluidos no Newtonianos e independientes del tiempo, los mismos que se pueden clasificar en 3 tipos: fluidos dilatantes, tixotrópicos o Neuroplásticos, y fluidos de Bingham; de acuerdo con la reometría basada en la norma ASTM D3835 – 16 y las curvas de la Viscosidad Dinámica Aparente vs Gradiente de velocidad, clasifican a dichos polímeros en estudio como fluidos no newtonianos independientes del tiempo, característica que brinda el índice de comportamiento de flujo. (Mott, 2006).

Con el avance de la tecnología se origina la técnica aditiva del modelado por deposición fundida que consiste en depositar el polímero fundido previamente sobre una base plana, colocándose el mismo capa a capa; dicho material, que inicialmente se encuentra en estado sólido y almacenado en rollos o carretes, se procede a fundir y es expulsado por la boquilla de la impresora en minúsculos hilos que se van solidificando conforme van adquiriendo la forma de cada capa realizado en el prediseño. (García, 2014).

Actualmente es la técnica más común que existe en cuanto a impresoras 3D de escritorio que beneficia a los estudiantes principalmente; aunque los elementos finales impresos pueden ser muy





componentes clave en varias grandes industrias relacionadas con el consumo de energía, incluida la fabricación de transporte y la producción de energía alternativa. (Casado del Prado, 2001).

Adquirir conocimientos sobre la fatiga compuesta de polímeros requiere una experimentación adecuada, lo que brinda oportunidades y desafíos para la planificación de pruebas. La mayoría de las pruebas realizadas en este campo están de acuerdo con los estándares provistos en ASTM E739 (2010) para las pruebas y análisis de fatiga compuesta de polímeros. Todos los planes de prueba discutidos dentro de este estándar son de naturaleza equilibrada con igual replicación y espaciado de las muestras de prueba basadas en la norma ASTM D3479 que nos indica los procedimientos para la determinación de las propiedades de los materiales compuestos de matriz polimérica.

Este método de prueba está diseñado para proporcionar datos de fatiga por tracción para especificaciones de materiales, investigación y desarrollo, garantía de calidad y diseño y análisis estructural. El resultado primario de la prueba es la vida de fatiga de la muestra bajo una carga específica y una condición ambiental. Se recomienda tener una cantidad suficiente de muestras en cada condición de prueba para tener datos confiables y repetibles para usar en el análisis y diseño estadístico.

### **1.3. Justificación**

#### *1.3.1. Justificación teórica.*

Partiendo de la formulación del problema podemos determinar que el realizar el ensayo de fatiga que como sabemos es un ensayo dinámico a través del cual es posible caracterizar las siguientes propiedades tecnológicas:

- Límite de fatiga, definido como el máximo valor de tensión por debajo de la cual no se produce el fenómeno de fatiga. Normalmente, este valor se determina mediante el ensayo de Wöhler.
- Resistencia a la fatiga del material, entendida como el máximo valor de tensión que no produce la fractura del mismo por fatiga hasta haber alcanzado un determinado número de ciclos. Esta definición es útil en aquellos materiales que no presentan un límite de fatiga definido. Este valor se determina a partir del ensayo de Whöler.
- Velocidad de crecimiento de fisuras por fatiga, que se determina mediante un ensayo específico basado en la mecánica de la fractura elástica lineal y permite estimar la vida a fatiga de un material sometido a condiciones que van a provocar el fenómeno de fatiga. Todos estos parámetros son de selección de materiales y de diseño.

Además contribuirá al aprendizaje de los estudiantes y docentes investigadores sobre el fenómeno de la fatiga mecánica, esta máquina se utilizará como parte de la enseñanza y como medio

didáctico para la ejecución de docencia sobre ensayos de fatiga en polímeros por flexión y los resultados que arroje la experimentación compararlos con los datos teóricos e investigativos de la bibliografía, así se podría comprobar que la máquina entrega datos confiables para ser verificados luego de las prácticas de laboratorio de esta manera se aumenta el nivel académico de los docentes y alumnos, realizando este tipo de prácticas que son innovadoras.

### 1.3.2. *Justificación metodológica.*

La metodología de diseño específica para los accesorios requeridos para el diseño y construcción de una máquina universal para ensayos a fatiga en probetas a base de polímeros. En la fase del diseño de los elementos de máquinas se debe realizar un estudio previo de las partes que componen la máquina para ensayos a fatiga, posteriormente se inicia la recopilación de la información en papers, tesis e internet, para luego continuar con la fase de análisis del diseño y estudio del mercado y posterior construcción, análisis de las pruebas en el laboratorio y la realización de un manual para su operación, mantenimiento, revisión y seguridad.

### 1.3.3. *Justificación práctica.*

El proyecto se realiza para profundizar en el conocimiento estudiantil con respecto al estudio de los materiales en el área de diseño. Para lograr ello de una manera efectiva, se requiere un estudio profundo de los polímeros en nuestro caso el PLA y ABS para el diseño y construcción de una máquina para ensayos a fatiga en probetas construidas con dicho material con lo que logrará mejorar el nivel de conocimiento del fenómeno de la fatiga en los estudiantes y docentes de la Facultad de Mecánica.

## **1.4. Alcance**

El alcance del proyecto técnico a implementarse se puede lo establecer como: Se realizará un diseño y construcción de una máquina para ensayos de fatiga mecánica por flexión en probetas construidas a base de polímeros impresas en 3D en materiales como ácido poliláctico y acrilonitrilo butadieno, una vez que sean comprobados su validez y confiabilidad podrán ser utilizados para realizar ensayos con estudiantes en el área de resistencia de materiales.

## **1.5. Objetivos**

### 1.5.1. *Objetivo General.*

Diseñar y construir una máquina para ensayo de fatiga mecánica por flexión aplicada a probetas fabricadas con base de polímeros impresos en 3D en cumplimiento a los parámetros establecidos en la Norma ASTM D671.

### 1.5.2. *Objetivos Específicos.*

- Realizar el estudio del arte sobre los ensayos de fatiga mecánica por flexión en polímeros.
- Diseñar los elementos partes y piezas mecánicas eléctricas y electrónicas que forman parte del sistema de la máquina de fatiga y ensayar en probetas en forma satisfactoria.
- Realizar una guía de prácticas a ser utilizada en el laboratorio de resistencia de materiales que facilite el uso de la máquina además de la docencia para realizar la práctica de resistencia a la fatiga mecánica en polímeros.
- Realizar un manual de seguridad y operación adecuado además de su respectivo plan de mantenimiento preventivo indicativo y conservativo para la máquina de ensayo a fatiga.

## CAPÍTULO II

### 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA O FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

Existe abundante literatura sobre modelos para la vida útil de los materiales compuestos de polímeros. Aquí, la atención se centrará en los modelos de tiempo de falla acelerado (AFT) para la curva de esfuerzo-vida (S-N) bajo prueba de esfuerzo de amplitud cíclica constante. La Tabla 1 resume algunos de los modelos importantes en la literatura de regresión de fatiga. Aquí,  $N$  es la vida útil en los ciclos de carga,  $\sigma_M$  es el esfuerzo máximo aplicado durante la prueba,  $\sigma_e$  es el límite de resistencia por debajo del cual la vida útil es teóricamente infinita, y  $\sigma_u$  es la resistencia máxima del material, que representa el esfuerzo máximo que el material puede soportar antes de la falla instantánea. En ingeniería y, en especial, en ciencia de los materiales, la fatiga mecánica está directamente relacionada con la rotura de los materiales bajo cargas dinámicas cíclicas ya que esta se produce más fácil que cuando está sometida a cargas estáticas. Aunque es un fenómeno que, sin definición formal, era reconocido desde la antigüedad, este comportamiento no fue de interés real hasta la revolución industrial, cuando a mediados del siglo XIX se comenzaron a producir las fuerzas necesarias para provocar la rotura de los materiales con cargas dinámicas y estáticas además de desarrollar métodos de cálculo para el diseño de piezas confiables. Este no es el caso de materiales de aparición reciente, para los que es necesaria la fabricación y el ensayo de prototipos.

- 1 Denominado ciclo de carga repetida, los máximos y mínimos son asimétricos con respecto al nivel cero de carga.
- 2 Aleatorio: el nivel de tensión puede variar al azar en amplitud y frecuencia.

**Tabla 1-2:** Modelos para fatiga material de la literatura

Model	Formula
Wöhler/ASTM	$\log(N) = A - B\sigma_M$
Weibull	$\log(N + D) = A - B \log\left(\frac{\sigma_M - \sigma_e}{\sigma_u - \sigma_e}\right)$
Spindel and Haibach	$\log\left(\frac{N}{N_e}\right) = A \log\left(\frac{\sigma_M}{\sigma_e}\right) - B \log\left(\frac{\sigma_M}{\sigma_e}\right) + B \left\{ \frac{1}{C} \log \left[ 1 + \left(\frac{\sigma_M}{\sigma_e}\right)^{-2C} \right] \right\}$
Kohout and Vechet	$\log\left(\frac{\sigma_M}{\sigma_e}\right) = A \log\left(\frac{N+N_1}{N+N_2}\right)$
Epaarachchi and Clausen	$\log(N) = \frac{1}{B} \log \left\{ \left(\frac{B}{A}\right) f_r^B \left(\frac{\sigma_M}{\sigma_e} - 1\right) \left(\frac{\sigma_M}{\sigma_e}\right)^{\gamma(\alpha)-1} [1 - \psi(R)]^{-\gamma(\alpha)} + 1 \right\}$

**Fuente:** Bastian, F. L., Caminha, H. M., Moraes, M., 1989

#### 2.1. Introducción a los polímeros.

Los polímeros, que abarcan materiales tan diversos como los plásticos, el hule o caucho y los adhesivos, son moléculas orgánicas gigantes en cadena, con pesos moleculares desde 10,000 hasta

más de 1,000,000 g/mol. La polimerización es el proceso mediante el cual moléculas más pequeñas se unen para crear estas moléculas gigantes. Los polímeros se utilizan en un número sorprendente de aplicaciones, incluyendo juguetes, aparatos domésticos, elementos estructurales y decorativos, recubrimientos, pinturas, adhesivos, llantas de automóvil, espumas y empaques. Los polímeros son a menudo utilizados como fibra y como matriz en compuestos. (Salvador, M. D., Amigó, V., Sahuquillo, O., Antolinos, C. M., Segovia, F., Vicente, A., & Sanz, C, 2004).

Los polímeros comerciales o estándar son materiales ligeros resistentes a la corrosión, de baja resistencia y rigidez, y no son adecuados para uso a temperaturas altas. Sin embargo, son relativamente económicos y fácilmente conformables en una diversidad de formas, desde bolsas de plástico o engranes metálicos y tinas de baño. Los polímeros ingenieriles están diseñados para dar una mejor resistencia o mejor rendimiento a temperaturas elevadas. Estos últimos se producen en cantidades relativamente pequeñas y son costosos. Algunos de los polímeros ingenieriles pueden funcionar a temperaturas tan altas como 350°C; otros, usualmente en forma de fibra, tienen resistencias superiores a las del acero. Los polímeros también son resistentes a la corrosión y al ataque químicos. (Bledzki, 2007)

## **2.2. Fenómeno de la fatiga**

La fatiga es el efecto generado en el material debido a la aplicación de cargas dinámicas cíclicas. Los esfuerzos son variables, alternantes o fluctuantes. La gran cantidad de repetición de esfuerzos conducen a la falla por fatiga del elemento, así el máximo esfuerzo calculado esté dentro del límite permisible, también puede ser considerado como un proceso de degeneración de un material sujeto a cargas cíclicas de valores inferiores de aquellos que serían capaces de provocar su rotura mediante tracción, a menudo, los elementos de máquinas han fallado bajo la acción de esfuerzos repetidos o fluctuantes; no obstante, el análisis más cuidadoso revela que los esfuerzos máximos reales estuvieron inferior a la resistencia última del material y con mucha frecuencia inferior a la resistencia a la fluencia, además, que la característica más notable de estas fallas radica en que los esfuerzos se repitieron un gran número de veces. (Wong, 2016).

La falla de los materiales estructurales bajo aplicaciones de tensión o tensión cíclica se conoce como falla por fatiga. El análisis macroscópico del comportamiento a la fatiga de los materiales poliméricos se realiza de acuerdo con las metodologías establecidas para los materiales metálicos, a través de diferentes tipos de estudios mecánicos: determinación del límite de resistencia mediante la técnica de Wöhler, comúnmente aceptada como curva SN, que define la relación entre el rango de variación de voltaje y el número de ciclos hasta la falla final, o la caracterización de las condiciones globales o locales de propagación de grietas. (Casado del Prado, 2001)

En la literatura de ingeniería, los primeros modelos (por ejemplo, Wöhler 1870) fueron modelos

de regresión lineal simples en datos de semi-log o log-log. Los estándares de la industria, como ASTM E739 (2010), todavía presentan estos modelos para el análisis de datos de fatiga. Weibull (1949) introdujo un modelo con un término de compensación  $D$ , un límite de resistencia  $\sigma_e$  y una resistencia a la tracción máxima  $\sigma_u$  basada en el trabajo previo. Spindel y Haibach (1981) incorporaron el límite de resistencia a través de un empalme suave de dos líneas. Kohout y Vechet (2001) incorporaron las transiciones de vidas de ciclo bajo ( $N_1$ ) o de ciclo alto ( $N_2$ ) a vidas intermedias simultáneamente. Los modelos de distribución, que intentan describir la distribución condicional del estrés de por vida, están disponibles en Castillo y Hadi (1995), Castillo y Fernández-Canteli (2009), y Pascual y Meeker (1999).

Todos los modelos mencionados se basan esencialmente en modelos lineales. Sin embargo, como Castillo et al. (1985) señalaron que los datos de fatiga no son lineales por naturaleza. Clausen (2003) introdujeron un modelo no lineal motivado físicamente, que se derivó de suposiciones sobre la acumulación de daños por fatiga en materiales compuestos de polímeros. También considera el efecto de las variables involucradas en el procedimiento de prueba basado en el conocimiento adquirido de los datos experimentales. Esto, combinado con su naturaleza parsimoniosa (solo se desconocen los parámetros  $A$  y  $B$ ), nos proporcionó una justificación suficiente para considerarlo como la base de nuestros diseños óptimos. Con respecto a la planificación de pruebas, los estándares de la industria para crear planes de pruebas equilibrados se dan en ASTM D3479 (2012) y ASTM E122 (2009).

Con respecto a la planificación óptima de la prueba acelerada, Nelson y Kielpinski (1976) derivaron planes basados en distribuciones normales y logarítmicas con el objetivo de minimizar la varianza del estimador de máxima verosimilitud (ML) de la vida media / mediana. Nelson y Meeker (1978) consideraron las distribuciones de Weibull y de valores extremos y el objetivo de minimizar la varianza del estimador de ML de un cuantil especificado. Meeker (1984) comparó los planes basados en Weibull y las distribuciones normales de registro y concluyó que los planes de compromiso pueden ser más adecuados, ya que son más robustos para las desviaciones de los supuestos del modelo. Meeter y Meeker (1994) derivan planes en los que el parámetro de escala no es constante y Pascual (2006) analiza planes que son robustos para modelar especificaciones erróneas. Pascual (2003) deriva varios planes basados en su modelo aleatorio de límite de fatiga.

### **2.3. Fases de fallo por fatiga**

#### *2.3.1. Inicio y propagación de la grieta.*

El proceso de rotura por fatiga se desarrolla a partir del inicio de la grieta y se continúa con su propagación y la rotura final.

##### *2.3.1.1. Inicio*

Las grietas que originan la rotura o fractura casi siempre nuclean sobre la superficie en un punto donde existen concentraciones de tensión originadas por diseño o acabados, las cargas cíclicas pueden producir discontinuidades superficiales microscópicas a partir de escalones producidos por deslizamiento de dislocaciones, los cuales actuarán como concentradores de la tensión y, por tanto, como lugares de nucleación de grietas.

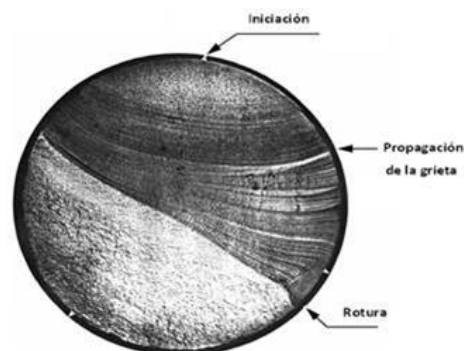
### 2.3.1.2. Propagación

- Etapa I: una vez nucleada una grieta, entonces se propaga muy lentamente y, en metales policristalinos, a lo largo de planos cristalográficos de tensión de cizalladura alta; las grietas normalmente se extienden en pocos granos en esta fase.
- Etapa II: En esta etapa se analiza la velocidad de extensión de la grieta ya que esta aumenta de manera acelerada y en ese punto la grieta desiste de crecer en el eje del esfuerzo aplicado para comenzar a crecer en dirección perpendicular al esfuerzo aplicado. La grieta crece por un proceso de enrolamiento y agudizamiento de la punta a causa de los ciclos de tensión.

### 2.3.1.3. Rotura

Al mismo tiempo que la grieta aumenta en anchura, el extremo avanza por continua deformación por cizalladura hasta que alcanza una configuración enromada. Se alcanza una dimensión crítica de la grieta y se produce la rotura.

La región de una superficie de fractura que se formó durante la etapa II de propagación puede caracterizarse por dos tipos de marcas, denominadas marcas de playa y estrías. Ambas indican la posición del extremo de la grieta en diferentes instantes y tienen el aspecto de crestas concéntricas que se expanden desde los puntos de iniciación. Las marcas de playa son macroscópicas y pueden verse a simple vista. Las marcas de playa y estrías no aparecen en roturas rápidas, lo que se puede apreciar en la figura 1-2. (Alvarracín, Córdova, Jhon Stalin, and Hermán Patricio Loayza Hidalgo, 2010)



**Figura 1-2:** Fases de falla por fatiga

**Fuente:** Bastian, F. L., Caminha, H. M., Moraes, M., 1989.

El estudio del comportamiento a la fatiga de estos materiales debe basarse en los factores de este tipo de solicitud, como la frecuencia de aplicación de la carga, los límites de voltaje superior e inferior y la forma de la onda de carga, es decir, aquellos relacionados con la evolución en el momento de la solicitud, que afectan este comportamiento. Además, debe tenerse en cuenta que la naturaleza disipativa de los polímeros establece una alta histéresis mecánica. Debido a su baja conductividad térmica, una alta proporción del trabajo mecánico realizado se convierte en calor, lo que complica el análisis de la fatiga en un alto grado, particularmente a altas frecuencias. Por lo tanto, el comportamiento de fluencia de estos materiales, dependiendo de su temperatura, proporciona información importante para el conocimiento de los fenómenos de fatiga. (Casado del Prado, 2001).

#### **2.4. Teorías del fenómeno de fatiga mecánica.**

Existen tres teorías que estudian el fenómeno de fatiga mecánica.

##### *2.4.1. Fenómeno de fatiga con alto número de ciclos*

- Se emplea para aplicaciones en grandes ciclos (mayores a 1000 ciclos).
- El fallo se considera la aparición de la grieta.
- Se presenta una gran cantidad de datos empíricos disponibles.

La Curva S-N según esta teoría se realiza la valoración de vida a partir de la amplitud de tensiones, para este caso, se inicia de un modelo de comportamiento elástico, posteriormente se aproxima el estado tensional a partir de la tensión en zonas situadas a niveles de carga menores al límite elástico. (Alvarracín, Córdova, Jhon Stalin, and Hermán Patricio Loayza Hidalgo, 2010).

##### *2.4.2. Fenómeno de fatiga con bajo número de ciclos.*

- Se utiliza para aplicaciones en bajo número de ciclos (menor a 1000 ciclos).
- Se basa en el estudio de aplicaciones de deformaciones en vez de tensiones.

La curva S-N según esta teoría se la establece como una formulación de vida a partir de la amplitud de deformaciones. La fluencia sucede en posiciones críticas del elemento. (Alvarracín, Córdova, Jhon Stalin, and Hermán Patricio Loayza Hidalgo, 2010).

##### *2.4.3. Mecánica lineal de la fractura por fatiga.*

- Se presume que la grieta ya se originó.
- La vida del material se la determina mediante el cálculo de la propagación de la grieta hasta la rotura del mismo.
- Corresponde al estado II del fenómeno de la fatiga mecánica (Alvarracín, Córdova, Jhon Stalin, and Hermán Patricio Loayza Hidalgo, 2010)

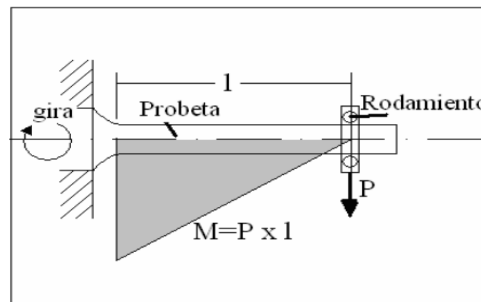


## 2.5. Ensayos en laboratorios de fatiga por flexión rotativa

El ensayo a la fatiga está determinado por Wöhler en el cual una probeta lisa, entallada es sometida a una carga variable de amplitud constante determinándose el número de ciclos necesarios para que se produzca la iniciación de la fisura por fatiga. (Materiales reforzados de poliolefinas recicladas y nanofibras de celulosa de henequén, 2011)

### 2.5.1. Fenómeno de flexión rotativa en voladizo.

En el extremo de una probeta que está empotrada por su otro extremo, como se aprecia en la figura 2-2. El momento de flexión varía linealmente con la distancia a la sección considerada del eje de aplicación de la carga P. (Materiales reforzados de poliolefinas recicladas y nanofibras de celulosa de henequén, 2011)

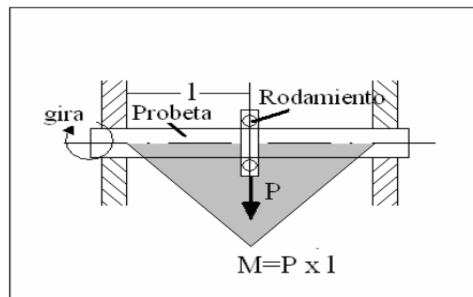


**Figura 2-2:** Ensayo de flexión rotativa con probeta en voladizo

Fuente: Medina y Oropeza, 2005.

### 2.5.2. Fenómeno de flexión rotativa sobre dos apoyos.

En el centro de la probeta que reposa sobre apoyos en sus dos extremos, con aplicación de la carga en un punto, como se aprecia en la figura 3-2. (Materiales reforzados de poliolefinas recicladas y nanofibras de celulosa de henequén, 2011)

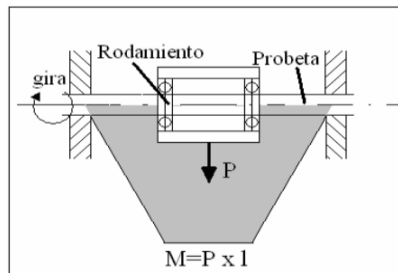


**Figura 3-2:** Ensayo de flexión rotativa con probeta sobre dos apoyos

Fuente: Medina y Oropeza, 2005.

### 2.5.3. Fenómeno de flexión rotativa sobre dos apoyos cargados.

La sollicitación se aplica en dos puntos, como se aprecia en la figura 4-2. El momento de flexión es entonces constante en toda la longitud de la probeta. (Materiales reforzados de poliolefinas recicladas y nanofibras de celulosa de henequén, 2011)



**Figura 4-2:** Ensayo de flexión rotativa en probetas sobre dos apoyos cargados

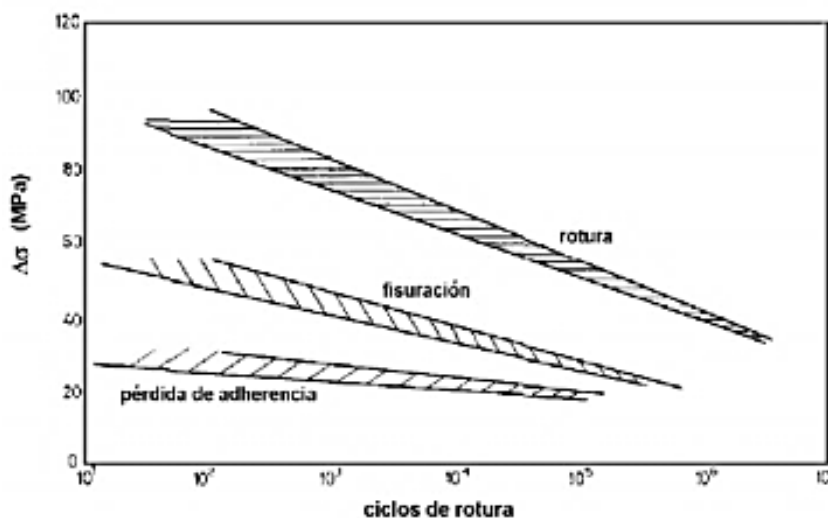
Fuente: Medina y Oropeza, 2005.

## 2.6. Comportamiento de los polímeros.

Herman y sus colaboradores analizaron la fatiga en varios polímeros de ingeniería en 1990. Las muestras poliméricas probadas mostraron rupturas debido a fallas térmicas cuando fueron sometidas a fuertes niveles de estrés al provocar un calentamiento de alta histéresis. Del mismo modo, los estudios realizados por Pétrault en 1993 sobre el comportamiento a la fatiga de la poliamida (PA) revelan un fuerte calentamiento térmico de histéresis, cuyos efectos están gobernados por la amplitud de los esfuerzos impuestos y por la frecuencia a la que se aplican. Por lo tanto, la rotura obtenida puede considerarse de origen termodinámico. Sin embargo, cuando se aplica niveles de esfuerzos inferiores, la rotura de los materiales se produce tras un proceso de propagación estable de fisuras por fatiga, no habiéndose registrado en esta ocasión elevadas temperaturas en el seno de los mismos.

La adición de fibras a los polímeros introduce significativas mejoras en sus propiedades mecánicas principalmente, de tal forma que los valores de resistencia mecánica y rigidez se ven claramente incrementados, con relación a los correspondientes a los del polímero sin reforzar. En los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras, la pérdida de adherencia entre la matriz y el refuerzo ocurre tras un número pequeño de ciclos incluso a un modesto nivel de tensiones.

En la figura 5-2 se ilustra la secuencia de daño de un polímero reforzado, que tiene lugar durante su fatiga hasta el momento de la rotura. Esta secuencia consta de tres etapas que se producen de forma sucesiva: inicialmente se produce el despegue de las fibras con respecto de la matriz, a continuación, se produce la figuración del material y por último la rotura.



**Figura 5-2:** Evolución del daño en fatiga

**Fuente:** Comportamiento en fatiga de Poliamidas Reforzadas con fibra de vidrio corta, Casado del Prado J.A 2001.

## 2.7. Fatiga por fallo mecánico.

Aunque no se generen las condiciones que evitan los fallos en fatiga de los materiales poliméricos causados por su ablandamiento térmico, se puede producir un proceso de fatiga mecánica convencional con debilitamiento progresivo del material y su posterior rotura debido a la propagación de fisuras o defectos inherentes del mismo. Por lo general las fisuras se propagan de manera estable a lo largo de la sección normal a la sollicitación impuesta, aumentando paulatinamente los esfuerzos locales y globales netos aplicados hasta alcanzar la resistencia del material, lo que con lleva a su rotura brusca.

Una frecuencia de aplicación de esfuerzos alternos suficientemente baja sobre un polímero puede establecer su modo de rotura por fatiga puramente mecánica. (Casado del Prado, 2001)

Por lo tanto, para una variación tensional dada, una frecuencia de oscilación de carga elevada puede producir fuertes incrementos de temperatura en el polímero, erigiéndose, en este caso, el mecanismo de fallo térmico como el causante principal de la rotura. Sin embargo, cuando la frecuencia de la sollicitación es baja, los incrementos térmicos son menores y los mecanismos que producen el fallo del material son los de fatiga y fluencia acoplados, que dan lugar a una rotura por fatiga de tipo mecánica. En este caso, el peso de la fluencia es mayor conforme decrece la frecuencia. (Casado del Prado, 2001)

## 2.8. Mecanismos de fallo por fatiga de los materiales poliméricos.

### 2.8.1. Comportamiento macroscópico.

La fatiga en diversos polímeros de ingeniería fue analizada por Herman y sus colaboradores en 1990. Las muestras poliméricas ensayadas presentaron roturas debidas a fallos térmicos cuando fueron sometidas a fuertes niveles tensionales al provocar un elevado calentamiento de histéresis.

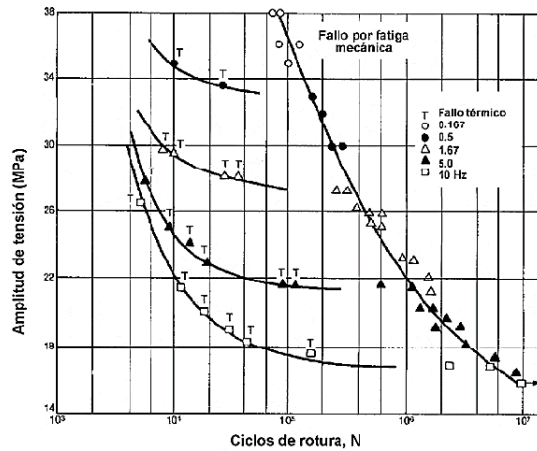
Asimismo, estudios realizados por Pétrault en 1993 acerca del comportamiento en fatiga sobre la poliamida (PA) ponen de manifiesto un fuerte calentamiento térmico de histéresis, cuyos efectos son gobernados por la amplitud de las tensiones impuestas y por la frecuencia a la que son aplicadas. La rotura obtenida puede considerarse, por lo tanto, de origen termodinámico. (Casado del Prado, 2001)

Al programar el número de ciclos de carga variable aplicados sobre un material polimérico, la temperatura aumenta y se acerca a una crítica de ablandado, característica de cada polímero termoplástico. Estas condiciones, que se pueden lograr a partir de un determinado nivel de rendimiento, dependiendo de la frecuencia utilizada, el material se vuelve más débil y más húmedo, solicitando la aplicación aplicada a la resistencia del material y produciendo ruptura. (Casado del Prado, 2001)

Sin embargo, si la aplicación aplica los núcleos inferiores, la rotación de los materiales producirá un proceso de propagación estable de pequeñas fisuras por fatiga, no se registrará elevadas temperaturas en el seno de los mismos. Además, dependiendo de la amplitud de la tensión y la frecuencia de la aplicación de la tensión, la caída por fatiga de los algodones poliméricos se ha descrito en varios videos: Falla por fatiga térmica y Falla por fatiga mecánica. La primera línea contiene un recurso térmico en el material fluye con facilidad que precede a la propagación de la fisioterapia que conduce a la falla. (Casado del Prado, 2001).

Este mecanismo requiere la aplicación de grandes amplitudes de tensión en un rango particular de frecuencias. A más baja amplitud de tensiones, en la segunda vía, se observa una propagación de la fisura por fatiga convencional. Al disminuir la frecuencia de la sollicitación de esfuerzos se produce una mayor tendencia a la rotura por fatiga mediante la propagación de fisura convencional aún a elevados niveles tensionales. (Casado del Prado, 2001).

De esta forma, cada material va a establecer unos rangos de variación de los parámetros frecuencia y amplitud de carga en los que se establecen por separado cada uno de los dos mecanismos de rotura por fatiga descritos. El efecto de ambos parámetros, amplitud de tensión y frecuencia en el tipo de rotura, para el POM (poli acetal), se muestra en la Figura 6-2. En ella se observa cómo a una frecuencia dada, por encima de una amplitud de tensiones crítica, se produce la rotura térmica. Esta amplitud crítica aumenta a medida que disminuye la frecuencia. (Casado del Prado, 2001)



**Figura 6-2:** Comportamiento en fatiga del POM.

**Fuente:** Comportamiento en fatiga de Poliámidas Reforzadas con fibra de vidrio corta, Casado del Prado J.A 2001.

### 2.8.2. Comportamiento Microscópico.

Lang en 1987 y Karbhari en 1989 describieron los mecanismos de fallo producidos en materiales de matriz polimérica. Para ello realizaron ensayos a tracción y de fatiga en tracción, la secuencia que establece el mecanismo de fallo de estos materiales compuestos es la que se describe a continuación.

- Inicio de fisuración.
- Crecimiento estable.
- Crecimiento inestable y rotura.

Independientemente de donde se produzca primero la pérdida local de adherencia, el proceso de la fatiga continuada provoca la propagación de micro fisuras de cizalla a lo largo de la interfaz fibra-matriz que debilita su unión y favorece la separación entre el refuerzo y la matriz. Los ensayos estáticos de tensión y de compresión son los más realizados, además de ser los más simples de todos los ensayos mecánicos. Estos ensayos implican la normalización de las probetas con respecto a tamaño, forma, método de preparación y la de los procedimientos de ensayo. (Casado del Prado, 2001).

## 2.9. Alternativas para las diversas máquinas de ensayos de fatiga mecánica.

### 2.9.1. Ensayo de fatiga con máquina prototipo viga en voladizo.

Este prototipo funciona con un motor monofásico que hace rotar una probeta cilíndrica aproximadamente a 1800 rpm y al mismo tiempo un contador simple almacena el número de ciclos que giró el espécimen. La carga para el ensayo se la aplica en el centro del espécimen, la misma se la puede observar en la figura 7-2, el momento falla, el sensor que cuenta los ciclos de la máquina apaga el sistema y hace que los pesos descendan. (Alvarracín, Córdova, Jhon Stalin, and Hermán Patricio Loayza Hidalgo, 2010)

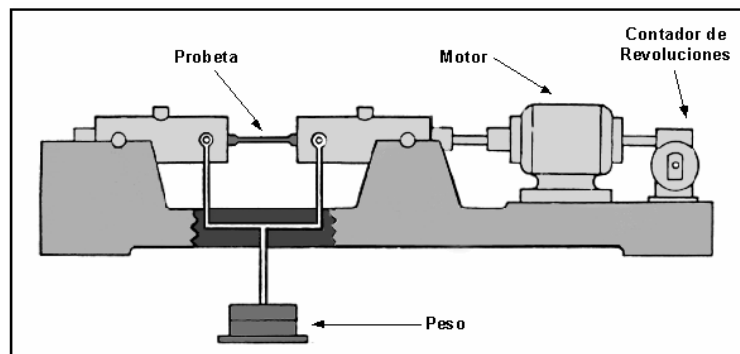


**Figura 7-2:** Máquina para ensayos de fatiga con probeta en voladizo.

**Fuente:** Máquinas para ensayos de fatiga, Ficha Técnica N° FT01, Grupo Iberisa (2000).

### 2.9.2. Ensayo de fatiga con máquina tipo R.R. Moore.

El prototipo denominado R.R. Moore (Figura 8-2), en honor a su creador, permite ejecutar una probeta de ensayo a fatiga por flexión rotativa con momento constante en la parte central, la cual esta sujeta a un peso. La probeta se somete a flexión pura y los esfuerzos actuantes en las fibras del material bajo el eje neutro son invertidos desde la tensión a compresión y viceversa, esto ocurre cada medio ciclo de la probeta. Este prototipo además posee un cuentarrevoluciones que permite conocer registrar los ciclos cumplidos. (Alvarracín, Córdova, Jhon Stalin, and Hermán Patricio Loayza Hidalgo, 2010)



**Figura 8-2:** Máquina para ensayo a fatiga mecánica tipo R.R Moore

**Fuente:** Ficha Técnica N° FT01, Grupo Iberisa (2000). Máquinas para análisis de fatiga.

Ventajas de la aplicación:

- Bajo costo de los elementos para la construcción
- Utiliza pocos elementos mecánicos
- Hay una mayor facilidad y rapidez en la construcción.
- Mayor facilidad en la calibración
- Versatilidad
- Fácil montaje
- Facilidad en la operación

- Se puede instalar un sistema de apagado automático
- Máquina pequeña

### 2.9.3. Ensayo de fatiga con máquina automatizada tipo FATIMAT.



**Figura 9-2:** Prototipo para ensayo de fatiga automatizada tipo FATIMAT

**Fuente:** Ficha Técnica N° FT01, Grupo Iberisa (2000). Máquinas para análisis de fatiga

La máquina FATIMAT (figura 9-2), se caracteriza por utilizar software de código abierto que está basado en el análisis de Weibull y es creada debido a la necesidad cada vez mayor de crear productos más fuertes, ligeros y económicos. Este prototipo está equipado con válvulas servo neumáticas y actuadores electromecánicos de alta precisión, siendo éstas una de las alternativas más baratas a comparación de los prototipos para ensayos de fatiga mecánica con características servo-hidráulicas, ya que su sistema operativo es ampliamente manejado en la actualidad para el análisis de datos ya que dicho análisis puede predecir un fallo en el futuro cercano de un material. (Borja y Tapia, 2017, p.21).

### 2.9.4. Análisis de la casa de la calidad.

**Tabla 2-2:** Requerimientos establecidos para la elaboración de la casa de calidad

Voz del usuario	Voz del ingeniero
Capacidad de soporte hasta 100kg	Dimensiones de la estructura metálica
Tiempo de operación largo	Vida útil de la máquina
Facilidades en la operación de la máquina	Interfaz de máquina - usuario
Bajo precio en la máquina	Límite de costo final de la máquina
Bajo precio en los repuestos	Límite de costo en repuestos
Seguridad ante falencias	Mantenimiento preventivo indicativo
Seguridad al usuario	Protección de componentes
Que sea silencioso	Nivel de decibeles de ruido
Que sea rígido y no se afecte por la vibración	Acoplamiento y límite de peso
Que tenga un pequeño tamaño	Material de composición
Que tenga un peso ligero	Material de composición
Que posea una buena alineación	Panel de control y accionamiento
Que posea una belleza visual	Aspecto y acabado superficial final

**Realizado por:** Luis Castagneto; 2019.

#### *2.9.4.1. Competencias de la casa de calidad.*

Revisando el mercado local, regional y nacional no encontramos fabricantes de máquinas de para ensayo de fatiga mecánica en polímeros, más a su vez en el mercado internacional como México e Inglaterra, existen varias fábricas que se dedican al diseño y construcción de estos equipos, así encontramos algunas máquinas de fatiga y basándonos en una de ellas procedemos a .se logró encontrar un fabricante que construye máquinas para ensayos de fatiga en polímeros, pero a un costo elevado.

- Rotating Fatigue Machine SM1090
- Máquina de fatiga a flexión rotativa modelo RFB-200-500

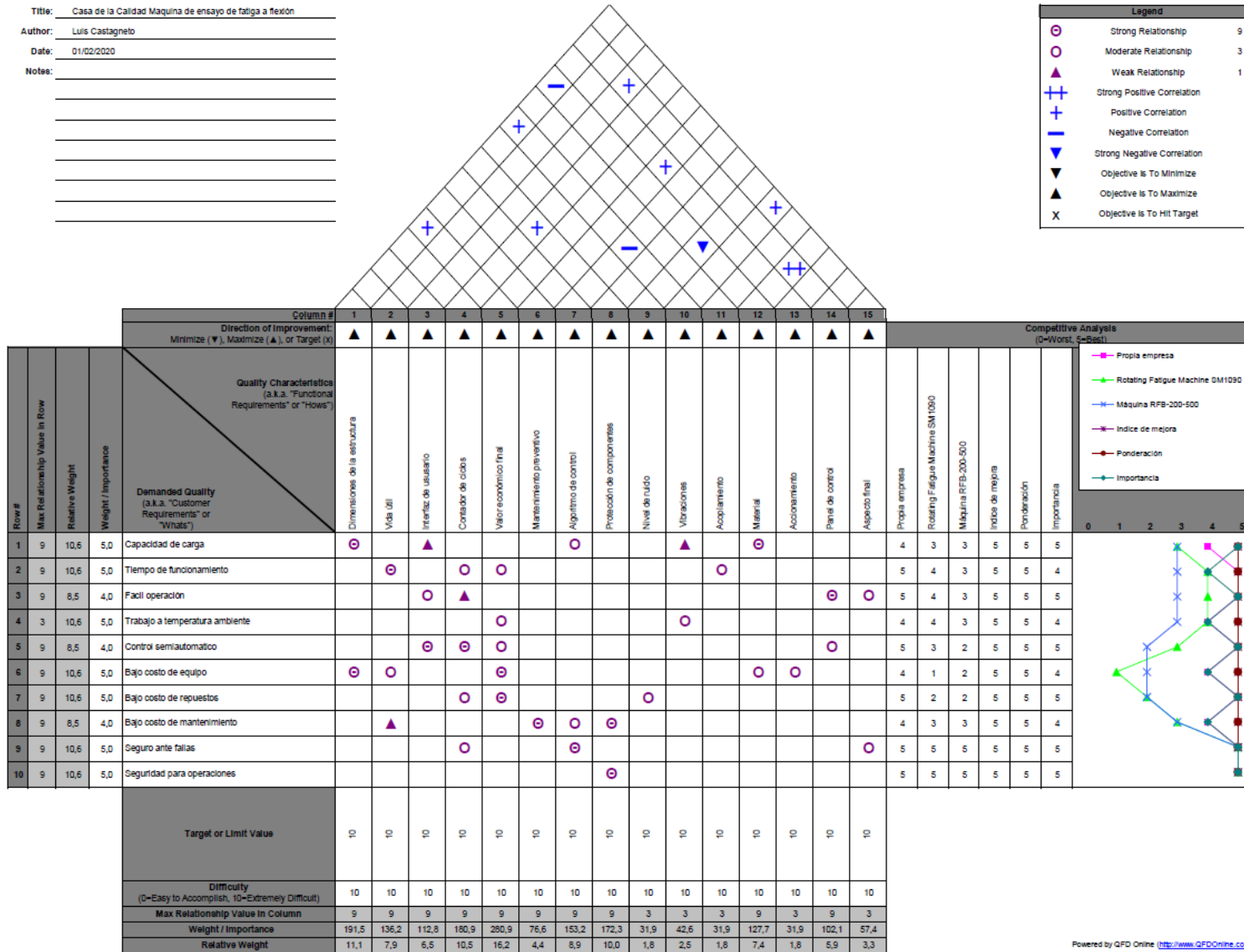
Cabe recalcar que para nuestro proyecto nos basaremos en una máquina para ensayo de fatiga en materiales ferrosos y la adaptaremos a probetas impresas en 3D a base de polímeros.



2.9.5. Casa de la calidad

**Tabla 3-2:** Casa de la calidad

Title: Casa de la Calidad Maquina de ensayo de fatiga a flexion  
 Author: Luis Castagneto  
 Date: 01/02/2020  
 Notes:



Realizado por: Luis Castagneto; 2019.

## 2.10. Sistema Eléctrico.

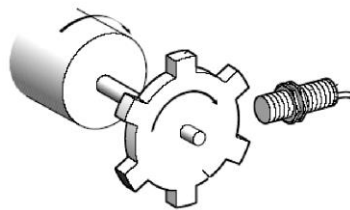
Un sistema eléctrico, dentro del contexto de una máquina es una red de conductores y equipos diseñados para transportar, distribuir y convertir energía eléctrica de manera segura desde el punto de entrega o generación a las diversas cargas alrededor del circuito que consumen la energía eléctrica.

### 2.10.1. *Sensores comunes actuantes en máquinas de fatiga mecánica.*

En algunos prototipos se utilizan diversos sensores que son comunes para el ensayo de fatiga mecánica, el número de ciclos que gira el eje sometido a la carga es la característica más importante para poder ejecutar el ensayo, los sensores implementados en este tipo de aplicaciones o ensayos tienen diferentes principios de funcionamiento. Se pueden encontrar sensores tipo generadores de señales, así como también sensores optoacopladores, además de los sensores de reluctancia variable, etc. Para tener el botón de parada de emergencia se instalan sensores de proximidad o a su vez finales de carrera. (Robertson, A., Newport, A. J, 1927)

#### 2.10.1.1. *Sensores inductivos de reluctancia variable (Sensor VR).*

Es un transductor que se compone de un cilindro metálico que mide los cambios en la reluctancia magnética y se presenta a manera de tornillo, un diagrama general se puede apreciar en la Figura 10-2.



**Figura 10-2:** Diagrama de sensor de reluctancia variable.

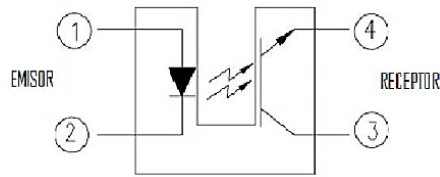
Fuente: (Ewing, P. D., Williams, J. G, 1974)

Cuando se combina en un circuito electrónico se determina que el paso de un objeto metálico produce una deformación en el campo magnético que fue generado por el imán permanente, de esta manera se induce un voltaje en la bobina que está rodeando al imán del circuito. La magnitud de este voltaje depende de la velocidad con que el objeto metálico pase frente del imán permanente, a este tipo de sensores se los emplea en aplicaciones de registro de velocidad y como contadores de paso. (Ewing, P. D., Williams, J. G, 1974).

#### 2.10.1.2. *Opto interruptores – optoacopladores.*

Los opto interruptores u opto acopladores se los utiliza como sensores de dirección por su propiedad característica de ser dispositivos ópticos que tienen en su interior un único par de terminales emisor y receptor además tiene varios agujeros que permiten o cortan el paso de los rayos infrarrojos entre los terminales receptor y emisor. El modelo de opto interruptor acoplador

se escogerá en función de la necesidad de manejar corrientes además de que exista disponibilidad comercial (Figura 11-2). (Ewing, P. D., Williams, J. G, 1974)

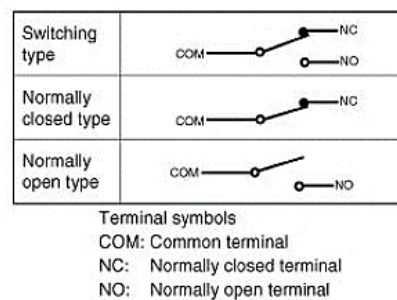


**Figura 11-2:** Diagrama de constitución general de un opto interruptor – acoplador.

**Fuente:** (Ewing, P. D., Williams, J. G, 1974)

### 2.10.1.3. Interruptores finales de carrera o de posición.

Son elementos actuadores o de contacto de conmutación, también se lo conoce como interruptor de límite, normalmente están provistos de muelles, detectan la posición de un elemento móvil, mediante accionamiento mecánico. Es muy común su utilización en la industria ya que permite detectar la llegada de un elemento móvil a una posición determinada. Internamente tienen contactos que pueden ser normalmente cerrados (NC) o normalmente abiertos (NO), la utilización de estos contactos se la realizara en el diagrama cuya simbología se puede apreciar en la figura 12-2, y esta dependerá de la aplicación que se esté realizando. (Ewing, P. D., Williams, J. G, 1974)



**Figura 12-2:** Símbolos generales utilizados en interruptores finales de carrera

**Fuente:** (Ewing, P. D., Williams, J. G, 1974)

Los interruptores denominados final de carrera detectan la posición de algún elemento móvil, mediante un accionamiento mecánico ya que es su principal característica ya que genera la señal eléctrica de salida. En el mercado hay varios tipos de ejemplos disponibles como se pueden ver en la Figura 13-2, por ejemplo, sensor de pulsador, sensor de lengüeta, sensor palanca metálica con muelle, final de carrera en bisagra o sensor con palanca y rodillo, etc. (Ewing, P. D., Williams, J. G, 1974)

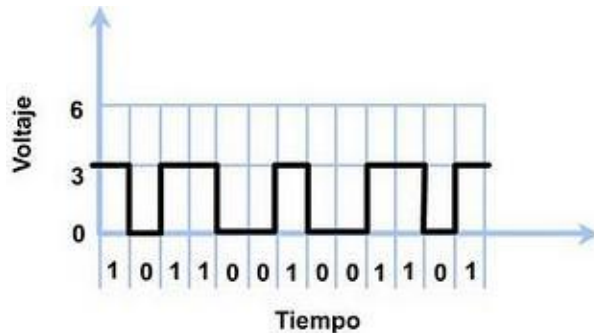


**Figura 13-2:** Varios tipos de interruptores finales de carrera.

Fuente: (Ewing, P. D., Williams, J. G, 1974)

2.10.1.4. *Instrumentos para la recopilación de datos.*

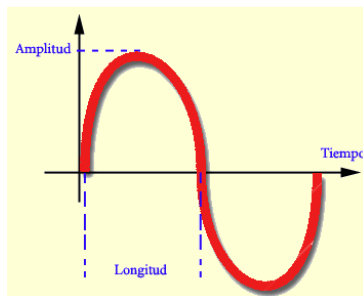
Los instrumentos para la recopilación de datos nos sirven para obtener la información que se genera en un proceso, la información puede ser recopilada en forma analógica o digital. Las señales digitales son aquellas que pueden tomar un cierto número de valores en un intervalo de tiempo. En el presente ejemplo se aprecia una señal digital que se mantiene constante en el valor de 3 Voltios por un determinado tiempo y la cantidad de 0 Voltios por otro período de tiempo, como se observa en la Figura 14-2. (Ewing, P. D., Williams, J. G, 1974)



**Figura 14-2:** Esquema de datos de señal digital recopilada.

Fuente: (Ewing, P. D., Williams, J. G, 1974)

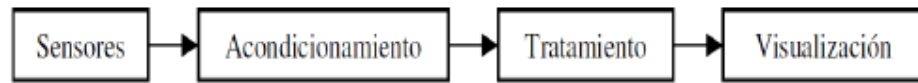
Una señal analógica es un tipo de señal generada es función del tiempo en donde no se pueden determinar puntos de discontinuidad como se observa en la Figura 15-2, y se las obtiene de sensores que transforman la energía en forma de posición, presión o temperatura en voltaje.



**Figura 15-2:** Esquema de datos de señal analógica recopilada.

Fuente: (Ewing, P. D., Williams, J. G, 1974)

Generalmente los diferentes sistemas para la recopilación de datos presentan las siguientes etapas descritas en la Figura 16-2.



**Figura 16-2:** Proceso de las etapas de recopilación de datos.

Fuente: (Ewing, P. D., Williams, J. G, 1974)

#### 2.10.1.5. Detectores, transductores y sensores.

Un sensor o detector es un elemento que transforma cualquiera de las propiedades físicas en una señal eléctrica que puede ser medible instrumentalmente. La capacidad que tiene un sistema para la recopilación de información que permitirá medir los distintos fenómenos o propiedades en estudio dependen principalmente de los transductores que se encargan de convertir las señales recibidas de los fenómenos físicos a datos comprobables por hardware, existen en el mercado transductores utilizados en la medida de presión, temperatura o flujo. (Ewing, P. D., Williams, J. G, 1974)

#### 2.10.1.6. Circuitos de acondicionamiento de señales.

Dentro del proceso de adquisición de datos tenemos los circuitos de acondicionamiento de señales que permiten mejorar la calidad de la señal generada por el transductor antes de que pueda ser convertida en digital, se debe tomar en cuenta que en ocasiones no es necesario realizar el acondicionamiento de señal esto siempre y cuando la variable a medir nos permita una facilidad para el acoplamiento a los convertidores implementados en el circuito. Hay diferentes etapas en el circuito de acondicionamiento de señal y estos pueden ser: (Ewing, P. D., Williams, J. G, 1974)

- Amplificación de señal.
- Excitación de señal.
- Filtrado de señal.
- Multiplexado de señal.

#### 2.10.1.7. Convertidores de señal

Durante esta etapa se analiza que la señal recibida debe ser sometida a los diferentes tipos de convertidores ya sean estos; analógicos – digital o a su vez digital - analógico, para de esta forma procesar la información recopilada en un software. (Ewing, P. D., Williams, J. G, 1974)

### 2.10.2. *Sensores tradicionales en máquina para ensayos de fatiga.*

Los sensores con mayor frecuencia utilizados en las máquinas para ensayos de fatiga, para determinar el número de ciclos de la probeta ensayada se encuentran sensor encoder, sensor inductivo, entre otros. (Ewing, P. D., Williams, J. G, 1974)

#### 2.10.2.1. *Sensor encoder*

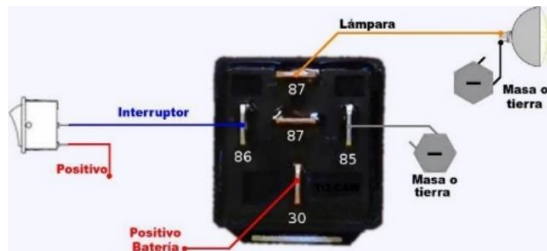
Un sensor encoder se lo define como un transductor rotativo que por medio de una señal digital convierte un movimiento angular en una serie de impulsos digitales como posición angular de un eje, velocidad y aceleración del rotor de un motor así de esta forma el encoder actúa como una interfaz entre un micro controlador y un dispositivo mecánico móvil. A estos dispositivos se los puede clasificar en rotativos y lineales y dentro de ellos también se los puede clasificar según su codificación almacenada que puede ser encoder de cuadratura, absolutos, incrementales, mono vuelta y multivuelta. Los diversos tipos de codificadores tienen el mismo alcance, pero la codificación que almacenan es relativamente útil únicamente desde el punto de inicio que se pre definió. (León y Tapia, 2009, p.26)

#### 2.10.2.2. *Acondicionamientos electrónicos mediante PLC.*

El Controlador Lógico Programable (PLC) es una computadora digital industrial que tiene varias salidas digitales, requiere de una etapa intermedia para su accionamiento debido a que no se conectan directamente al circuito de potencia ya que ha sido construido sólidamente, de ahí el uso de mandos como relés y contactores ya que se utilizan en aplicaciones donde se requiera el control de alta fiabilidad, ya que estos interruptores funcionan con accionamiento electromagnéticos que activan o desactivan un circuito eléctrico de potencia en el momento que se excita un electroimán. (Balcells y Romeral, 1997, p.136).

#### 2.10.2.3. *Relé*

Un relé es un dispositivo electromagnético que funciona accionando un electroimán, dicho dispositivo aísla el circuito de control con variaciones en los niveles de tensión y corriente bajos por medio de una bobina, similar aplicación que está presente en los módulos de salida de los controladores lógicos programables. (Figura 17-2). El relé está diseñado para trabajar en forma programada e independiente lo que nos brinda grandes ventajas para aplicaciones industriales y de docencia. (Salvador, M. D., Amigó, V., Sahuquillo, O., Antolinos, C. M., Segovia, F., Vicente, A., & Sanz, C, 2004).

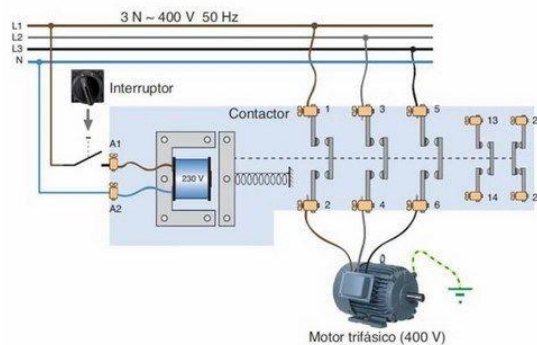


**Figura 17-2:** Esquema general de la conexión de un Relé

Fuente: (Salvador, M. D., Amigó, V., Sahuquillo, O., Antolinos, C. M., Segovia, F., Vicente, A., & Sanz, C, 2004)

#### 2.10.2.4. Contactor

El contactor es un dispositivo determinante que tiene como principal función habilitar o cerrar un flujo de corriente mediante un interruptor presente en el circuito, además que las propiedades que poseen los mismos son: pequeña resistencia al contacto, alta conductividad térmica y eléctrica, accionar cargas elevadas, alta resistencia a la erosión producida por el arco, débil tendencia al soldeo, elevada dureza, poca tendencia a formar sulfuros u óxidos y buena resistencia mecánica ya que poseen elevada resistencia eléctrica. (Figura 18-2). (Salvador, M. D., Amigó, V., Sahuquillo, O., Antolinos, C. M., Segovia, F., Vicente, A., & Sanz, C, 2004).

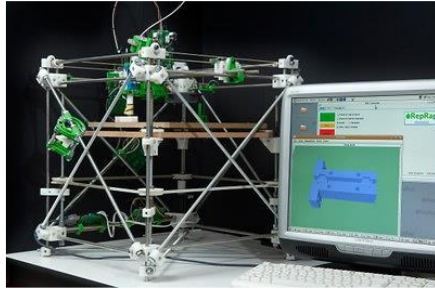


**Figura 18-2:** Esquema general del diagrama de contactores

Fuente: (Salvador, M. D., Amigó, V., Sahuquillo, O., Antolinos, C. M., Segovia, F., Vicente, A., & Sanz, C, 2004)

## 2.11. Sistemas de impresión 3D.

El proyecto Rep Rap comienza en el año 2005 de las manos del británico Adrián Bowyer, con la finalidad de la creación de una impresora 3D open source que tenga la opción de autorreplicarse, es decir que pudiera imprimirse a ella misma para fabricar otra impresora con las mismas o mejores prestaciones que la original, todas sus partes han sido seleccionadas para ser fabricados por materiales estándares que se encuentren disponibles a bajo costo en todo el mundo. La primera impresora construida en el año 2007, fue la Darwin, la misma que apreciamos en la figura 19-2; la cual fue la primera máquina de prototipado rápido, tiene una forma de cubo cuyas medidas son 500 mm por cada lado aproximadamente, a esta impresora le sigue la Mendel fabricada en octubre del 2009, y luego por la Prusa Mendel y Huxley en 2010, siendo las ultimas los modelos de impresoras con mayor presencia en el mercado. (Jones, 2011)



**Figura 19-2:** Primera impresora 3D construida en 2007 denominada Darwin.

**Fuente:** R. Jones, RepRap—the replicating rapid prototyper, *Robotica*, vol. 29, pp. 177-191, 2011.

Uno de los miembros del proyecto RepRap llamado Zach Smith ha creado un sitio web llamado Thingiverse en donde cualquiera puede subir y descargar diseños de manera gratuita para su posterior impresión por cualquier máquina de prototipado rápido, teniendo una amplia plataforma de objetos a imprimir de tal manera que esta tecnología se encuentre al alcance de muchas personas. (Jones, 2011)

Además de la plataforma Thingiverse se pueden nombrar páginas como Autodesk 123D, 3D CAD browser en donde no todos sus modelos son adecuados para la impresión a bajo costo, GrabCAD la cual es una plataforma de gran importancia teniendo piezas mecánicas perfectamente diseñadas, Shapeways donde incluso se puede pedir objetos impresos los cuales son enviados a un precio razonable y finalmente se pueden encontrar páginas como 3D warehouse, y 3Dvia que poseen diversos diseños los cuales tienen múltiples aplicaciones. (La revolución de la impresión 3D; el presente y el futuro de una máquina que puede crear (casi) cualquier cosa, 2015).

En el proyecto RepRap ocupa una tecnología de fabricación denominada FFF, la cual es el equivalente de la tecnología FDM, esto con el objetivo proporcionar una frase sin limitaciones legales para su uso, puesto que la abreviatura FDM es propiedad de Stratasys Inc (RepRap, 2018). Se calcula que en los próximos años las impresoras 3D dividirán la fusión del mundo real con el virtual, el impacto de la tecnología en los negocios y la aparición de la inteligencia colectiva; se piensa que antes del 2018, habrá un aumento imparable de las impresoras 3D que pueden llegar a ser un utensilio más de cualquier hogar (García, 2014).

Una impresora 3D es un dispositivo capaz de generar un objeto sólido tridimensional mediante la adición de material; los métodos de producción tradicionales son sustractivos, es decir, generan formas a partir de la eliminación de exceso de material. Un modelo es la representación digital de lo que vamos a imprimir mediante algún software de modelado (García, 2014).

Este aumento de la demanda se producirá mientras el mercado de impresoras relativamente asequibles vaya creciendo y su uso industrial se expanda. Aplicaciones industriales, de consumo

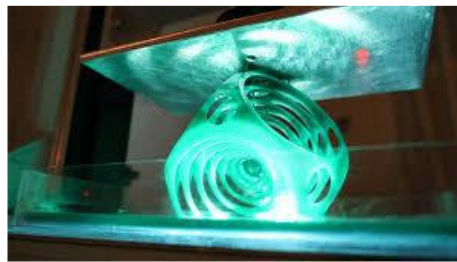


y biomédicas demostrarán que la impresión 3D puede reducir el coste y mejorar el diseño y la productividad de las empresas (García, 2014).

Los materiales que actualmente pueden utilizarse para imprimir son variados y lo cierto es que influyen bastante en el coste de la impresora. Cualquier impresora de bajo coste suele funcionar con termoplásticos como por ejemplo el PLA o ABS, pero nos encontramos impresoras capaces de trabajar con metal, fotopolímeros o resina líquida, aunque resultan prohibitivas para entornos no industriales y para distinguir diferentes gamas o tipos de impresoras 3D, lo hacemos principalmente en función a la tecnología que usan para llevar a cabo la impresión. Dividas en 4 sectores: (García, 2014).

#### 2.11.1. *Impresoras 3D por Estereolitografía (SLA).*

Esta técnica fue la primera en utilizarse, consiste en la aplicación de un haz de luz ultravioleta a una resina líquida (contenida en un cubo) sensible a la luz, la luz UV va solidificando la resina capa por capa, hasta que el objeto alcance la forma deseada, consiguiendo piezas de altísima calidad como se observa en la figura 20-2. (García, 2014).



**Figura 20-2:** Ejemplo de Impresión 3D por Estereolitografía.

**Fuente:** (Escobar, 2016).

#### 2.11.2. *Impresoras 3D de Sinterización Selectiva por Láser.*

También conocido en inglés como Selective Laser Sintering (SLS), esta tecnología emplea un láser para imprimir los objetos en 3D, pese a tener ciertas similitudes con la tecnología SLA, ésta permite utilizar un gran número de materiales en polvo (cerámica, cristal, nylon, poliestireno, etc.). El láser impacta en el polvo, funde el material y solidifica. Todo el material que no se utiliza se almacena en el mismo lugar donde inició la impresión por lo que, no se desperdicia nada. Con las dos últimas tecnologías se consigue una mayor precisión de las piezas impresas y mayor velocidad de impresión, como se observa en la figura 21-2. (García, 2014).



**Figura 21-2:** Ejemplo de Impresión 3D por Sinterización Selectiva por Láser.

**Fuente:** (García, 2014).

### 2.11.3. Impresoras 3D por Inyección.

Este sistema de impresión 3D es más parecido a una impresora de tinta en folio, pero en lugar de inyectar gotas de tinta en el papel, inyectan capas de fotopolímero líquido que se pueden curar en una bandeja de construcción, como se observa en la figura 22-2. (García, 2014).



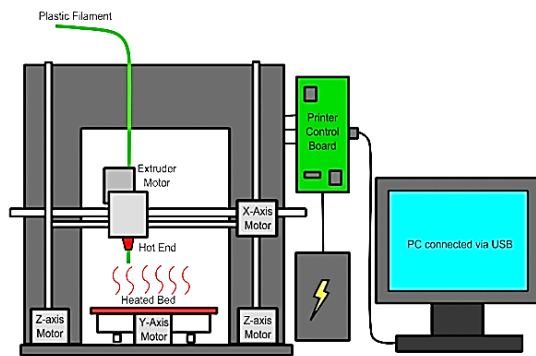
**Figura 22-2:** Ejemplo de Impresión 3D por Inyección.

**Fuente:** (García, 2014).

### 2.11.4. Tecnología FDM

La tecnología FDM o modelado por deposición fundida es un método de manufactura aditiva que consiste principalmente en el depósito capa a capa de material fundido sobre una superficie completamente plana el cual se mantiene en constante movimiento. A más de ello cuenta con un sistema de arrastre que permite al material ingresar con un flujo continuo de tal manera que no sea interrumpido la deposición capa a capa del material dentro del pieza producida.

El proceso de modelado por deposición fundida, deposita el material por capas para realizar el conformado de la pieza. El material o filamento utilizado que viene en una presentación en forma de rollos, el cual es introducido a un proceso de extrusión, donde es fundido por medio de un sistema calefactor, dependiendo del modelo de la impresora, el cabezal extrusor puede generar los tres movimientos “x”, “y”, “z” o puede ser alternado, pues el movimiento en el eje “y” es generado por la base calefactora donde se deposita el material y los ejes “x”, “z” los da el cabezal extrusor, por lo general los movimientos de “x”, “y”, “z” se los realiza por medio de motores de paso o servos motores. En la figura 23-2 se encuentra un esquema de la impresora 3D por deposición de hilo fundido.



**Figura 23-2:** Esquema de impresora 3D de modelado por deposición fundida (FDM).

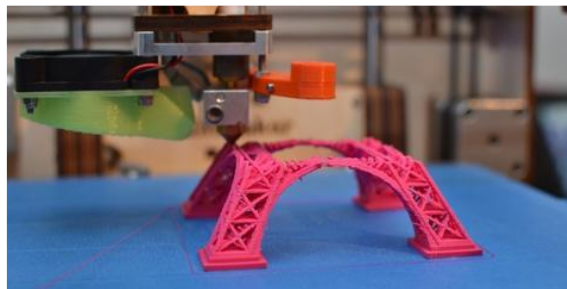
**Fuente:** (pice-software.com, 2018)

La principal ventaja de esta tecnología es que ha permitido poner a la impresión 3D al alcance de cualquier persona, debido a que la máquina no necesita un gran espacio físico y requiere una baja potencia, por lo que su instalación puede ser realizada en ambientes no industriales. (Jones, 2011). Las piezas obtenidas mediante este proceso pueden resistir calor, químicos, entornos húmedos y tensión mecánica, sin embargo, se debe acotar que la impresión de un objeto puede durar varias horas, dependiendo del tamaño, complejidad del modelo, tipo de maquinaria y el número de piezas a fabricarse simultáneamente. (C. E. Romero Barreno y G. O. Vaca Morales, 2015).

Es muy importante que el material se encuentre almacenado en lugares secos antes de ser extruido, esto con el fin de evitar que la humedad durante el proceso de extrusión forme burbujas en el material e impida la continuidad de la deposición. Con este tipo de tecnología se logra un bajo porcentaje de desperdicio de material y poca necesidad de limpieza. (Manufatura aditiva: desenvolvimento de uma máquina de prototipagem rápida baseada na tecnologia FDM (modelagem por fusão e deposição), 2017).

La principal ventaja de esta tecnología es que ha permitido poner a la impresión 3D al alcance de cualquier persona, debido a que la máquina no necesita un gran espacio físico y requiere una baja potencia, por lo que su instalación puede ser realizada en ambientes no industriales. (J. de Ciurana, L. Serenó, y È. Vallès., 2013). Las piezas obtenidas mediante este proceso pueden resistir calor, químicos, entornos húmedos y tensión mecánica, sin embargo, se debe acotar que la impresión de un objeto puede durar varias horas, dependiendo del tamaño, complejidad del modelo, tipo de maquinaria y el número de piezas a fabricarse simultáneamente. (C. E. Romero Barreno y G. O. Vaca Morales, 2015). Es muy importante que el material se encuentre almacenado en lugares secos antes de ser extruido, esto con el fin de evitar que la humedad durante el proceso de extrusión forme burbujas en el material e impida la continuidad de la deposición. Con este tipo de tecnología se logra un bajo porcentaje de desperdicio de material y poca necesidad de limpieza. (Manufatura aditiva: desenvolvimento de uma máquina de prototipagem rápida baseada na tecnologia FDM (modelagem por fusão e deposição), 2017).

La técnica aditiva del modelado por deposición fundida es una tecnología que consiste en depositar polímero fundido sobre una base plana, capa a capa. El material, que inicialmente se encuentra en estado sólido almacenado en rollos, se funde y es expulsado por la boquilla en minúsculos hilos que se van solidificando conforme van tomando la forma de cada a capa. Se trata de la técnica más común en cuanto a impresoras 3D de escritorio y usuarios domésticos se refiere. Aunque los resultados pueden ser muy buenos, no suelen ser comparables con los que ofrecen las impresoras 3D por SL y SLA, la ventaja principal es que esta tecnología ha permitido poner la impresión 3D al alcance de cualquier persona, como se observa en la figura 24-2. (Impresoras 3D El Futuro Hoy, 2014)



**Figura 24-2:** Ejemplo de Impresión 3D por deposición de material fundido.

**Fuente:** (Escobar, 2016)

Los campos de aplicación en la impresión 3D son extensos y van desde piezas de instrumental médico o incluso implantes, pasando por sus aplicaciones en la arquitectura, donde puede imprimirse objetos e incluso estructuras, aplicaciones aeroespaciales, educación, y por supuesto el uso doméstico y semi profesional que abre múltiples opciones y se presenta como el futuro de la tecnología. (Impresoras 3D El Futuro Hoy, 2014).

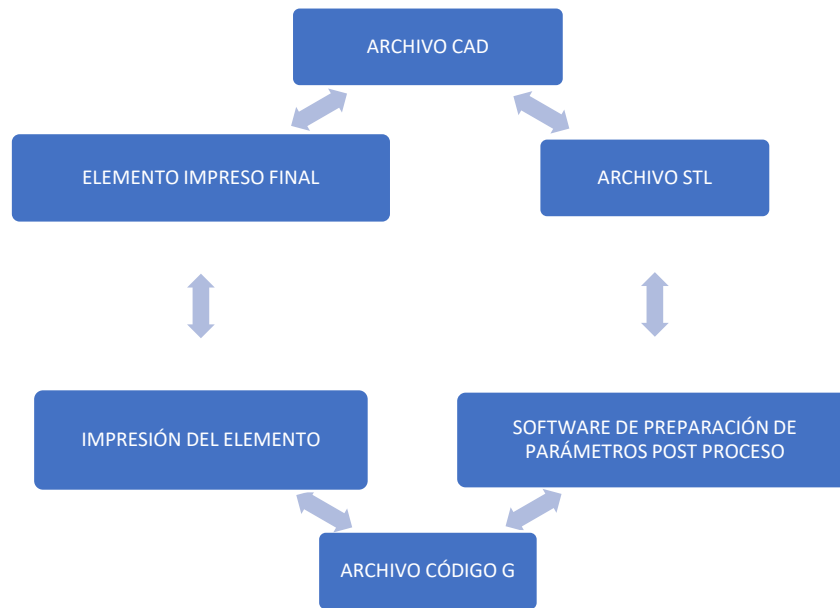
### *2.12. Proceso de impresión.*

La fabricación aditiva consiste en la fabricación de objetos 3D a partir de un modelo digital (CAD). Esto es lo contrario de los procesos tradicionales de fabricación, que producen objetos partiendo de un bloque para crear la forma deseada (Carpio, 2015). Los procesos de fabricación aditiva surgen primero con el nombre de prototipado Rápido (RP), ya que primero se concibió esta tecnología con el único objetivo de construir prototipos, es decir, piezas que sirvan para validar o verificar un nuevo diseño, para que posteriormente se lleven a producción con tecnología no aditiva, como inyección o mecanizado (Ciurana J, Serenóa L & Vallès È, 2013).

La descripción del proceso de la impresión 3D en primer paso se basa en planos virtuales de las piezas a imprimir utilizando el diseño asistido por ordenador (CAD). Los datos estándar de interfaz (extensión del archivo) entre el software CAD y la máquina de impresión, es archivo de extensión STL. Un archivo STL es un formato de malla triangular que ayudan a mejorar calidad superficial del diseño 3D. Dicho archivo cuando se trata de impresoras low cost, es recuperado por medio de software de código abierto (open source), en el cual se realiza la división del modelo

en capas para la impresión 3D dependiendo de los parámetros deseados y determinar las trayectorias a base de código G (ISO), para a continuación proceder con el modelado en impresión 3D (Ciurana J, Serenóa L & Vallès È,2013).

Para el proceso de impresión es necesario cumplir ciertos pasos para llegar a tener un producto impreso similar al diseñado en el software 3D, para ello en la figura 25-2 se muestra los pasos esenciales a cumplir dentro de una impresión.



**Figura 25-2:** Proceso de impresión

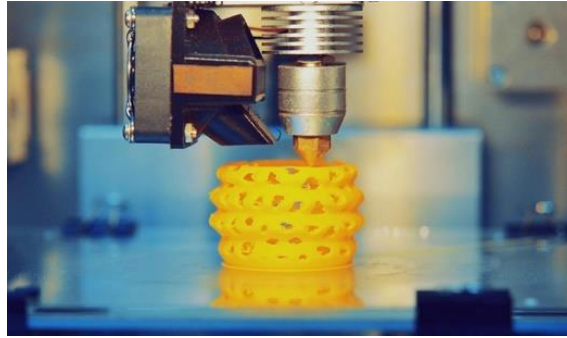
**Fuente:** (Simulación de termofluidos de PLA natural y ABS en el proceso de impresión en 3D, 2017)

El proceso de moldeado por deposición fundida (FDM) como se observa en la figura adjunta 26-2, utiliza el proceso aditivo de material, depositando el material por capas para realizar el conformado de la pieza. El material plástico (filamento) que se encuentra en rollos, es introducido a un proceso de extrusión, filamento semi-fundido a través de una boquilla calentada que eleva la temperatura del material a la temperatura de fusión, dependiendo del modelo de la impresora el cabezal extrusor puede dar los tres movimiento en x, y, z o son alternados, el movimiento en el eje "y" le da la base calefactada donde se deposita el material y en los ejes x, z los da el cabezal extrusor, por lo general los movimientos de x, y, z se los realiza por medio de motores de paso o servos motores. Luego de que el material semi-fundido es depositado sobre la mesa de trabajo calefactada a una temperatura menor dependiendo el material (Ciurana J, Serenóa L & Vallès È,2013).

Uno de los procesos más utilizados es el de impresión 3D FFS low cost (fabricación de filamento fundido a bajo costo), el cual nos permiten varias posibilidades de estudio de los parámetros que intervienen en el proceso de impresión 3D, tales como: velocidad de deposición, espesor de la capa, el tipo de boquilla adecuada para extrusionar el material (diámetro de la boquilla), distancia

existente entre la base de impresión con la punta de la boquilla y la velocidad de movimiento de la boquilla de extrusión (Ciurana J, Serenóa L & Vallès È,2013).

Todos estos parámetros dependen directamente del tipo de material a utilizar principalmente en el material se debe tener en cuenta la temperatura de extrusión y la temperatura de la base de impresión (Syed H. Masood, 1996).

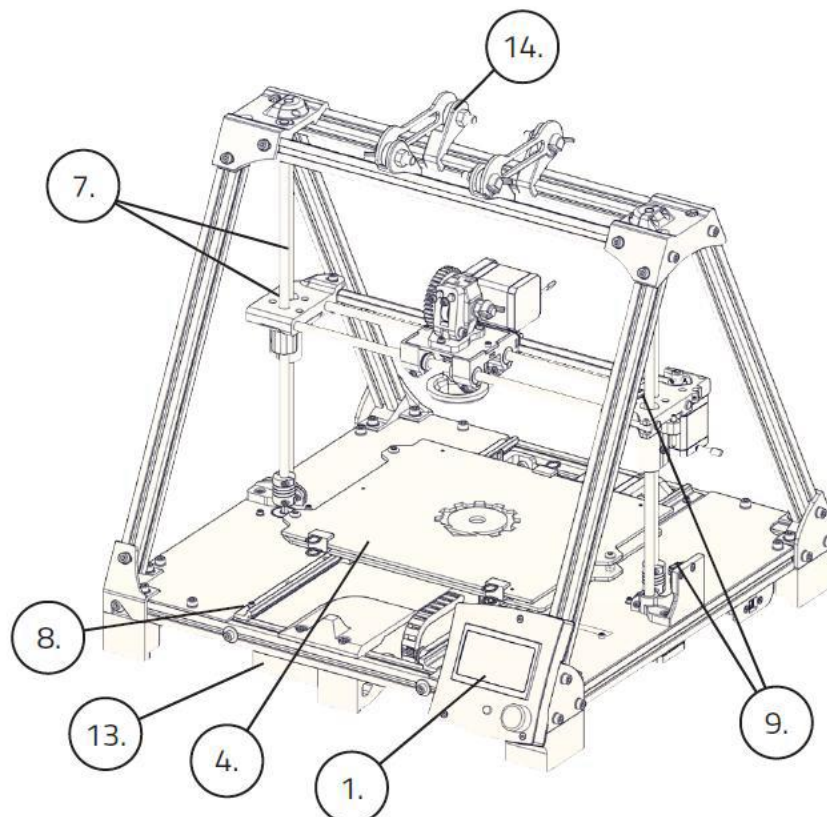


**Figura 26-2:** Esquema del proceso básico FDM.

Fuente: (itdevelopmedia.com, 2020)

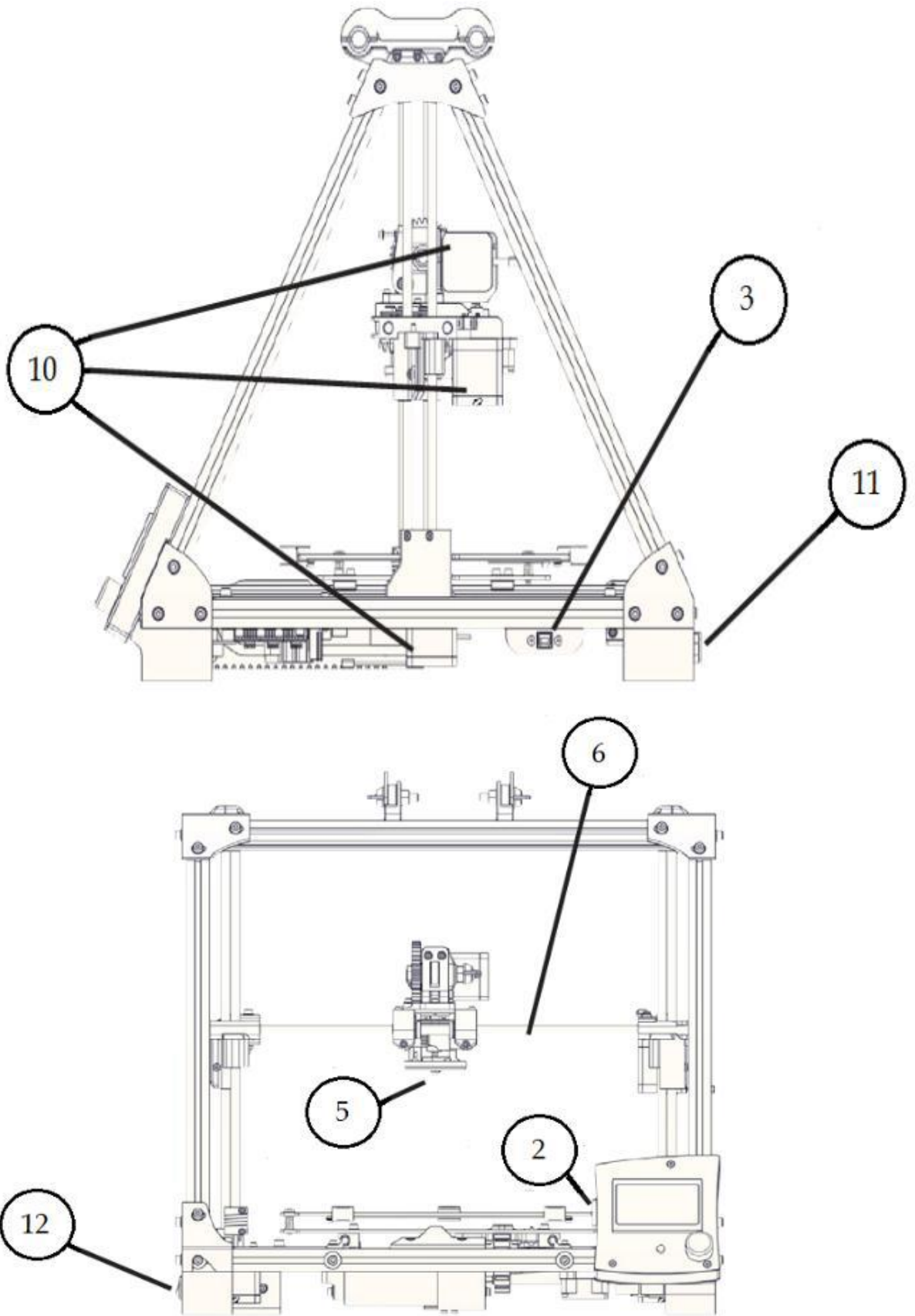
#### 2.12.1. Componentes de la impresora 3D con tecnología FDM

La impresora 3D con tecnología FDM posee varios componentes que se detallarán en la figura 27-2 y figura 28-2.



**Figura 27-2:** Impresora BCN3D+.

Fuente: (Technologies, 2019)



**Figura 28-2:** Impresora BCN3D+ vista lateral y frontal.

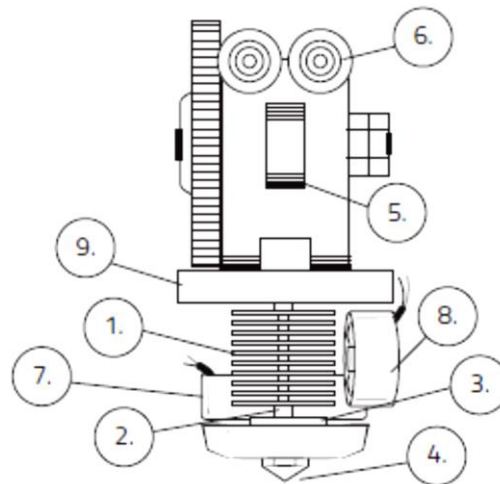
Fuente: (Technologies, 2019)

**Tabla 4-2:** Componentes de la impresora BCN3D+.

Ord.	Componente	Ord.	Componente
1	Pantalla LCD	8	Guías lineales eje Y
2	Ranura tarjeta SD	9	Finales de carrera mecánicos
3	Conector USB	10	Motores paso a paso
4	Hotend (base calefactora)	11	Toma de corriente
5	Hotend (Extrusor)	12	Botón de encendido
6	Guías eje X	13	Fuente de alimentación
7	Varillas roscadas y guías eje Z	14	Soporte de bobina

Fuente: (Technologies, 2019)

Como subconjunto principal se tiene el cabezal (Figura 29-2), el cual es el encargado de alimentar a la impresora con el material, en la tabla 5-2 se detallará los componentes del cabezal.



**Figura 29-2:** Cabezal de impresora BCN3D+.

Fuente: (Technologies, 2019)

**Tabla 5-2:** Componentes del cabezal de impresora BCN3D+.

N° Pieza	Elemento	N° Pieza	Elemento
1	Disipador de calor	2	Barrera térmica
3	Bloque calefactor	4	Boquilla (nozzle)
5	Balancín	6	Tornillo de apriete
7	Ventilador de capa	8	Ventilador Hotend
9	Carro eje X		

Fuente: (Technologies, 2019)

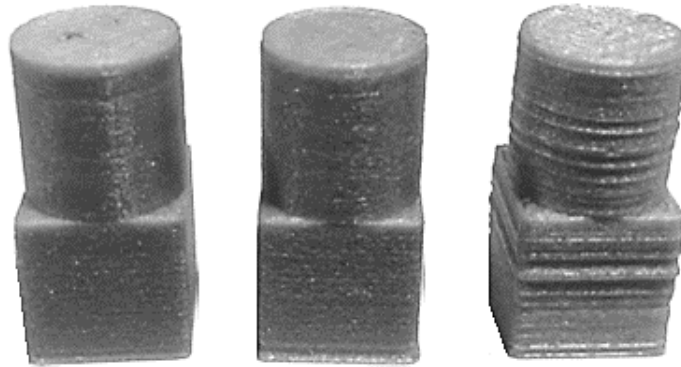
## 2.12.2. Parámetros involucrados en el proceso de impresión

### 2.12.2.1. Espesor de capa

Este parámetro de impresión, corresponde al grosor de cada capa de filamentos que deposita la boquilla extrusora. Este parámetro define la resolución en el eje Z, afectando directamente el



número de capas que compone al objeto impreso, el acabado o rugosidad que tendrá el objeto, como norma general cuanto mayor sea la altura de capa, menos calidad tendrá nuestra pieza, como se muestra en la figura 30-2. Dicho de otra manera, a menor altura de capa, mayor tiempo de impresión. (Caracterización de propiedades mecánicas de piezas en ABS en función de parámetros de proceso de Manufactura aditiva FDM, 2016)



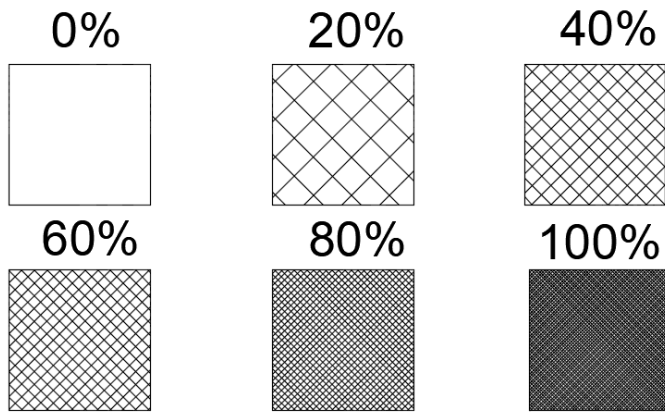
**Figura 30-2:** Influencia del espesor de capa en el acabado superficial.

Fuente: (FpvMax, 2017)

Hay que tener en cuenta que este parámetro debe estar relacionado con el diámetro de nuestra boquilla, si la altura de capa es menor que el 50%-60% del diámetro de la boquilla, la calidad de la pieza podría verse afectada. Con una capa de 0,3 mm, se encuentra las mejores propiedades mecánicas para impresión 3D. (Caracterización de propiedades mecánicas de piezas en ABS en función de parámetros de proceso de Manufactura aditiva FDM, 2016)

#### 2.12.2.2. Densidad de relleno.

Se puede definir como la cantidad de material colocado en estructura impresa, es decir no considera la porción de vacío. (Caracterización de propiedades mecánicas de piezas en ABS en función de parámetros de proceso de Manufactura aditiva FDM, 2016). La densidad de relleno se expresa en formato decimal, 0.1 para un 10% de relleno, 0.9 para un 90%. Es posible configurar el relleno al 0% (0), para realizar piezas huecas o modelos vacíos y también al 100% (1) para obtener piezas totalmente rellenas. A mayor porcentaje de relleno, mayor será la cantidad de material, por ende, mayor el tiempo de impresión (Estudio sobre la optimización de los parámetros de fabricación en una impresora 3D con tecnología FDM, 2017). En la figura 31-2 se encuentra una demostración de los diferentes porcentajes de relleno que pueden ser determinados.

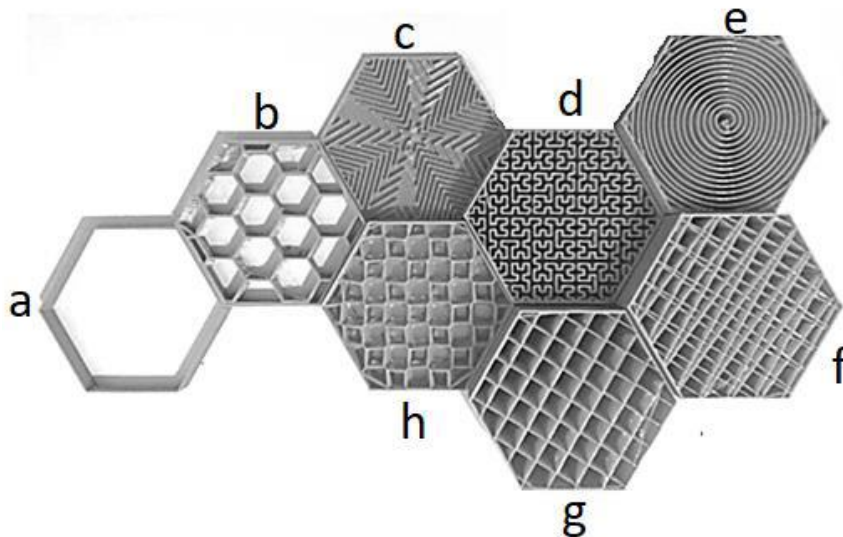


**Figura 31-2:** Representación del porcentaje de relleno que puede tener una pieza impresa.

Fuente: (FpvMax, 2017)

### 2.12.2.3. Patrón de relleno.

El patrón de relleno es el parámetro que define la estructura interna que deberá tener la pieza impresa en todas sus capas exceptuando la superior e inferior. Se puede elegir entre varias alternativas como pueden ser de tipo rectilíneos, panel de abeja, concéntrico, triangular, rectangular, etc. Con el fin de adaptarse de mejor manera a la pieza a imprimir. En la figura 32-2 se pueden observar varios patrones de relleno para ser utilizados por la tecnología FDM; a) Sin relleno, b) Honeycomb, c) Octaedro d) Hilbert e) Archi f) Line g) Grid h) Rectilíneo. (Impresoras 3D, Imprimalia 3D, 2018)



**Figura 32-2:** Diferentes patrones de relleno.

Fuente: (Trimaker, 2017)

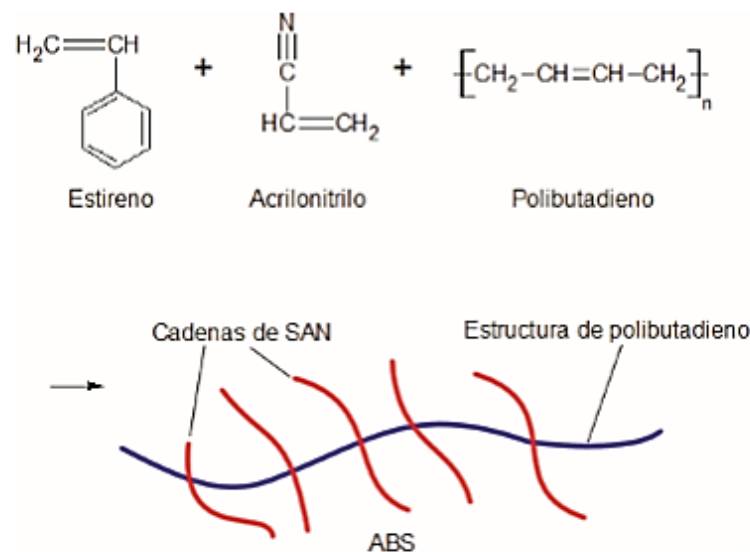
### 2.12.2.4. Materiales utilizados en la impresión 3D por FDM

Las impresoras 3D mediante modelado por deposición fundida utilizan rollos de filamento de polímeros termoplásticos que comercialmente tienen un diámetro de 1,75 mm a 3 mm que evita problemas de flujo de material y vienen en presentaciones de diferentes colores. Los materiales

que estudiaremos en el presente proyecto son: ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) y PLA (ácido Poliláctico), siendo los materiales que ocupan el 95% de trabajo en las diferentes impresoras 3D FDM (Impresoras 3D El Futuro Hoy, 2014); y que llegan a clasificarse en un fluido No Newtoniano independientes del tiempo. (Mott, 2006)

### 2.12.3. Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).

El Acrilonitrilo butadieno estireno es considerado como un termoplástico y se forma mediante la polimerización del estireno y acrilonitrilo en la presencia del polibutadieno, es decir es un copolímero, resultado de la combinación de los tres monómeros. Las porciones pueden variar del 15-35% de acrilonitrilo, 5-30% de butadieno y 40-60% de estireno. (Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS): Descripción, propiedades y aplicaciones, 2018) Cada monómero es un componente importante del ABS: el acrilonitrilo aporta resistencia a la temperatura, resistencia química y dureza superficial, mientras que le butadieno aporta fuerza y resistencia al impacto, y por último el estireno aporta procesabilidad y rigidez. (Escobar, 2016). En la figura 33-2 se encuentra la composición de la estructura del ABS.



**Figura 33-2:** Estructura del ABS.

**Fuente:** (Thermal degradation of polymeric materials, 2005)

El ABS es un material termoplástico amorfo, es decir que no tiene temperatura de fusión verdadera y esta se encuentra en un rango de 220 a 240°C, y cuenta con buenas propiedades mecánicas haciéndolo uno de los materiales más usados por la tecnología de manufactura aditiva FDM. (Caracterización de propiedades mecánicas de piezas en ABS en función de parámetros de proceso de Manufactura aditiva FDM, 2016). Es considerado un plástico de ingeniería, porque su elaboración y procesamiento es algo más complejo que en los plásticos comunes. Es un plástico muy resistente al impacto, utilizado especialmente en la industria de la automoción, pero en ocasiones también en la doméstica. (Escobar, 2016).

El ABS se originó por la necesidad de mejorar algunas propiedades del poliestireno de alto impacto. Para obtenerlo se mezclan emulsiones de dos polímeros, SAN y polibutadieno. La mezcla que se la realiza es coagulada para obtener ABS. (Thermal degradation of polymeric materials, 2005).

El producto comercial ABS se denomina “Fillamentum ABS Extrafill”, como se observa en la figura 34-2, es un material para la tecnología de impresión 3D FFF (también conocida como FDM). La ventaja de este material es que puede ser utilizado en impresoras 3D fácilmente, que permite una alta calidad de impresión, incluso en detalles difíciles y una excelente laminación del objeto impreso, los filamentos de impresión indicados en la marca comercial Fillamentum se producen en una gran variedad de colores de acuerdo con las tablas de colores RAL y Pantone, así como en sus propias gamas de colores únicos. En la tabla 3 se puede encontrar las propiedades mecánicas y físicas obtenidas del ABS. (Caracterización de propiedades mecánicas de piezas en ABS en función de parámetros de proceso de Manufactura aditiva FDM, 2016).

**Tabla 6-2:** Propiedades mecánicas y físicas del ABS.

<b>Propiedades mecánicas y físicas del ABS</b>	
Densidad	1.04 g/cm <sup>3</sup>
Alargamiento a la rotura	20%
Conductividad térmica	0.17w/mK
Módulo de tracción	60MPa
Módulo elástico	1.1 – 2.9 GPa
Coefficiente de Poisson	0,391 – 0,422
Resistencia mecánica a la compresión	31 – 86,2 MPa
Resistencia mecánica a la flexión	47,8 – 76 MPa
Resistencia mecánica a la tracción	27,6 – 55,2 MPa
Temperatura de transición vítrea	87,9 – 118 °C
Temperatura de fusión	200 – 245 °C
Temperatura de impresión	220-240°C

**Fuente:** (Fillamentum, 2013).



**Figura 34-2:** Carrete ABS Extrafill "Cobalt Blue".

**Fuente:** (Fillamentum, 2013).

#### 2.12.4. Ácido Poliláctico PLA

El Ácido Poliláctico es un biopolímero termoplástico cuya molécula precursora es el ácido láctico. Puede obtenerse por dos vías: la química o la biotecnológica. La producción química está basada en la reacción de acetaldehído con ácido cianhídrico para dar así lacto nitrilo, el cual se hidroliza para obtener ácido láctico. La parte biotecnológica está basada en la fermentación de sustratos ricos en carbohidratos por microorganismos. (L. Serna y F. Albán, 2011). El PLA puede ser degradado en dióxido de carbono y agua por la acción de hongos adecuados. (Jie Ren, 2011).

El PLA será utilizado por sus buenas propiedades y facilidades de procesamiento, tiene una amplia gama de aplicaciones tanto en la industria como en productos básicos: materiales de embalajes, envases desechables y PLA en fibras, que sirve como sustituto de fibras sintéticas y prendas de vestir tales como camisas, vestidos, ropa interior, etc. (Jie Ren, 2011).

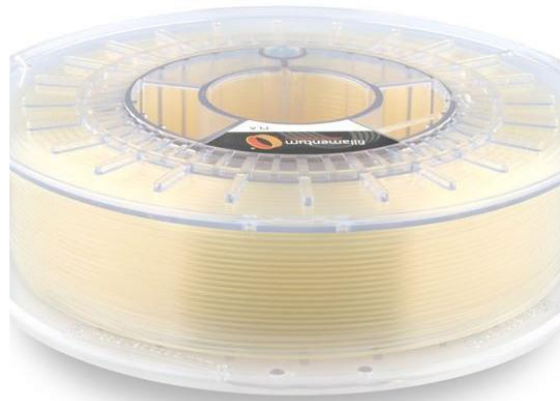
La biodegradación del PLA se basa en la presencia de microorganismos que colonizan la superficie del polímero y son capaces de segregar enzimas que rompen en pequeños fragmentos el polímero; la colonización de la superficie depende de factores tales como la tensión superficial, porosidad, textura superficial y accesibilidad a las cadenas de polímeros. (L. Serna y F. Albán, 2011).

El PLA como polímero, ofrece numerosas propiedades tanto mecánicas como químicas; principalmente destacamos su biocompatibilidad y las buenas propiedades de barrera que posee. (R. A. Auras, L.-T. Lim, S. E. Selke, y H. Tsuji, 2011). El producto PLA comercialmente se denomina “Fillamentum PLA Extrafill” como se observa en la figura 35-2, es un material para la tecnología de impresión 3D FFF (también conocida como FDM). (Fillamentum, 2013). En la tabla 7-2 se encuentran las propiedades mecánicas y físicas del PLA.

**Tabla 7-2:** Propiedades mecánicas y físicas del PLA.

<b>Propiedades mecánicas y físicas del PLA</b>	
Densidad	1.24 g/cm <sup>3</sup>
Módulo elástico	3 – 4 GPa
Conductividad térmica	0.25 W/mK
Alargamiento a la rotura	100-160 %
Resistencia mecánica a la flexión	100 MPa
Módulo de tracción	3.31-3.86 GPa
Resistencia mecánica a la tracción	110-145 MPa
Temperatura de transición vítrea	60 – 70 °C
Temperatura de fusión	145-160 °C
Temperatura de impresión	170-185 °C

Fuente: (Fillamentum, 2013).



**Figura 35-2:** Carrete PLA Extrafill "Natural".

**Fuente:** (Fillamentum, 2013).

### **2.13. Ensayo de resistencia a la fatiga en Polímeros en laboratorios.**

Los polímeros pueden experimentar fallos por fatiga en condiciones de esfuerzos cíclicos. Del mismo modo que en los metales, la fatiga ocurre a esfuerzos relativamente pequeños comparados con el límite elástico. Los ensayos de fatiga de los polímeros no duran tanto como en los metales; sin embargo, la representación gráfica de los resultados obtenidos con ambos materiales tiene forma parecida. (Materiales reforzados de poliolefinas recicladas y nanofibras de celulosa de henequén, 2011).

Siguiendo la metodología establecida para los metales, el comportamiento en fatiga de los plásticos se ha estudiado a través de los mismos enfoques y de la misma manera se ha analizado la propagación de la grieta por fatiga. Al igual que en los metales la vida a fatiga de los polímeros se puede estructurar en dos etapas: iniciación de la grieta y propagación de la grieta. Dependiendo de la severidad de los defectos y heterogeneidades, la iniciación de la grieta puede comprender el 80% de la vida total. Adicionalmente la naturaleza de los polímeros da como resultado una alta histéresis mecánica y como consecuencia de su baja conductividad térmica se alcanza una fuerte influencia de la temperatura, dependiendo de la frecuencia de aplicación de carga y de la amplitud de la deformación. (Materiales reforzados de poliolefinas recicladas y nanofibras de celulosa de henequén, 2011).

Desde el punto de vista termodinámico, parte del trabajo mecánico, generado durante la carga cíclica, se emplea en procesos moleculares irreversibles, como micro huecos, crazing, etc., y otra parte muy importante de este trabajo mecánico se convierte en calor; un problema que complica al análisis de los datos de fatiga, particularmente para cargas con altas frecuencias. El mecanismo de propagación de grietas de fatiga frecuentemente inicia con la formación de grieta, que preceden a la iniciación y propagación de la grieta. Recientes experimentos llevados a cabo en policarbonato indican que el ablandamiento cíclico esta causado por un profundo crazing, antes

de la fractura y estos mismos estudios han demostrado en el HIPS (Poliestireno de alto impacto) que la vida a fatiga aumenta considerablemente como consecuencia de un crazing mucha más profundo a lo largo de la longitud de la grieta. (Casado del Prado, 2001)

Por lo tanto, el valor umbral  $\Delta K_{th}$ , que ilustra la iniciación de la grieta de fatiga, está predicho por la formación de micro huecos que terminan por iniciar la grieta propiamente dicha. A pesar de estas particularidades y diferencias con los metales, la propagación de grietas en fatiga se puede estudiar en bastantes casos mediante la ecuación de Paris, aunque en algunos polímeros como el PMMA se observa una falta de linealidad que, sin embargo, no invalida la aplicación de la ecuación de París para evaluar la resistencia relativa a la propagación de grietas en materiales poliméricos. (Materiales reforzados de poliolefinas recicladas y nanofibras de celulosa de henequén, 2011)

#### 2.14. Cálculo de vida de Fatiga

La simplicidad de la expresión de París permite obtener de una manera rápida una estimación de la vida de un componente frente a rotura por fatiga y adoptar, por tanto, este método en el diseño de elementos y componentes. La vida en fatiga o número de ciclos hasta rotura en un proceso de fatiga se puede obtener integrando la ecuación de París desde un valor de fisura inicial  $a_i$ ,  $a_f$  que son los valores iniciales y finales. (Fatigue in polymers, 1967)

$$\frac{da}{dN} = C(Y \cdot \Delta\sigma \sqrt{\pi a})^m \quad [1]$$

Si las cargas de fatiga presentan una amplitud constante y el factor geométrico Y permanece constante a lo largo de la propagación desde  $a_i$  hasta  $a_f$  y tanto  $a_i$  como  $\Delta\sigma$  son suficientes para que  $\Delta K$  supere un umbral del material para que haya fatiga  $\Delta K_{th}$ , la expresión se puede integrar del siguiente modo. (Fatigue in polymers, 1967)

$$CY^m(\Delta\sigma)^m \pi^{\frac{m}{2}} \int_0^{N_f} dN = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{a^{\frac{m}{2}}} \quad [2]$$

El número de ciclos de vida de fatiga será:

$$N_f = \frac{2}{(m-2)CY^m \Delta\sigma^m \pi^{\frac{m}{2}}} \left[ \frac{1}{a_i^{\frac{m-2}{2}}} - \frac{1}{a_f^{\frac{m-2}{2}}} \right] \quad [3]$$

Para  $m = 2$

$$N_f = \frac{2}{CY^2 \Delta\sigma^2 \pi} \ln \frac{a_f}{a_i} \quad [4]$$

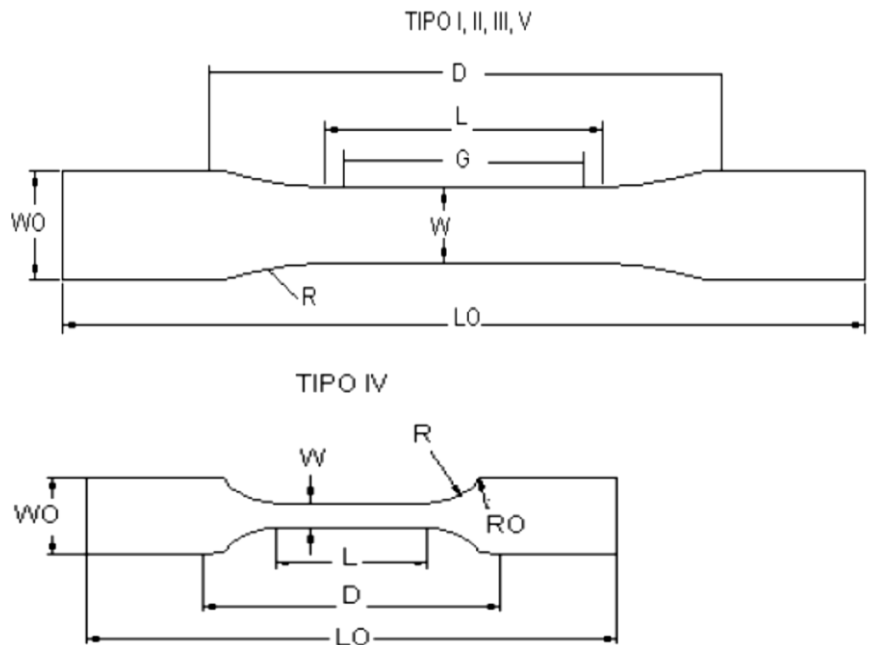
Y variará con el tamaño de la grieta, por tanto, la propagación se obtendrá por integración numérica de la expresión.

## 2.15. Normas para ensayos a fatiga y para probetas de polímeros.

ASTM es la normativa que ha sido desarrollada por la American Society for Testing and Materials (ASTM, de ahí la denominación) como estándar para la realización de ensayos de materiales estableciendo las condiciones y procedimientos más adecuados para la obtención de buenos resultados. La mencionada normativa indica las dimensiones admisibles en las probetas, el procedimiento correcto de ensayo y los instrumentos de medida que se han de utilizar, así como el tratamiento de datos que debe realizarse. (Fatigue in polymers, 1967)

### 2.15.1. Clases de probetas para polímeros según norma ASTM

Según la norma ASTM (Standard test Method for Tensile Properties of Plastic) existen cinco tipos de probetas, como se observa en la figura 36-2, las cuales tienen características diferentes en sus dimensiones y cada tipo depende del material del que son fabricadas, las probetas tipo I, II, III, IV, V se pueden fabricar en polímeros rígidos y semirrígidos, además las probetas III y IV también se pueden fabricar de polímeros no rígidos, a continuación se presentara los tipos y dimensiones que ostentaran cada una de las probetas. (Fatigue in polymers, 1967).



**Figura 36-2:** Clases de probetas para ensayos en polímeros.

**Fuente:** Tesis Diseño Mecánico de una máquina universal para Ensayos de polímeros; pág.21

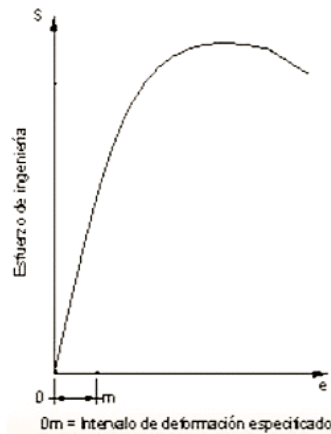
### 2.15.2. Resistencia a la fluencia.

Es el valor de esfuerzo que separa las zonas elásticas y plásticas para un material, un pequeño aumento en el esfuerzo por encima del límite elástico producirá un colapso en el material provocando una deformación permanente, este fenómeno se produce cuando un material se deforma sin la necesidad de aumentar la carga. Existen dos tipos de fluencias que se pueden encontrar como son la fluencia continua y la fluencia discontinua. (Carrero, 2014).



### 2.15.2.1. Fluencia continua.

Se caracteriza por una curva suave la que podemos observar en la figura 37-2 y que presenta un área de fluencia definida por lo que es imposible determinar la transición elástica plástica. Para el cálculo de la fluencia continua se lo puede realizar por dos métodos llamados resistencia a la fluencia por desplazamiento especificado y por extensión bajo carga especificada. (Shaping and treating of steel: casting, 2003)

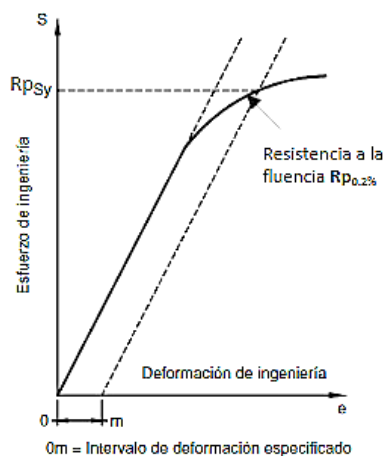


**Figura 37-2:** Curva de fluencia continua.

**Fuente:** (Shaping and treating of steel: casting, 2003)

### 2.15.2.2. Resistencia a la fluencia por desplazamiento especificado (offset):

Es el esfuerzo al cual el material ha sido deformado plásticamente por una cantidad igual a un intervalo de deformación especificada. Este esfuerzo se ubica en el punto donde se intercepta la curva esfuerzo-deformación con una línea pendiente igual al módulo de elasticidad y trazada de modo que esta se encuentre desplazada de la porción lineal de la curva de esfuerzo deformación una cantidad igual a la deformación especificada. El intervalo más utilizado de deformación es el 0,2%. (Figura 38-2). (Carrero, 2014)

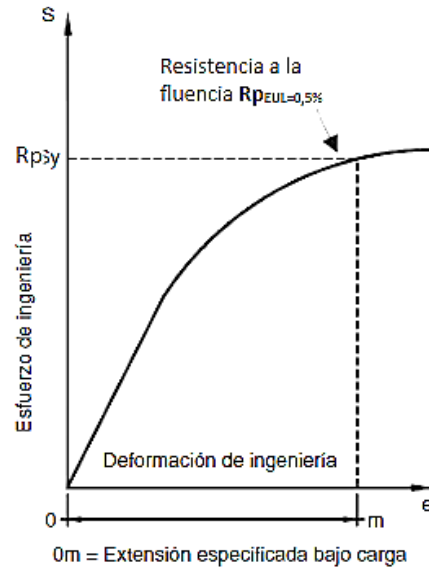


**Figura 38-2:** Esfuerzo a la fluencia por el método de desplazamiento 0,20%.

**Fuente:** (Shaping and treating of steel: casting, 2003)

### 2.15.2.3. Resistencia a la fluencia por extensión bajo carga especificada (EUL).

En este caso se puede especificar una deformación de 0,5%, este esfuerzo se obtiene en el punto donde se intercepta la curva esfuerzo-deformación con una línea trazada en forma paralela al eje de esfuerzo en la deformación especificada en el eje de deformación. (Figura 39-2)

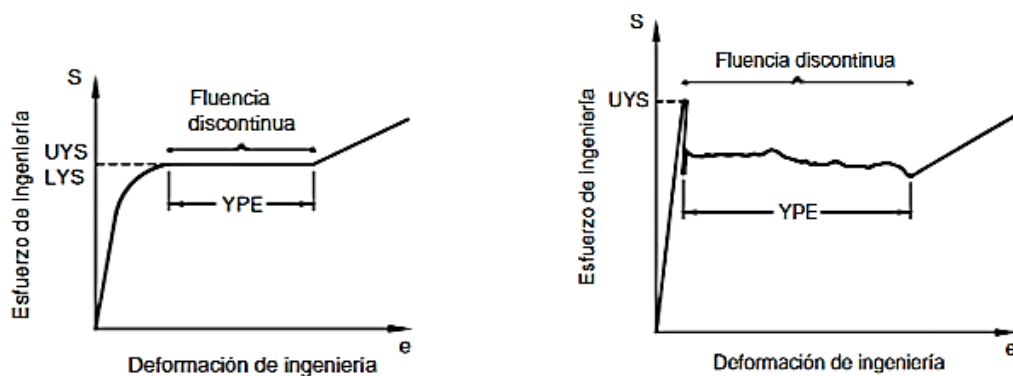


**Figura 39-2:** Esfuerzo a la fluencia por el método de extensión 0,50%.

Fuente: (Shaping and treating of steel: casting, 2003)

### 2.15.2.4. Fluencia discontinua

Se caracteriza por la presencia de una zona de fluctuación de la carga observada inmediatamente después del inicio de la deformación plástica. En la figura 40-2 se tiene las dos curvas esfuerzo deformación en donde se posee una fluencia discontinua. (Shaping and treating of steel: casting, 2003).

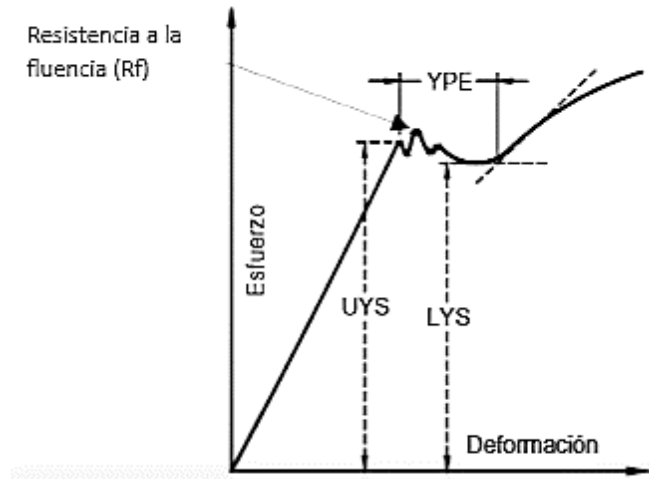


**Figura 40-2:** Curva esfuerzo deformación con fluencia discontinua.

Fuente: (Shaping and treating of steel: casting, 2003)

Para determinar la resistencia a la fluencia se analizará el valor que corresponde a la carga máxima de pendiente cero en/o cerca del inicio de la deformación plástica, como se observa en la figura 41-2. Físicamente se percibe por el detenimiento o caída del indicador de la máquina de ensayos,

teniendo una lectura directa. (Shaping and treating of steel: casting, 2003).

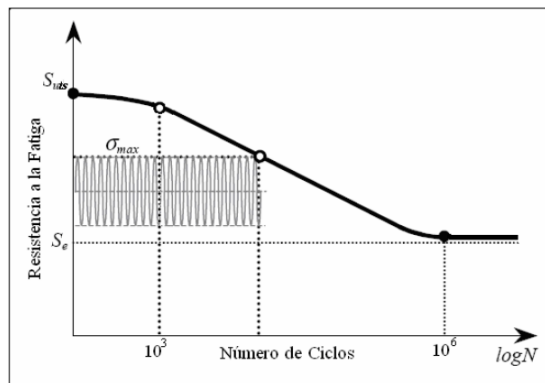


**Figura 41-2:** Curva esfuerzo-deformación con fluencia discontinua.

Fuente: (Shaping and treating of steel: casting, 2003)

### 2.16. Estudio de la curva de fatiga en plásticos.

La Curva S-N típica para una gran variedad de polímeros posee una pendiente característica en la región 2 es de 14 MPa por década de número de ciclos, como se puede apreciar en las figuras 42-2, 43-2, 44-2, 45-2, 46-2 y 47-2.

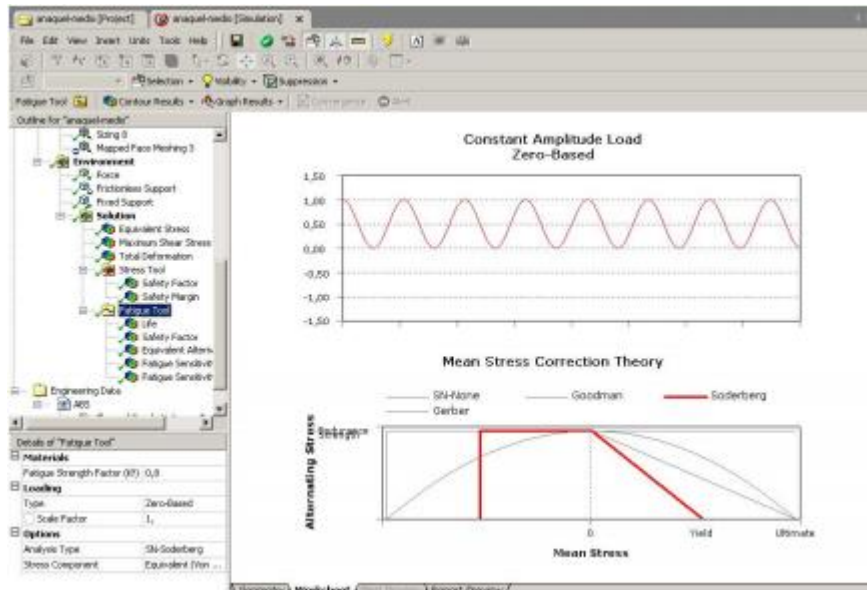


**Figura 42-2:** Curva S-N típica para el polímero ABS.

Fuente: (Shaping and treating of steel: casting, 2003)

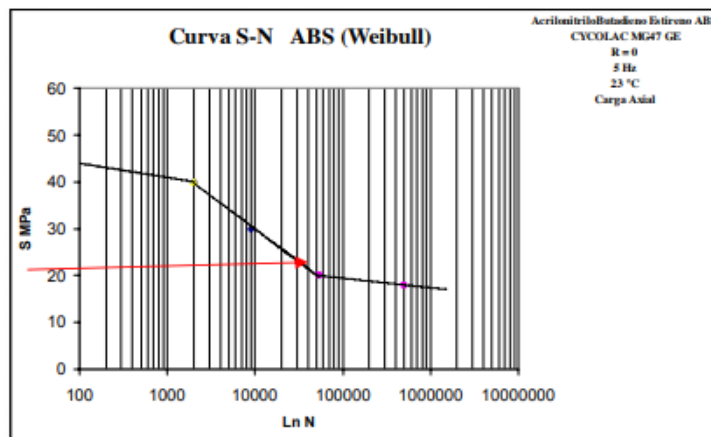
La ecuación de la pendiente en la gráfica S-N del material ABS es la siguiente:

$$y = -0.8925 \ln x + 29.713$$



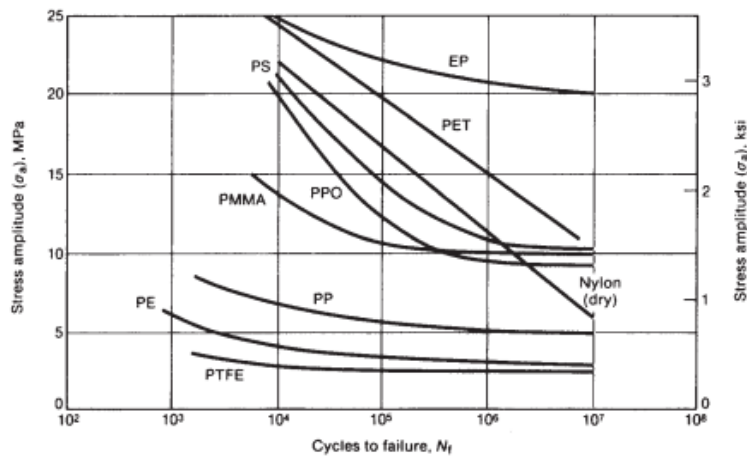
**Figura 43-2:** Curva S-N resultante para la simulación del polímero ABS.

Realizado por: Luis Castagneto



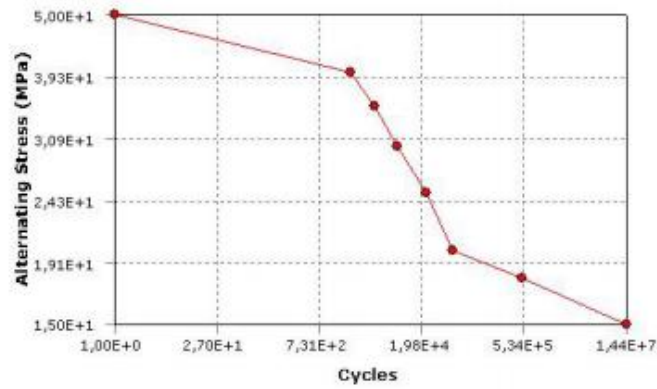
**Figura 44-2:** Curva S-N resultante para la simulación del polímero ABS.

Realizado por: Luis Castagneto



**Figura 45-2:** Típicas curvas S-N para diferentes materiales plásticos.

Fuente: (Shaping and treating of steel: casting, 2003)



Right click on the grid to add, modify and delete a row.

	Cycles	Alternating Stress (MPa)
1	1,	50,
2	2003,	40,
3	4348,	35,
4	9065,	30,
5	22495,	25,
6	53254,	20,
7	4,9504e+005,	18,
8	1,4435e+007,	15,

**Figura 46-2:** Curva S-N resultante para la simulación del polímero ABS.

Realizado por: Luis Castagneto

## Material Properties

<input checked="" type="checkbox"/> <b>Structural Properties</b>	
<input type="checkbox"/> Young's Modulus	793, MPa
<input type="checkbox"/> Poisson's Ratio	0,35
<input type="checkbox"/> Mass Density	1,04e-006 kg/mm <sup>3</sup>
<input type="checkbox"/> Thermal Expansion Coefficient	0, 1/°C
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Stress Limits</b>	
<input type="checkbox"/> Tensile Yield	45, MPa
<input type="checkbox"/> Compressive Yield	0, MPa
<input type="checkbox"/> Tensile Ultimate	52, MPa
<input type="checkbox"/> Compressive Ultimate	0, MPa
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Bilinear Isotropic Plasticity</b>	
<input type="checkbox"/> Yield Strength	0, MPa
<input type="checkbox"/> Tangent Modulus	0, MPa
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Thermal Properties</b>	
<input type="checkbox"/> Specific Heat	0, J/kg·°C
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Fatigue Properties</b>	
Interpolation	Log-Log
Mean Curve Type	mean stress

**Figura 47-2:** Propiedades ingresadas para la simulación del polímero ABS.

Realizado por: Luis Castagneto

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO.

#### 3.1. Análisis de máquinas existentes en el mercado.

Realizando una búsqueda se pudo encontrar que la empresa Tec Quipment fabrica y comercializa los mejores equipos de educación de Ingeniería durante 60 años. Desde la fundación de la compañía en 1958, Tec Quipment ha establecido y mantiene una posición de liderazgo en el sector de la educación de Ingeniería global, ayudando a la educación en todo el mundo, al proporcionar el mejor programa de apoyo de equipos de laboratorio. (Fatigue in polymers, 1967)

Esta máquina demuestra la falla por fatiga de materiales cuando están sujetos a tensiones alternas establecidas en el diseño de Wohler y utiliza un motor para rotar un círculo en voladizo con una carga en su extremo libre. Es en dos partes: una unidad principal robusta, un control separado y una unidad de instrumentación. Un variador de velocidad controla el motor para permitir la seguridad y aumento gradual de la velocidad del ciclo. El motor gira un acoplamiento compatible y un eje de precisión sostenido en robusto aspecto. Un portabrocas tipo pinza en el extremo de los agarres del eje la muestra con concentricidad confiable y precisa. Esta reduce el tiempo de preparación y la vibración no deseada. Los especímenes tienen un diseño especial que crea un punto de máxima tensión en su punto medio en lugar de su fin, esto proporciona un punto definido de falla y evita concentraciones de esfuerzos no deseados. (A formalised experimental approach to the fatigue of thermoplastics, 1969)

Un cojinete auto alineador montado en cardán sostiene el libre final de la muestra. El conjunto de cardán se vincula a un corto brazo de carga, esto aplica una carga puramente vertical incluso cuando la muestra se desvía bajo carga. Una celda de carga vincula el brazo de carga corto a un brazo de carga más largo. El brazo de carga más largo tiene un peso muerto móvil integral que establece la carga. La celda de carga mide la carga y un sensor electrónico mide la rotación del eje. El control separado y la unidad de instrumentación muestra la carga, la velocidad (velocidad de ciclo) y el número de ciclos. Un interruptor corta la energía al motor de accionamiento cuando la muestra falla, deteniendo la prueba. Esto congela la visualización del ciclo en fallo al registrar el resultado, incluso sin el operador Estar presente. (Lawrence, 1973).

A diferencia de algunos diseños, el mecanismo se cierra fuera del motor solo cuando la muestra realmente se rompe (no cuando la muestra está cerca del fallo). Un protector transparente extraíble cubre las piezas giratorias. Tiene un interruptor de bloqueo para detener el motor si se retira el espécimen. Tec Quipment también puede suministrar muestras adicionales para trabajar con esta máquina. (ICI Research Laboratories, 1971)

La base de la unidad principal incluye un práctico área de almacenamiento para almacenar las herramientas y muestras cuando no está en utilizar. La unidad de control e instrumentación se conecta a El versátil sistema de adquisición de datos de Tec Quipment (VDAS®). Esto proporciona una captura de datos precisa en tiempo real, monitoreo y visualización, cálculo y gráficos de todos los elementos importantes lecturas en una computadora (computadora no incluida). Esta puede permitirle usar una computadora en red y de forma remota supervisa tus pruebas. Esto podría ser especialmente útil durante pruebas de larga duración. (Prediction of end-product performance, 1971)



**Figura 1-3:** Máquina para ensayo de fatiga

**Fuente:** Empresa Tec Quipment.

### 3.1.1. Descripción general de la máquina para ensayo de fatiga.

La máquina para ensayo de fatiga mecánica aplicada a vigas rotatorias debe reunir una serie de características que permitirán que sea un equipo que brinde facilidad de operación y la mayor seguridad a sus operarios. (The transformation of research results into design practice, 1971).

Sus partes principales son:

- Motor eléctrico.
- Acople semiflexible termoestable de hierro fundido.
- Mordazas (mandriles)
- Aplicación de carga en los ejes.
- Chumaceras de piso y de presión móviles, quienes alojan la carga suministrada que generarán la fatiga en el espécimen.
- Chumaceras con cojinetes fijos, las cuales se encargan de sostener en la estructura, los mandriles, las chumaceras de piso y presión móviles y al espécimen de prueba.

Tanto los cojinetes fijos como móviles, deben impedir que se produzcan cargas por tracción o compresión, caso contrario el espécimen de prueba no estará soportando la carga de flexión pura por lo que se debe estudiar los mejores cojinetes y los más adecuados para esta aplicación ya que serán un factor importante para un buen desempeño de la máquina. (Plumbridge, 1972).

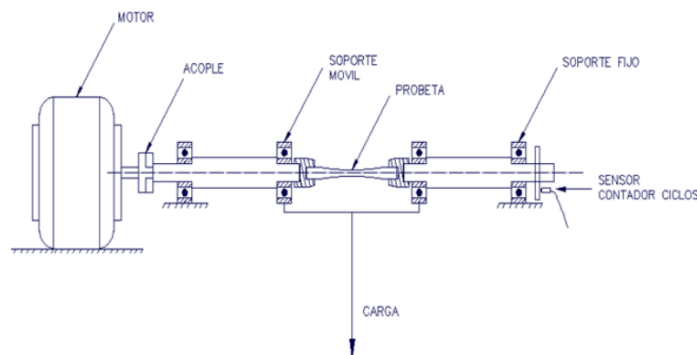
### 3.1.2. Selección de la máquina

Analizando las tres alternativas estudiadas para el posible diseño, se puede llegar a la conclusión que la máquina más factible para la construcción ya que es la más común en este tipo de ensayos mecánicos, tomando en cuenta que su aplicación en prácticas de laboratorio muestra errores mínimos sería la máquina de R.R. Moore, por lo que dicha máquina presenta muchas ventajas en su diseño, construcción y la facilidad en su operación. (Shigley, y otros, 2008).

### 3.1.3. Funcionamiento de la máquina modelo de R.R. Moore.

El prototipo modelo de Moore que se aprecia en la Figura 2.3, es una de los más aplicados cuando se necesita practicar ensayos con materiales sujetos a cargas de flexión rotativa. El funcionamiento general de la máquina se lo puede describir de la siguiente manera: Un motor genera el torque necesario para vencer la inercia y este está acoplado a un eje que sujeta a los mandriles, la probeta está sujeta a este elemento, por medio de las cargas se produce la fuerza necesaria para generar el esfuerzo de flexión. (Shigley, y otros, 2008).

Para iniciar la practica en el laboratorio se procede a encender el motor utilizando el sistema de control que haya sido implementado, el mismo comportamiento tiene el apagado del motor; sin embargo, este se debe detener en el momento que la probeta falle por fatiga es decir se presente la fractura, debido a que, se debe activar un sensor de proximidad o a su vez de presencia el cual enviará una señal al controlador para que termine la práctica. El sensor que se encarga del conteo de ciclos debe enviar la señal al controlador para que éste los muestre mediante algún método de transformación de interfaz. (Findley, W. N., Gjelsvik, A., 1961).



**Figura 2-3:** Modelo esquemático de Máquina de ensayo de fatiga de R.R Moore.

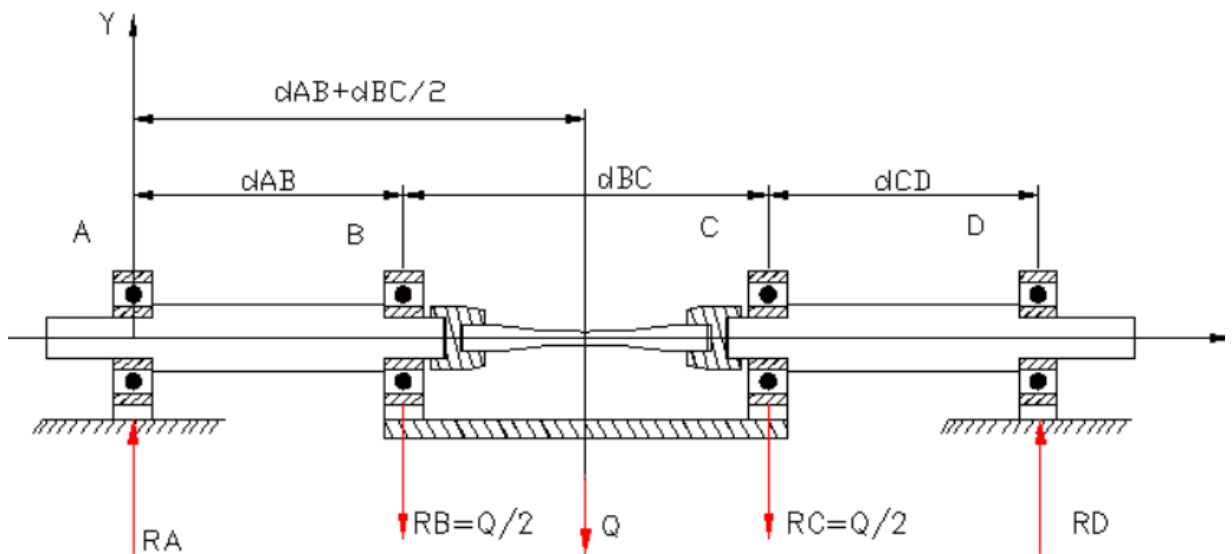
**Realizado por:** Luis Castagneto



Con ayuda de la Figura 3.2, se pueden determinar los diagramas tanto de fuerza cortante como de momento que se generan en la máquina, los puntos donde se encuentran las reacciones son: A, B, C y D.

### 3.1.3.1. Cargas que intervienen en la máquina de Moore.

Valiéndonos del siguiente esquema expuesto en la Figura 3.3, se puede establecer el momento flector y la fuerza cortante que se producen en la máquina de ensayo de fatiga, además que en dichas coordenadas se presentan las reacciones A, B, C y D.



**Figura 3-3:** DCL de prototipo de máquina de Moore.

Realizado por: Luis Castagneto

Para esta aplicación el único componente que puede producir reacciones es el esfuerzo que entrega la carga  $Q$ . En el análisis anterior se concluyó que las piezas no están sometidas a torsión y que no existen momentos flectores externos, además que en los cojinetes B y C se transmite al espécimen ensayado el valor de  $\frac{Q}{2}$  en sentido vertical.

Realizando la respectiva sumatoria de momentos en el punto A y de fuerzas en el eje Y, se puede determinar que hay presencia de cargas de igual magnitud, pero opuesto sentido a las cargas que están aplicada en los cojinetes B y C, esto producto de las reacciones en los cojinetes A y D.

$$\Sigma F_y = 0$$

$$R_A + R_D - R_B - R_C = 0$$

$$R_B = R_C = \frac{Q}{2}$$

[5]

Donde tenemos:

$R_A$  = Reacción soportada en el cojinete A

$R_B$  = Reacción soportada en el cojinete B

$R_C$  = Reacción soportada en el cojinete C

$R_D$  = Reacción soportada en el cojinete D

$Q$  = Carga máxima

Entonces:

$$R_A + R_D = Q$$

Luego se procede a realizar la sumatoria de los momentos existentes en el punto A y se obtiene lo siguiente:

$$\Sigma Ma = 0$$

$$R_B d_{AB} + R_C (d_{AB} + d_{AC}) = R_D (d_{AB} + d_{BC} + d_{CD})$$

[6]

Las distancias  $d_{AB}$  y  $d_{CD}$  son iguales, por lo tanto:

$$\frac{Q}{2} (d_{AB} + d_{AB} + d_{AC}) = R_D (d_{AB} + d_{BC} + d_{CD})$$

$$\frac{Q}{2} (2d_{AB} + d_{AC}) = R_D (2d_{AB} + d_{CD})$$

$$R_D = \frac{Q}{2}$$

Reemplazando  $R_D$  se obtiene que  $R_A$  es:

$$R_A = \frac{Q}{2}$$

Por tanto, la ecuación del esfuerzo cortante máximo será:

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{Q}{2}$$

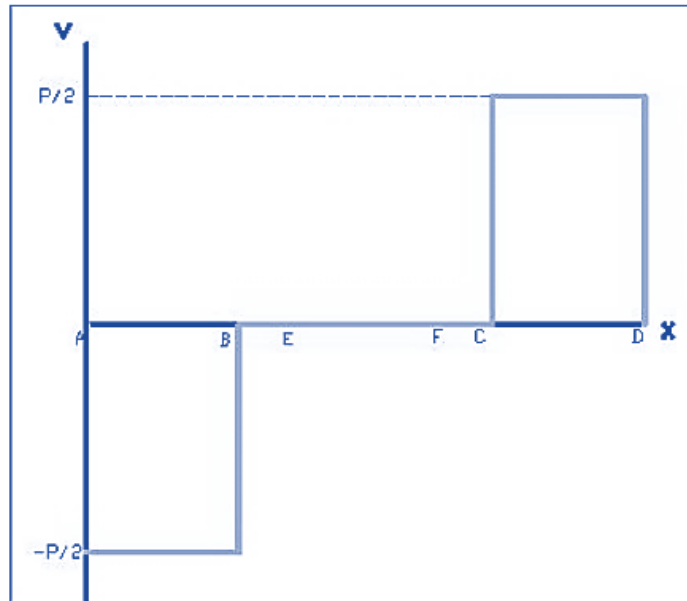
[7]

Entonces se puede determinar la ecuación del momento flector máximo de la siguiente manera:

$$M_{m\acute{a}x} = d_{AB} \frac{Q}{2}$$

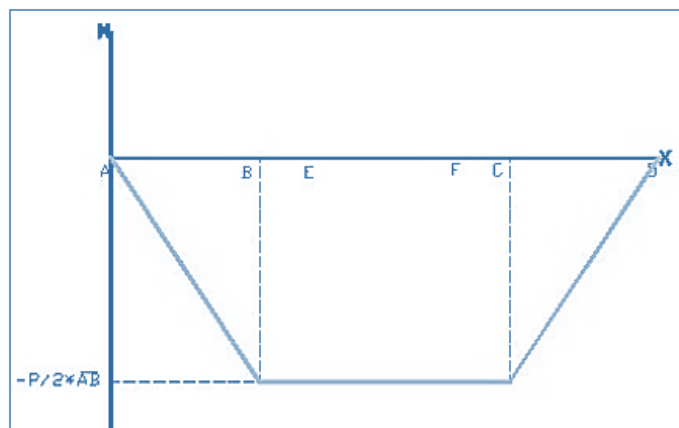
[8]

Una vez determinadas las reacciones en todos los puntos estamos en condiciones de realizar el diagrama de esfuerzo cortante.



**Figura 4-3:** Diagrama de fuerza cortante del sistema

Realizado por: Luis Castagneto F.



**Figura 5-3:** Diagrama de momento flector del sistema

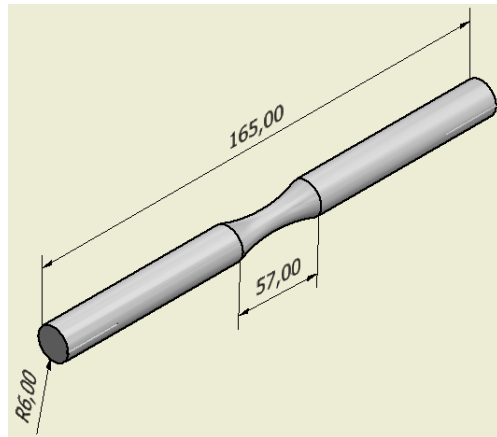
Realizado por: Luis Castagneto F.

#### 3.1.4. Preparación de las probetas para ensayos de fatiga mecánica.

En nuestro caso las probetas serán dibujadas en Autodesk Inventor Professional 2020, y generado el código G, para proceder a realizar la impresión en 3D, de la probeta que nos recomienda la utilización de la Norma ASTM Standars 2005, para la aplicación de Maquina de R.R. Moore.

##### 3.1.4.1. Diseño de la probeta.

En esta etapa se revisó la norma ASTM D671 y D638-02a, además se tomó como referencia la probeta tipo I, la cual fue diseñada en software Inventor Profesional, con las medidas dadas por la norma.

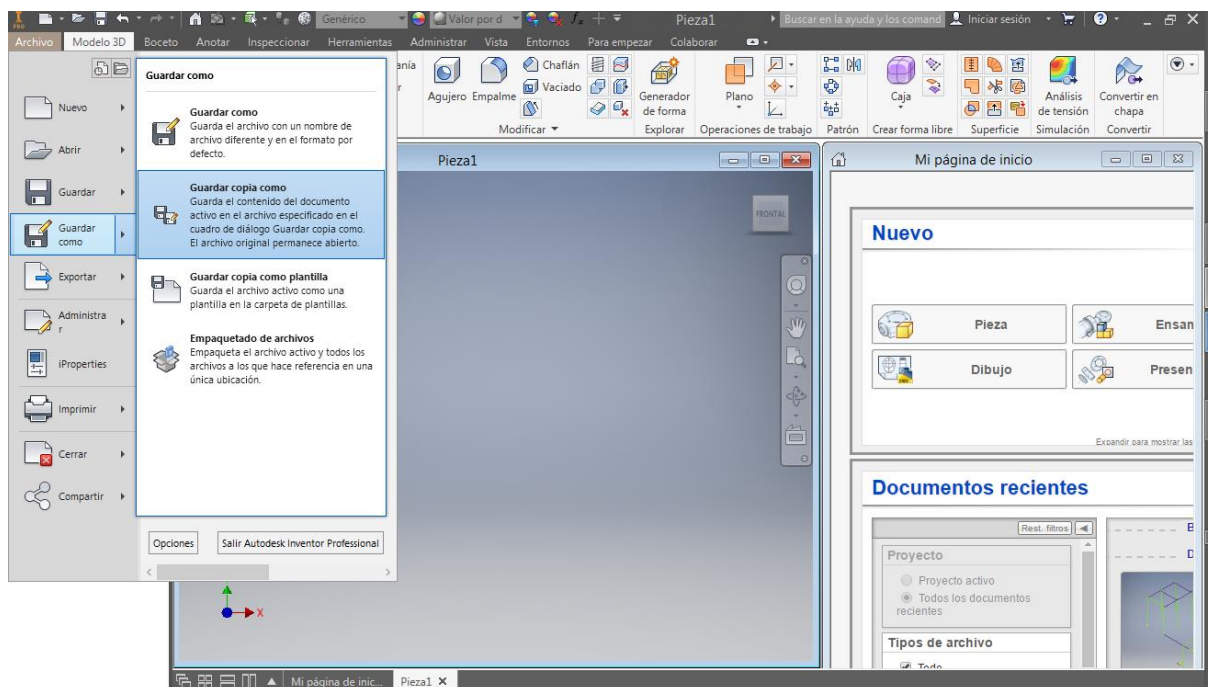


**Figura 6-2:** Probeta diseñada en base a la norma ASTM D638-02a.

**Realizado por:** Luis Castagneto F.

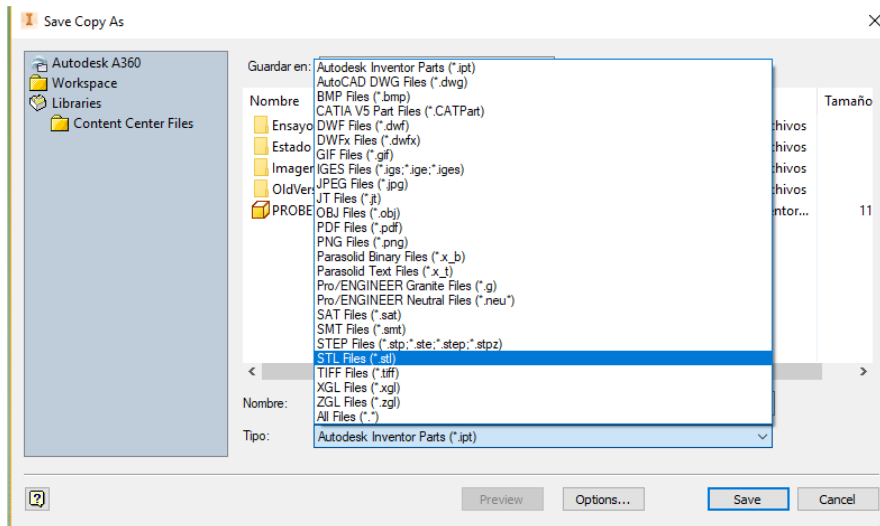
### 3.1.4.2. Transformación a STL.

Para poder ingresar el archivo prediseñado en Inventor al software Cura, es necesario la transformación a la extensión STL el cual es un formato de malla triangular, que ayuda a mejorar la calidad superficial del diseño 3D. En la figura 17 se puede observar el procedimiento para realizar la transformación a STL en el software Inventor Profesional. (J. de Ciurana, L. Serenóa, y È. Vallès., 2013).



**Figura 7-3:** Interfaz del software Inventor.

**Realizado por:** Luis Castagneto.

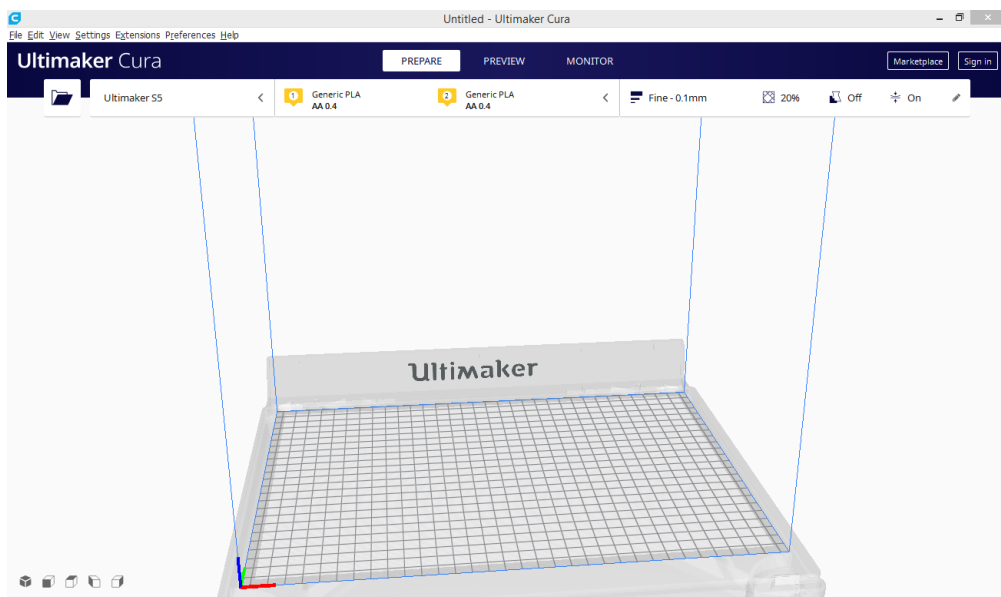


**Figura 8-3:** Proceso para transformar a un formato STL en el software Inventor.

**Realizado por:** Luis Castagneto F.

### 3.1.4.3. Rebanado del sólido

Durante este procedimiento se procede a ejecutar un rebanado del archivo STL en donde se genera el código G correspondiente que posteriormente será llevado a la tarjeta electrónica de la impresora para su lectura, para lo cual se utiliza el software CURA en su versión 2.5.0.



**Figura 9-3:** Software Cura utilizado para rebanado de sólido.

**Realizado por:** Luis Castagneto F.

Se debe iniciar realizando la configuración de los parámetros, los cuales depende del material en el que vamos a realizar la impresión, sin embargo, para el presente proyecto se ingresaron los valores recomendados por el fabricante para este tipo de impresiones. En la tabla 3.1 que se encuentra a continuación se detalla los parámetros configurados previo a la impresión.

**Tabla 1-3:** Configuraciones colocadas en el software CURA.

Configuración de software	ABS	PLA
Altura de capa	0,3 mm	0,3 mm
Altura de la primera capa	0,3 mm	0,3 mm
Perímetros	2	2
Densidad de relleno	40/80 %	40/80 %
Patrón de relleno	Lineal	Lineal
Temperatura de impresión	240°C	215°C
Temperatura de superficie de impresión	65°C	50°C
Diámetro de filamento	2,85 mm	2,5 mm
Flujo	100%	103%
Velocidad de impresión	60 mm/s	60 mm/s
Secuencia de impresión	Una a la vez	Una a la vez
Diámetro de nozzle	0,6 mm	0,6 mm

**Realizado por:** Luis Castagneto

### 3.1.5. Impresión de probetas.

En la etapa de impresión de las probetas se la realizó con los dos tipos de materiales los cuales son ABS y PLA. En la tabla 2-3 se encuentra las principales características del lote impreso para nuestro proyecto técnico.

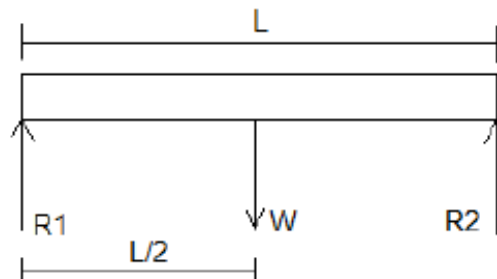
**Tabla 2-3:** Características del lote impreso.

Probeta	Material	% de Relleno	Tiempo por probeta
1 – 30	ABS	80,00	47 ´
31-43	PLA	80,00	47 ´

**Realizado por:** Luis Castagneto F.

### 3.1.6. Análisis de la deformación de la probeta.

Para realizar este cálculo se toma en cuenta que la probeta a ensayar se comporta como una viga, lo que podemos observar en la siguiente figura tipo esquema.



**Figura 10-3:** Esquema del diagrama de cuerpo libre de la viga a ser ensayada.

**Realizado por:** Luis Castagneto

Las probetas estandarizadas requeridas para realizar el ensayo de fatiga se las puede observar en la figura 6-2, dicha probeta tiene un diámetro menor de  $\frac{1}{2}$ ” pulgada medidos en el centro, además

que este espécimen es totalmente simétrico longitudinalmente y transversalmente, para nuestro ensayo debe ser elaborada por medio del proceso de impresión 3D mediante modelado por deposición fundida con un acabado superficial fino.

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad [9]$$

$$I = \frac{\pi(19)^4}{64} = 6397.12 \text{ mm}^4$$

Módulo de elasticidad del Ácido poli láctico.

$$E = 3 \text{ GPa}$$

Módulo de elasticidad del Acrilonitrilo Butadieno Estireno.

$$E = 1.1 \text{ GPa}$$

El momento flector que actúa sobre la probeta es totalmente alternante y se lo puede observar en la Figura 3.3 y para el cálculo utilizamos la ecuación:

$$\sigma_a = \frac{M_{max} C}{I} \quad [10]$$

Donde:

$C$  = Representa la distancia entre la fibra más lejana de la probeta y la fibra neutra.

$I$  = Momento de inercia rotacional del cuerpo.

Para el cálculo de los valores de  $C$  e  $I$ , se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$C = \frac{d_{probeta}}{2} \quad [11]$$

$$I = \frac{\pi(d_{probeta})^4}{64} \quad [12]$$

Donde:

$d_{probeta}$  = Es el menor diámetro de la probeta que se encuentra ubicado en la parte central.

Reemplazando y sustituyendo ambas ecuaciones se tiene que:

$$\sigma_a = \frac{32 * M_{max}}{\pi(d_{probeta})^3} \quad [13]$$

Reemplazamos en la ecuación del momento máximo y se tiene que:

$$\sigma_a = \frac{16 * Q * d_{AB}}{\pi(d_{probeta})^3} \quad [14]$$

Donde  $Q$  representa al valor de las reacciones en el rodamiento A y D, ya que el esfuerzo producido por la resistencia a la fatiga es dependiente del valor de  $Q$ . El principal factor para que

se inicie la fractura del espécimen es cuando se igualan los esfuerzos alternante con el esfuerzo de fatiga y se aplica la siguiente ecuación:

$$\sigma_a = S_f \quad [15]$$

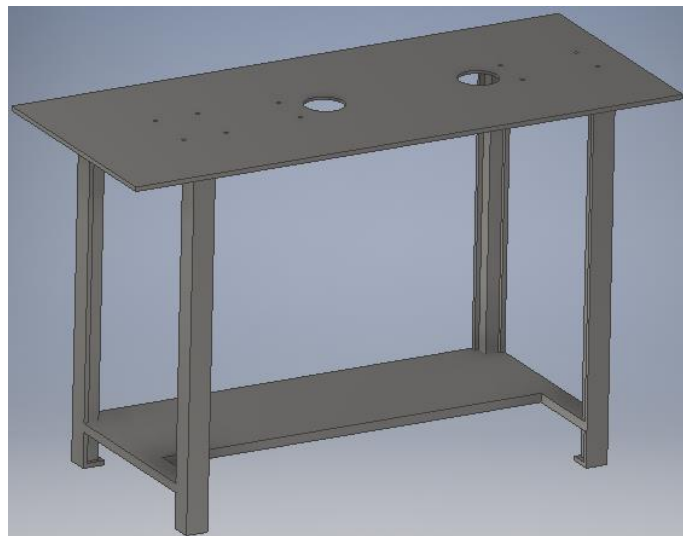
Procedemos a igualar las ecuaciones y obtenemos que la ecuación para determinar el valor de la carga en la máquina para ensayo de fatiga es la siguiente:

$$Q = \frac{aN^b\pi(d_{probeta})^3}{16d_{AB}} \quad [16]$$

Con esta ecuación nos basaremos más adelante para realizar el cálculo teórico de la carga que soportará la maquina a ser diseñada y construida.

### 3.1.7. *Diseño de la estructura de la máquina.*

Las características apropiadas que necesita tener el diseño de la estructura deben certificar que va a tener buena estabilidad ante cargas verticales, empezando por las vigas que al ser uno de los componentes más comunes de una estructura. Las fuerzas internas, el esfuerzo cortante y el momento torsor son desarrollados cuando la viga que la soporta está cargada perpendicularmente a la transmisión de los apoyos en referencia directa a su eje longitudinal. (Leet, 2006). En la Figura 3.5 se muestra un esquema de la configuración de la estructura a ser utilizada.



**Figura 11-3:** Esquema de la estructura de la máquina.

Realizado por: Luis Castagneto

Los pórticos son los principales componentes estructurales y estos están compuestos por columnas y vigas que están unidas mediante juntas rígidas soldadas o empernadas siempre y cuando exista entre ellas un ángulo de 90°. La máquina de ensayos de resistencia a la fatiga, está equipada mecánicamente de la bancada que soporta tanto el conjunto de la máquina como el motor, la misma que está construida de plancha de acero laminado en caliente de 4 mm de espesor. Las



cargas a las que está sometida la estructura se basan principalmente en los pesos totales de los elementos existentes en el prototipo. Para esta aplicación se realizará un diseño por estabilidad para las vigas para así analizar la resistencia a la flexión de las mismas, además de las cargas de compresión que soportan las columnas de la estructura.

### 3.1.7.1. Diseño de columnas por estabilidad

El manual de la AISC para realizar el método alternativo del diseño por estabilidad que será utilizada para el diseño de las columnas es el siguiente.

- a) Durante el diseño de las columnas se debe fijar un valor para la carga axial que estará soportada y prueba con una de las columnas las diferentes propiedades.
- b) El esfuerzo de compresión presente en la columna se lo calcula mediante la siguiente ecuación:

$$fa = \frac{V}{A} \quad [17]$$

Donde:

$fa$  = Representa el esfuerzo de compresión de la columna.

$V$  = Representa el valor de la carga de compresión.

$A$  = Representa la sección transversal del perfil estudiado.

- c) En esta aplicación se tiene que cumplir lo siguiente:

$$fa \leq FA$$

Donde:

$FA$  = Representa el esfuerzo permisible de compresión.

- d) Se procede a realizar la comparación de los valores de  $fa$  y  $FA$  para luego proceder a realizar el cálculo del índice de trabajo que realiza la columna.

$$I_a = \frac{fa}{FA} \leq 1 \quad [18]$$

Donde:

$I_a$  = Representa el índice de trabajo que realiza la columna.

### 3.1.7.2. Diseño de vigas por resistencia a flexión.

Primero se debe determinar el esfuerzo en las vigas, así en un siguiente paso del diseño se podrá determinar la resistencia a la flexión de las vigas estudiadas basándonos en la ecuación siguiente:

$$\sigma_x = \frac{M_{max} - C}{I} \quad [19]$$

Entonces:

$$W = \frac{I}{C} \quad [20]$$

Donde:

$W$  = Módulo de la sección en flexión.

Reemplazando se tiene que:

$$\sigma_x = \frac{M_{max} - C}{I} = \frac{M_{max}}{W}$$

Como en la aplicación no existe esfuerzo en el eje de las ordenadas, y al presentarse flexión completamente pura se considera que el esfuerzo cortante es nulo, por lo tanto, se lo desprecia:

$$\sigma_y = 0 \quad \tau_{xy} = 0 \quad [21]$$

Por lo tanto, se tiene que:

$$\sigma_1 = \sigma_x ; \sigma_2 = 0 \text{ y } \sigma_3 = 0$$

Aplicando el esfuerzo de Von Mises:

$$\sigma' = \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}{2} \right] \quad [22]$$

$$\sigma' = \sigma_1$$

En esta aplicación para realizar el diseño de las vigas de la estructura se utilizará la Teoría de la energía de la distorsión.

$$\sigma' = \frac{S_y}{n} \quad [23]$$

Entonces:

$$\sigma_1 = \frac{S_y}{n}$$

$$\frac{M_{max}}{W} = \frac{S_y}{n}$$

$$\frac{M_{max}}{W} = \sigma_1$$

$$\frac{M_{max}}{\sigma_1} = W$$

### 3.1.7.3. Dimensiones de la estructura metálica.

El pórtico estará compuesta por columnas y vigas transversales fabricadas en perfil estructural rectangular laminado en caliente y soldado por arco bajo gas protector con electrodo consumible, mediante junta a tope entre sí, tomando en cuenta que para nuestra aplicación el ángulo entre la

columna y la viga es de 90°, además la misma que debe ser capaz de conservar su forma, estabilidad y propiedades mecánicas durante el tiempo de vida útil además que se debe tomar en cuenta las cargas verticales que están actuando en mencionada estructura, también el tipo de apoyo para las columnas que está determinado como de rotación libre, ya que las mismas no se encuentran empotradas, las dimensiones y forma para el diseño de la estructura se observan en la figura 3.8, en este punto de debe tomar en cuenta que el pórtico no necesita la presencia de columnas intermedias adicionales por lo que la estructura nos promete un claro completamente libre.

Las dimensiones de la estructura son las siguientes:

- Luz de la estructura = 40 cm
- Altura de las columnas = 95 cm
- Ancho en voladizo = 40 cm
- Longitud de las vigas = 85 cm
- Largo en voladizo = 12 cm

Cargas que soporta la estructura.

Los perfiles estructurales rectangulares laminados en caliente y soldados por arco bajo gas protector con electrodo consumible están destinados a soportar el peso de cada elemento, parte o componente que forme parte de la máquina ya sean estos mecánicos o electrónicos que conforman los subsistemas, además del peso que posee el soporte del motor, y este se lo calcula mediante la siguiente ecuación matemática:

$$L = 400 \text{ mm}$$

$$b = 400 \text{ mm}$$

$$e = 8 \text{ mm}$$

$$W_{\text{soporte motor}} = \rho * (b * L * e)$$

$$W_{\text{soporte motor}} = (7.85 * 100 \text{ Kg} / \text{mm}^3) * (400 * 218 * 8) \text{ mm}^3$$

$$W_{\text{soporte motor}} = 5.47 \text{ Kg}$$

[24]

En la tabla 3-3 se detallan los diferentes pesos de los elementos, partes y piezas que soporta la estructura metálica:

**Tabla 3-3:** Pesos de los componentes de la máquina.

Cantidad	Elemento / Parte / Pieza	Peso Unitario (Kg)	Peso Total (Kg)
1	Motor eléctrico	11.000	11.000
3	Chumacera de piso	0.250	0.750
2	Chumacera de presión	0.300	0.600
1	Eje conductor	1.500	1.500
1	Eje conducido	1.750	1.750
2	Mandril o mordaza	0.250	0.500
1	Placa fija soporte	24.400	24.400
1	Placa móvil	3.750	3.750
1	Base del motor eléctrico	5.000	5.000
2	Varillas porta pesas	0.075	0.150
12	Arandela de presión y planas	0.030	0.360
1	Acople semiflexible termoplástico	0.250	0.250
<b>PESO TOTAL</b>		<b>50.010</b>	

**Realizado por:** Luis Castagneto

Entonces el peso total que soportará la estructura metálica con sus elementos partes y piezas será lo siguiente:

$$P_t = W_{E/P/P} + W_{carga\ máxima} \quad [25]$$
$$P_t = 50.010\ kg + 50.000\ kg = 100.010\ kg$$

Para la realización del presente diseño se aplicará un coeficiente de factor de seguridad del 4% por lo que el peso total asciende a:

$$P_t = 100.01 * 1.04 = 104.0104\ kg$$

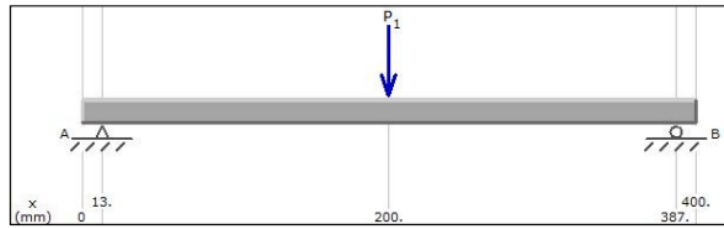
La estructura estará constituida principalmente por dos pórticos en tal virtud la carga aplicada se la dividirá equitativamente para dos.

$$P = \frac{P_t}{2} = \frac{104.0104}{2} = 52.0052\ Kg$$

Posteriormente se procede a realizar el cálculo de la carga final por unidad de longitud que se encuentra distribuida en toda la superficie de la viga transversal del pórtico para lo cual nos valemos de la siguiente operación:

$$p = \frac{P}{L} = \frac{52.0052\ Kg}{400\ mm} = 0.130013\ Kg/mm$$

Diagrama de cuerpo libre de la estructura con sus respectivos apoyos.



**Figura 12-3:** Diagrama de cuerpo libre de la estructura.

**Realizado por:** Luis Castagneto

Se procede a determinar las reacciones producidas en la columna.

$$\Sigma F_y = 0$$

$$RH_y + RK_y = p * L$$

$$RH_y + RK_y = 0.130013 \text{ Kg/mm} * 355\text{mm} = 46.154615 \text{ kg}$$

$$\Sigma F_x = 0$$

$$RH_x = RK_x = 0$$

$$\Sigma M_H = 0$$

$$RK_y * L - p * L/2 = 0$$

$$RK_y = 46.154615 \text{ Kg} * 355 \text{ mm} / 2(355\text{mm}) = 23.0773075 \text{ kg}$$

Ahora se determina  $RH_y$ :

$$RK_y = 46.154615 \text{ kg} - RH_y$$

$$RH_y = 46.154615 \text{ kg} - 23.0773075 \text{ kg} = 23.0773075 \text{ kg}$$

Luego de haber calculado las reacciones presentes en diferentes apoyos de la estructura metálica se continua con el cálculo de la fuerza normal, cortante y momento flector en cada articulación para poder determinar cuál es la sección más crítica de la estructura, por tal motivo se procede a dividir al pórtico en tres partes.

Luego de haber calculado el valor de las reacciones existentes en los apoyos de la estructura se procede a determinar la fuerza cortante y normal además del momento flector en cada uno de los vértices para determinar cuál es la sección más crítica, para lo cual se dividió al pórtico en tres segmentos; Segmento H-I, Segmento I-J, Segmento J-K.

### Segmento H-I

Se procede a realizar el cálculo de las reacciones y momentos mediante el siguiente procedimiento:

$$\Sigma F_Y = 0$$

$$RH_Y - RI_Y = 0$$

$$RH_Y = RI_Y = 23.0773075 \text{ Kg}$$

$$\Sigma F_x = 0$$

$$RH_x = RI_x = 0$$

$$\Sigma M_I = 0$$

$$M_I = RH_x * h = 0$$

El segmento H-I es igual al segmento J-K por lo que se procede a realizar el cálculo un solo segmento por lo que las reacciones serán iguales en los dos segmentos.

### Segmento I-J

$$\Sigma F_x = 0$$

$$RH_x - RJ_x = 0$$

$$RH_x = RJ_x = 0$$

Determinar la fuerza cortante.

Límites para cuando:

$$x = 0 \text{ mm} \quad V = RH_y$$

$$V = 23.0773075 \text{ Kg} - 0.137 * 0 = 23.0773075 \text{ Kg} = 226.31 \text{ N}$$

$$x = 177.5 \text{ mm} \quad V = RH_y - p * x$$

$$V = 23.0773075 \text{ Kg} - 0.137 * 177.5 = 0$$

$$x = 355 \text{ mm} \quad V = RH_y - p * x$$

$$V = 23.0773075 \text{ Kg} - 0.137 * 355 = -23.0773075 \text{ Kg} = -238.34 \text{ N}$$

Determinar el momento flector.

$$\Sigma M_J = 0$$

$$M_J = RH_J * x - p * (x^2/2)$$

Límites para cuando:

$$x_2 = 0 \quad M_f = 0 \text{ kg. mm}$$

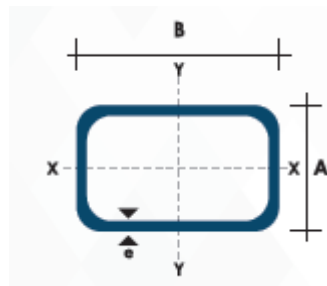
$$x_2 = 177.5 \text{ mm} \quad M_f = (24.32 * 177.5) - 0.137 * 177.5^2/2 = 2158.62 \text{ N. mm}$$

$$x_2 = 355 \text{ mm} \quad M_f = (24.32 * 177.5) - 0.137 * 355^2/2 = 0 \text{ kg. mm}$$

Para darnos cuenta cuales son las zonas más críticas que están en el pórtico de la estructura se observan los diagramas de fuerza cortante y momento flector previamente determinados, se debe tomar en cuenta que los esfuerzos que la columna soporta en el segmento J-K, son idénticos a la del segmento H-I, entonces se omite el paso de hacer el análisis de fuerza cortante y normal además del momento flector en este segmento, en tal virtud se pasa directamente a determinar cuáles son las zonas críticas observando los diagramas previamente graficados.

#### Cálculo de Columnas

El diseño de las columnas sometidas a compresión se efectúa según los lineamientos del manual del American Institute of Steel Construction (AISC), que nos dice que para realizar el diseño en las columnas se debe seleccionar un perfil estructural y determinar el valor de la fuerza de compresión al que se someterá, por tal motivo es indispensable determinar el área de la sección transversal y valiéndonos del catálogo de aceros DIPAC se procede a seleccionar un perfil estructural rectangular el mismo que tiene las características referidas en la figura 13-3.



Dimensiones				Área	Ejes Y-Y			Ejes X-X		
A mm	B mm	Espesor (e) mm	Peso Kg/m	Área cm <sup>2</sup>	I cm <sup>4</sup>	W cm <sup>3</sup>	I cm	I cm <sup>4</sup>	W cm <sup>3</sup>	I cm <sup>3</sup>
30	50	2.0	2.41	2.94	9.52	3.81	1.80	4.28	2.85	1.21

**Figura 13-3:** Características del perfil rectangular 30\*50\*2 mm.

Fuente: Catálogo DIPAC

La fuerza de compresión que actúa en la columna es:

$$f_a = \frac{V}{A} \quad [26]$$

$f_a$  = Esfuerzo de compresión de la columna, [MPa].

V = Carga axial de compresión, [1071.82 N].

A = Área del perfil seleccionado, [(2.94 \* 10<sup>-4</sup>)m<sup>2</sup>]

$$f_a = \frac{1071.82 \text{ N}}{(2.94 * 10^{-4})m^2}$$
$$f_a = 2.33[\text{MPa}]$$

Se procede a determinar el factor de apoyo k.

G1 = 10, recomendado por apoyo simple.

$$G_2 = \frac{L_1}{L_2} \quad [27]$$
$$G_2 = \frac{650}{1000} = 0.65$$

Por lo tanto,  $k = 1.8$

Se calcula el radio de giro de la columna para posteriormente calcular su esbeltez.

$$r_{min} = \sqrt{\frac{I_{yy}}{A}} \quad [28]$$

$r_{min}$  = Radio de giro mínimo de la columna, [m].

$I_{yy}$  = Inercia en el eje y, [(10.88 \* 10<sup>-8</sup>)m<sup>4</sup>]

A = Área del perfil seleccionado, [(4.59 \* 10<sup>-4</sup>)m<sup>2</sup>]

$$r_{min} = 0.015 \text{ m}$$

Para calcular la esbeltez de la columna se procede de la siguiente manera:

$$\lambda = \frac{k * h}{r_{min}} < 200 \quad [29]$$

$\lambda$  = Esbeltez de la columna.

k = Factor de apoyo, 1.8

h = Altura de la columna, [1 m].

$r_{min}$  = Radio de giro mínimo de la columna, [0.015 m].

$$\lambda = 116.91 < 200$$

Por lo tanto, se determina el valor del índice de trabajo realizado en la columna.

$$I_a = \frac{f_a}{F_a} < 1 \quad [30]$$

$I_a$  = Valor del Índice de trabajo realizado en la columna.

$f_a$  = Esfuerzo de compresión de la columna, [2.33 MPa].



$F_a$  = Esfuerzo permisible de compresión, [MPa]

$$I_a = <1$$

Con esta información se concluye que las columnas de la estructura están en condiciones de trabajar adecuadamente.

Diseño de vigas.

Se continua con el diseño de las vigas y se analiza la flexión pura mediante la siguiente ecuación:

$$W = \frac{M_{max} * N}{S_y} \quad [31]$$

$W$  = Módulo de la sección en flexión, [ $m^3$ ].

$M_{max}$  = Momento máximo, [261.26 N.m].

$N$  = Factor de seguridad, [2.5]

$S_y$  = Resistencia de fluencia, [248.6 MPa]

$$W = 2.62 * 10^{-6} m^3$$

El perfil seleccionado si cumple con las condiciones de resistencia a la flexión requerida.

### 3.1.8. Determinación de la potencia requerida para el motor.

Para determinar la mínima potencia requerida durante la selección del motor, primero se debe calcular el momento de torsión que existe en cada uno de los cojinetes ubicados en las chumaceras de piso, ya que este momento se opondrá al giro del eje y para realizar el cálculo de esta potencia se utiliza la siguiente ecuación:

$$H = \frac{T * n}{63025} \quad [31]$$

Donde:

$H$  = Potencia del motor (HP)

$T$  = Par de torsión (lb.in)

$n$  = Revoluciones del motor (rpm)

Además, se necesita como primer punto llegar a establecer el valor del momento de torsión mínimo necesario para romper la fuerza de rozamiento presente en los rodamientos. Este cálculo matemático se lo realiza basándonos en la siguiente ecuación:

$$T = \mu * F * \frac{d}{2} \quad [32]$$

Donde:

$T$  = valor del coeficiente de rozamiento del cojinete.

$d$  = valor del diámetro del agujero interior del cojinete [ $m$ ]

$\mu$  = valor de la carga aplicada sobre el cojinete [ $N$ ]

Volviendo a usar la anterior fórmula matemática se determina el torque que existe en uno de los cojinetes así podemos continuar con el cálculo con los siguientes datos:

$$F = 245 \text{ [N]}$$

$$\mu = 0.0015 \text{ (Coeficiente rozamiento para cojinetes de bolas)}$$

$$d = 20 \text{ [mm]}$$

$$T = 0.0015 * 245 * \frac{20}{2} = 3.675 \text{ [N - mm]}$$

$$T = 0.003675 \text{ [N - m]}$$

El valor calculado que se produce en el par torsor es igual para los cuatro cojinetes que poseen las chumaceras, y para analizar el torque total se realiza el siguiente cálculo:

$$T_t = 5 * 0.003675 \text{ [N - mm]}$$

$$T_t = 0.18375 \text{ [N - m]}$$

Aplicando factores de conversión tenemos lo siguiente:

$$T_t = 0.1626324539 \text{ [lbf - in]}$$

Reemplazando en la ecuación para el cálculo de la potencia del motor tenemos lo siguiente:

$$H = \frac{0.1626324539 * 1750}{63025} = 0.004516 \text{ [HP]}$$

Con 0.004516 [HP] se puede vencer la fricción que existe en los cojinetes y así poder transmitir el movimiento a los ejes conductor y conducido, por lo que nos vamos a basar en los diferentes ensayos de fatiga que se realizan en este tipo de máquinas en cumplimiento a la norma ISO 1143 en el que nos dice que el rango de trabajo se lo podrá hacer de 900 hasta 12000 rpm, y para la elección de la potencia motor se toma como referencia la máquina de Moore la misma que en la mayoría de casos posee un motor de 0.5 HP y de 1750 rpm.

### 3.1.9. *Diseño del eje o flecha conductor y conducido*

Los ejes son los encargados de transmitir el par de torsión en una máquina, son elementos cilíndricos que pueden estar fijos o a su vez rotan constantemente, sobre el cual se acoplan diversos elementos mecánicos como poleas, engranes, rodamientos y cualquier otro elemento para transmisión de fuerza. Los ejes están sometidos a diferentes cargas como flexión, tensión, torsión o compresión que se presentan de manera individual o combinada sobre los mismos. (Shigley, y otros, 2008)

Durante el diseño de los ejes que cumplirán la función de conductor y conducido para la

transmisión de potencia, se necesita que el material posea buenas propiedades mecánicas como una alta resistencia a la fatiga, resistencia a la fluencia y una alta dureza, por lo que se puede determinar que el material más apto para nuestro proyecto técnico es acero ASTM A36.

Se procederá a realizar el diseño solamente al eje conductor y el mismo resultado será aplicado para el eje conducido, ya que tienen condiciones equivalentes de funcionamiento, por lo que el material seleccionado anteriormente cumple con las características para el empleo del proyecto además de las ventajas que brinda para su maquinado se acepta este material como válido para iniciar el cálculo revisamos las características del Acero ASTM A36 que se encuentran en la tabla 4-3.

**Tabla 4-3:** Propiedades mecánica acero ASTM A36

Tipo Acero	Maquinado	Esfuerzo a la fluencia	Esfuerzo a la tensión	Módulo de elasticidad	Elongación mínima en 2"
ASTM A36	Laminado en caliente	250 MPa	400-550 Mpa	200 Gpa	23 %

Fuente: Catálogo DIPAC

Iniciamos realizando el diagrama de cuerpo libre del elemento a diseñar, parte fundamental del trabajo ya que este es una representación gráfica utilizada para analizar las fuerzas que actúan sobre un cuerpo libre. El diagrama de cuerpo libre es un caso particular elemental de un diagrama de fuerza. Estos diagramas son una herramienta para descubrir las fuerzas desconocidas que aparecen en las ecuaciones del movimiento del cuerpo. (Meriam, 1998).

El diagrama facilita la identificación de las fuerzas y los momentos que deben tenerse en cuenta para resolver el problema. También se utilizan para el análisis de fuerzas internas que actúan sobre la estructura, tomando en cuenta que el prototipo está sometido a una carga máxima de 50.01 kilogramos, procedemos a realizar el cálculo para determinar el valor del cortante máximo.

$$V_{max} = \frac{Q}{2} \quad [33]$$

$$V_{max} = \frac{50 \text{ Kg}}{2} = 25 \text{ Kg}$$

$$V_{max} = 245 \text{ N}$$

Procedemos a realizar el cálculo del momento flector máximo mediante la siguiente fórmula:

$$M_{max} = \frac{Q}{2} * d_{AB} \quad [34]$$

$$M_{max} = 25 \text{ Kg} * 245 \text{ mm}$$

$$M_{max} = 6125 \text{ Kg} * \text{mm}$$

$$M_{max} = 60065.7 \text{ N mm}$$

En la máquina para ensayo de resistencia a la fatiga, los ejes están sometidos a una determinada

carga lo que hace se produzca un fenómeno de flexión rotativa siendo ésta completamente alternante, por lo que se debe realizar el diseño para cargas estáticas primero y luego para cargas dinámicas.

### 3.1.9.1. Diseño de ejes o flechas sometidos a cargas estáticas.

Los esfuerzos presentes a los que están sometidos los ejes son de flexión y de torsión, los mismos se encuentran en una forma combinada, pero para el presente análisis de cargas estáticas se desprecia el valor del esfuerzo de torsión debido a que es bastante pequeño, tendiendo a ser cero, además de presentarse un esfuerzo cortante, el cual también quedará despreciado ya que dicha aplicación es flexión pura, para ello procedemos a aplicar el teorema de Von Mises referente al esfuerzo a flexión mediante la expresión general en términos del momento flector y del diámetro del eje:

$$\tau_{xy} \approx 0$$

$$\tau_{max} \approx 0$$

Dónde:

$$\tau_{xy} = \text{Esfuerzo por torsión}$$

$$\sqrt{(\sigma_x)^2 + 4(\tau_{xy})^2} = \frac{S_y}{n}$$

[35]

$$\sigma_x = \frac{S_y}{n}$$

$$\sigma_x = \frac{32M_{max}}{\pi d^3}$$

Igualando las ecuaciones

$$\frac{S_y}{n} = \frac{32M_{max}}{\pi d^3}$$

Donde

$$\sigma_x = \text{esfuerzo por flexión}$$

$$d = \text{diametro del eje}$$

Continuamos con el cálculo de los esfuerzos principales.

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2}$$

[36]

Reemplazando se obtiene:

$$\sigma_1 = \sigma_x$$

Por lo tanto:

$$\sigma_1 = \frac{32M_{max}}{\pi d^3}$$

$$\sigma_2 \approx 0$$

$$\sigma_3 \approx 0$$

En este caso se cumple la equivalencia en la relación:

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

El esfuerzo de Von Mises está determinado mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma' = \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad [37]$$

$$\sigma' = \sigma_1 = \sigma_x$$

Despejando obtenemos:

$$\sigma' = \frac{32M_{max}}{\pi d^3}$$

Aplicando el teorema de la energía de la distorsión:

$$n = \frac{S_y}{\sigma'} \quad [38]$$

$$n = \frac{S_y \pi d^3}{32M_{max}}$$

Donde:

$$n = \text{factor de seguridad}$$

Asumiendo un factor de seguridad mínimo de 2 se tiene:

$$S_y = 36 \text{ kpsi} = 40.7993 \text{ Kg} * \text{mm}^2$$

$$2 = \frac{250 * \pi * d^3}{32 * 60065.7}$$

$$d = 16.9787 \text{ mm}$$

Al ser las medidas comerciales 3/4"; 7/8" y 1"; según el proveedor de productos de acero DIPAC, se decide empezar a trabajar para una mayor seguridad con un eje de acero ASTM A36 de 1" de diámetro. Se procede a recalculer el factor de seguridad aplicado al eje de transmisión mediante la ecuación:

$$n = \frac{S_y \pi d^3}{32M_{max}}$$

$$n = \frac{250 * \pi * 25.4}{32 * 60065.7} = 6.69599$$

### 3.1.9.2. Diseño de ejes o flechas sometidos a cargas dinámicas.

Para el análisis del diseño para cargas dinámicas en los ejes de transmisión se considerará el esfuerzo por flexión, ya que en este caso se tomará en cuenta que el eje en rotación soporta un esfuerzo por flexión totalmente alternante y se cumple cuando gira una vuelta completa, para lo cual se procede a calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_a = \frac{32M_a}{\pi d^3} \quad [39]$$

Donde:

$M_a =$  Momento alternante

$\sigma_a =$  Esfuerzo de flexión alterno

Para calcular el momento alternante se procede de la siguiente manera:

$$M_a = \frac{M_{max} - M_{min}}{2} \quad [40]$$
$$M_a = \frac{60065.7 - (-60065.7)}{2} = 60065.7 \text{ Nmm}$$
$$M_a = 531.626242 \text{ lb. in}$$

En esta aplicación el momento medio es cero ya que estamos frente a un caso de flexión pura; es decir:

$$M_m = \frac{M_{max} - M_{min}}{2}$$
$$M_m = \frac{60065.7 - 60065.7}{2} = 0 \text{ Nmm}$$

Para el inicio del prediseño se empieza asumiendo los valores para luego redefinirlos.

$K_f = 1.6$

$n = 2$

$$S_e = 0.5 * 0.6 S_{ut} \quad [41]$$

$$S_e = 0.5 * 0.6(400) = 120 \text{ MPa}$$

Aplicando la teoría de Goodman Modificada mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{S_m}{S_{ut}} + \frac{S_a}{S_f} = 1 \quad [42]$$

Como:

$$M_m = 0 \text{ Entonces } S_m = 0$$

Por lo tanto, la ecuación se redefine de la siguiente manera:

$$\frac{S_a}{S_f} = 1$$

$$S_a = n * \sigma_a$$

Reemplazando en las ecuaciones tenemos lo siguiente:

$$\frac{n * \sigma_a}{S_f} = 1$$

Previamente se definió que:

$$S_f = S_e$$

Entonces tenemos que:

$$\sigma_a = \frac{S_e}{n}$$

Igualando las ecuaciones tenemos que:

$$\frac{32M_a}{\pi d^3} = \frac{S_e}{n}$$

$$d = \left[ \frac{n * 32M_a}{\pi * S_e} \right]^{\frac{1}{3}}$$

[43]

Se procede a realizar el cálculo para determinar los factores de Marin.

### 3.1.9.2.1. Cálculo de factor de superficie [Ka]

Se utiliza la ecuación para el cálculo de factor de superficie y de la tabla se extraen los valores para “a” y “b”, según la Tabla 6-2 de (Shigley, y otros, 2008), en la que nos indica los parámetros en el factor de la condición superficial de Marin y para nuestro estudio se considerará una superficie con un acabado superficial de maquinado o laminado en frío..

$$k_a = a(S_{ut})^b$$

[44]

En este caso,  $S_{ut}$  es el valor de la resistencia mínima a la tensión dada por los catálogos de materiales y los valores de a y b se encuentran descritos en la Tabla 6-2 de (Shigley, y otros, 2008), Pag.274.

Tabla 6-2: Cálculo de factor de superficie

Acabado superficial	Factor a		Exponente b
	$S_{ut}$ kpsi	$S_{ut}$ MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

Fuente: (Shigley, y otros, 2008) Pag.274

$$k_a = 2.7(58.0151)^{-0.265} = 0.920503$$

### 3.1.9.2.2. Cálculo del factor de tamaño [Kb]

Tomando en cuenta que tenemos carga por flexión se utiliza la ecuación para ejes con diámetros entre  $0.11 \leq d \leq 2 \text{ inch}$

$$k_b = \left( \frac{d}{0.3} \right)^{-0.107}$$

[45]

$$k_b = \left(\frac{1}{0.3}\right)^{-0.107} = 0.879128$$

Nuestro resultado se lo toma como válido ya que el eje cilíndrico que está siendo aplicado las cargas en flexión se encuentra realizando trabajos giratorios.

### 3.1.9.2.3. Cálculo del factor de carga [Kc]

En nuestra aplicación los ensayos a fatiga que suceden están bajo la carga de flexión rotatoria, los límites a la resistencia a la fatiga difieren con el  $S_{ut}$ , por lo tanto, se toma la recomendación de (Shigley, y otros, 2008), Pag.277. Al ser un caso de flexión nuestro factor de carga es:

$$k_c = 1 \quad [46]$$

### 3.1.9.2.4. Cálculo del factor de temperatura [Kd]

Para una aplicación bajo régimen de temperatura ambiente tomamos en cuenta la recomendación de (Shigley, y otros, 2008), Pag.277, y para este caso el valor del coeficiente es:

$$k_d = 1 \quad [47]$$

### 3.1.9.2.5. Cálculo del factor de confiabilidad [Ke]

Para el cálculo del factor de confiabilidad nos basamos en los datos que presentaron Haugen y Wirching, por lo tanto, la modificación al factor de confiabilidad aplicable es el siguiente: (Haugen, y otros, 1975)

$$k_e = 1 - 0.08 Z_a \quad [48]$$

Para el cálculo del factor de confiabilidad se utiliza un 99.99%, donde  $Z_a = 3.719$

$$k_e = 1 - (0.08 * 3.719) = 0.70248$$

### 3.1.9.2.6. Cálculo del factor de efectos varios [Kf]

Aunque el factor  $k_f$  tiene el propósito de analizar la reducción del límite de resistencia a la fatiga provocada por los otros efectos, en más bien un recordatorio que estos efectos se deben tomar en cuenta, porque los valores reales de  $k_f$  no están disponibles. (Shigley, y otros, 2008); Pág. 281.

Para este estudio el factor de concentración del esfuerzo por fatiga se define mediante la ecuación:

$$k_f = \frac{\text{esfuerzo - máximo en pieza de prueba - con muesca}}{\text{esfuerzo en la pieza de prueba sin muesca}} \quad [49]$$

La sensibilidad de la muesca está definida por:

$$q = \frac{k_f - 1}{k_t - 1} \quad [50]$$

Para la presente aplicación se aceptará como válida el factor de efectos varios con el valor de 1,00.



### 3.1.9.2.7. Cálculo del límite de resistencia a la fatiga.

Para el caso de los aceros, nos basamos en la gráfica de límites de resistencia a la fatiga recomendada comparada con la gráfica de resistencias a la tensión para aceros aleados y hierros forjados. (Shigley, y otros, 2008); Pág. 270; donde el valor de  $S'_e = 0.5 S_{ut}$ , debido a que el valor del  $S_{ut}$  es menor a 200 kpsi.

$$S'_e = 0.5 S_{ut} \quad [51]$$

$$S'_e = 0.5 * 58.0151 = 29.0076$$

Se procede a aplicar los factores de corrección de Marin

$$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f * S'_e \quad [52]$$

$$S_e = 0.920503 * 0.879128 * 1 * 1 * 0.70248 * 1 * 29.0076 = 16.4985 \text{ [kpsi]}$$

Para poder determinar el diámetro del eje adecuado utilizamos la siguiente fórmula:

$$d = \left[ \frac{n * 32 * M_a}{\pi * S_e} \right]^{\frac{1}{3}} \quad [53]$$

$$d = \left[ \frac{n * 32 * 531.626242}{\pi * 16.4985} \right]^{\frac{1}{3}} = 8.69$$

Se procede a realizar el recalcu del factor de seguridad con el diámetro de 1 in.

$$n = \frac{d^3 * \pi * S_e}{32 * M_a} \quad [54]$$

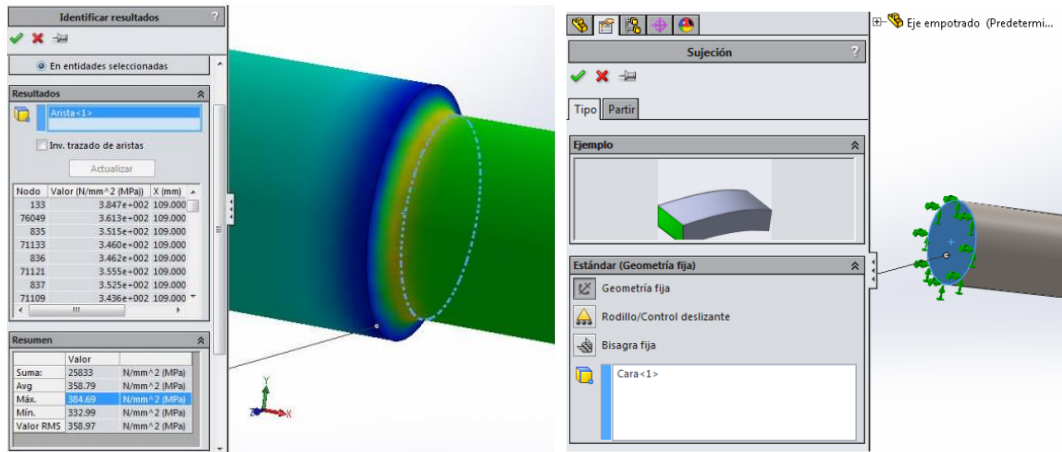
$$n = \frac{1'' * \pi * 164985}{32 * 531.626242} = 30.4676$$

Por lo tanto, el factor de seguridad para un eje de 1 in es de 30.4676, por lo que se puede observar que se encuentra sobredimensionado para el trabajo, por lo tanto, se recomienda reducir el tamaño del diámetro a  $\frac{3}{4}$ ", por lo recalcuremos el factor de seguridad.

$$n = \frac{3/4 * \pi * 164985}{32 * 531.626242} = 22.8507$$

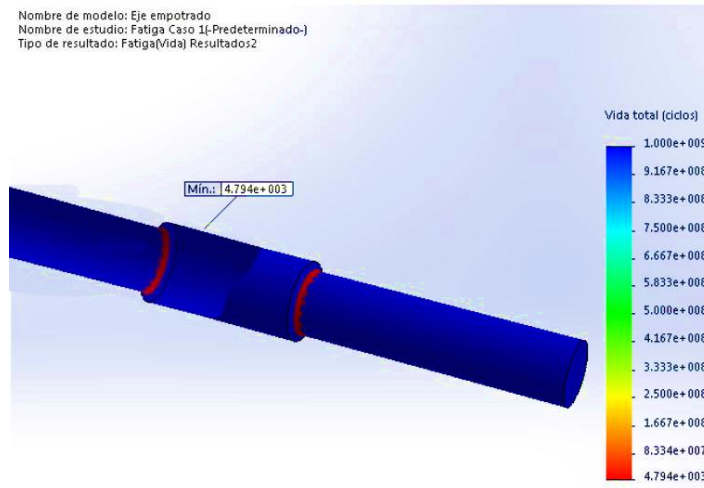
Al ser el valor comercial del eje más pequeño que al momento se encuentra disponible en el mercado se puede trabajar con cualquiera de las dos dimensiones ya que debemos basarnos a la disponibilidad de mercado y análisis de costos.

Una vez realizado el análisis de fatiga del eje empotrado mediante el método clásico, es momento de realizar el análisis mediante SW Simulation, con el fin de ver y comparar los resultados que se obtienen con los obtenidos anteriormente.



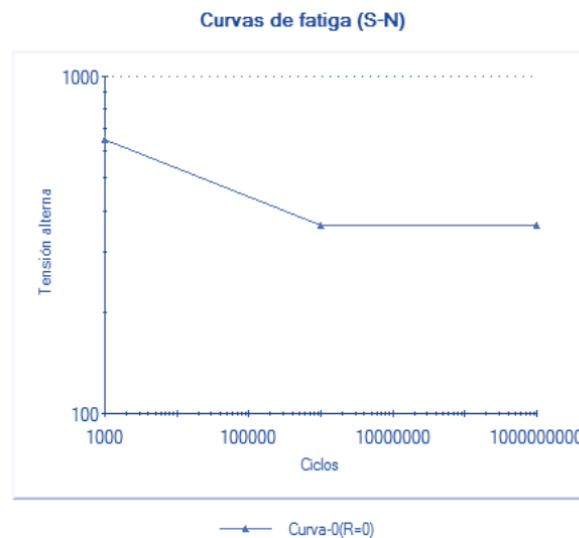
**Figura 14-3:** Simulación SW del eje conductor.

Realizado por: Luis Castagneto F.



**Figura 15-3:** Simulación de esfuerzos a fatiga del eje conductor.

Realizado por: Luis Castagneto F.



**Figura 16-3:** Curva resultante del eje conductor sometido a fatiga.

Realizado por: Luis Castagneto

### 3.1.10. Análisis y Selección de soportes de piso y rodamientos.

El motor eléctrico que se encuentra acoplado a la máquina para el ensayo de fatiga por flexión tiene una velocidad máxima de operación de 1750 rpm y como parte de sus componentes tenemos tres chumaceras de piso colocadas de la siguiente forma, una chumacera con su rodamiento que sirve como soporte para el eje conductor, así mismo una chumacera soporte para el eje conducido y otra que actúa como pivote en la placa móvil. Como el diámetro de los ejes es de 1" se procede a seleccionar un tipo de rodamiento y es igual al diámetro interior de los ejes que soporten las reacciones que actúan sobre los mismos. Dicha selección de rodamientos consiste en determinar básicamente el tipo, tamaño y horas de funcionamiento, para una aplicación específica, además también se debe tomar en cuenta el espacio disponible, disposición y magnitud de las cargas, desalineación angular, velocidad, funcionamiento silencioso, rigidez, desplazamiento.

Observando cada una de las características para los diferentes tipos de rodamientos, así como el aspecto económico y disposición de cargas que son exclusivamente radiales se determina como más adecuado el rodamiento rígido de bolas, para lo cual acudimos al catálogo de rodamientos comercial SKF e iniciamos con el cálculo de la capacidad estática de los rodamientos mediante la siguiente ecuación:

$$C_o = S_o * P_o \quad [55]$$

Donde:

$C_o$  = Capacidad estática de carga, [N].

$S_o$  = Coeficiente de seguridad relativa a la carga estática

$P_o$  = Carga estática equilibrada, [N].

Utilizamos también la ecuación para el cálculo de la capacidad de carga estática equilibrada de rodamientos equivalente:

$$P_o = F_r \quad [56]$$

Donde:

$F_r$  = Carga radial aplicada, [N]

$F_r = 330 \text{ N}$

Entonces:

$$P_o = 330 \text{ [N]}$$

Para esta aplicación tomando un criterio conservador determinamos el coeficiente de seguridad relativa a la carga estática con un valor de 3, para casos de elevada exigencia, por lo tanto, tenemos:

$$C_o = 3 * 330 = 990 \text{ [N]}$$

Posteriormente, se procede a calcular la capacidad de carga dinámica de los rodamientos mediante

la siguiente ecuación:

$$C = P(L_{10})^{1/p} \quad [57]$$

Donde:

$C$  = Capacidad dinámica de carga de los rodamientos, [N]

$P$  = Carga dinámica equivalente, [N]

$L_{10}$  = Vida del rodamiento en millones de revoluciones

$p = 3$ , para rodamientos de bola

Utilizando la ecuación para el cálculo de la igualdad entre carga dinámica y carga radial aplicada, obtenemos la carga dinámica equivalente.

$$P = F_r, \text{ cuando } \frac{F_a}{F_r} < e \quad [58]$$

Por lo tanto:

$$P = 330 \text{ [N]}$$

En el presente cálculo se determina el promedio ponderado de los valores, los mismos que se encuentran en el catálogo de chumaceras y rodamientos *SKF*, para una mayor facilidad de la selección así podemos calcular la vida de un rodamiento:

$$L_{10} = \frac{8000 + 12000}{2} = 10000 \text{ h} \quad [59]$$

Reemplazando valores se obtiene la capacidad dinámica de carga de los rodamientos es igual a:

$$C = 4.1 \text{ [KN]}$$

Se debe tomar en cuenta que los rodamientos necesarios deben ser auto-alineantes, por lo que se seleccionarán los rodamientos con soporte tipo Y, para lo cual sus características se indican en la Tabla 5-3.

**Tabla 5-3:** Características mecánicas de rodamientos soporte tipo Y.

Dimensiones indicadas [mm]					Capacidad de carga dinámica rodamiento[N]	Designación
d	d1	D	B	C	Cr	Sin espaciadores
25,4	33,7	52	34,1	15	10800	YAR 205-100

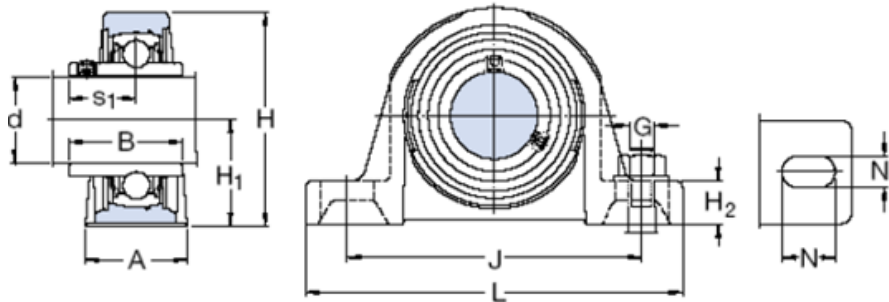
**Fuente:** Catalogo SKF para rodamientos con soporte tipo Y.

Procedemos a seleccionar el soporte para el rodamiento, utilizando el mismo catálogo de SKF, que proporcionará el agarre hacia el piso de sujeción por lo que la chumacera de piso a analizar se presenta en la Tabla 6-3 donde se ven las características de los elementos al completo.

**Tabla 6-3:** Características mecánicas chumacera de piso con rodamiento tipo Y.

Dimensiones indicadas [mm]												
D	A	A1	H	H1	H2	Jmin	Jmax	L	N	N1	G	S1
25,4	36	21	70	36,5	16	94	110	130	19,5	11,5	10	19,8

Fuente: Catalogo SKF para chumaceras de piso tipo Y.



**Figura 17-3:** Dimensiones soporte de pie con rodamiento tipo Y

Fuente: Catálogo SKF

Según la disponibilidad que existe en el mercado local se escoge preferentemente adquirir chumaceras marca SKF de designación UCP 205, la misma que contiene un rodamiento UC 205 que posee una capacidad de carga de 10 800 N, el cual se lo observa en la figura 18-3 y cuyas especificaciones técnicas concuerdan con las necesarias para dicho trabajo.



**Figura 18-3:** Chumacera y rodamiento UC 205.

Fuente: Catálogo SKF

### 3.1.11. Análisis y selección del acople semiflexible.

Uno de los componentes que tiene una gran importancia en la máquina es el acople semiflexible que articula al motor y al eje de transmisión conductor y para una selección adecuada se debe tomar en cuenta los siguientes parámetros:

- Par torsor nominal que se transfiere desde el motor hasta el eje conductor
- Par nominal del acoplamiento o coeficiente de seguridad
- Características de desalineación.

Debido a que los elementos ensamblados en la máquina deben soportar cargas por flexión, se

tiene que colocar un acople flexible que permita una mínima desalineación y tenga la capacidad de absorber las vibraciones esta puede ser seleccionado ya sea de tipo paralela, axial o angular, por este motivo el acoplamiento flexible que se recomienda escoger es uno que posea una composición elastomérica tipo quijada. Este tipo de elemento denominado love joy puede transmitir una potencia de hasta 100 [HP] y a su vez absorber la desalineación que se produce en el sistema, además de tener la capacidad de absorber las vibraciones que se producen en eje que conduce el movimiento.

Para el cálculo del par torsor nominal que se transfiere desde el motor hasta el eje conductor nos valemos de la siguiente ecuación:

$$T = \frac{746(\dot{P})}{W} \quad [60]$$

Donde:

$T$  = Par nominal [ $N \cdot m$ ]

$\dot{P}$  = Potencia del motor [0.5 HP]

$W$  = velocidad angular [209.44 rad / s]

Reemplazando en la ecuación para el cálculo del par nominal de un motor tenemos lo siguiente:

$$T = \frac{746(0.5 \text{ HP})}{209.44 \text{ rad/s}} = 1.78094 [N - m]$$

Luego se procede a calcular el factor de carga, el mismo que se determina mediante la siguiente ecuación:

$$k = k_1 * k_2 * k_3 \quad [61]$$

Donde:

$k$  = Factor de carga

$k_1$  = Irregularidades en el par torsor

$k_2$  = frecuencias de arranque

$k_3$  = número de horas de funcionamiento al día

Reemplazando en la ecuación de los valores de los coeficientes de seguridad para el factor de carga del elemento se tiene que:

$k_1 = 1$  (Línea de ejes)

$k_2 = 1,2$  (Para un máximo 10 arranques por hora).

$k_3 = 1,1$  (Para un lapso de 8 a 16 horas de funcionamiento diario)

$$k = 1.32$$

Posteriormente se procede a realizar el cálculo para determinar el par nominal del acoplamiento basándonos de la siguiente ecuación:

$$T_0 = T * K$$

[62]

Donde:

$T_0$  = Par nominal de acoplamiento [N.m]

$T$  = Par nominal [3.5 N.m]

$K$  = Factor de carga

$$T_0 = 4.62 \text{ N.m}$$

Tomando en cuenta el diámetro de los ejes que es de 20 mm, y luego de haber calculado el par nominal necesario, se procede a seleccionar el mismo utilizando el catálogo del proveedor Lovejoy, por lo tanto, como diseñador conservador se selecciona el tipo de acople L-090. Ya que este acople puede transmitir una potencia de 4 [Hp], un par nominal de 16,3 N. m, y comparando con nuestros cálculos se lo puede tomar como valido, además como principal propiedad está la de absorber el des alineamiento angular en 1° y puede alojar ejes de diámetro que van desde 6.4 mm hasta 25.4 mm., el mismo que se lo puede observar en la figura 3.7 en el que se muestra el acople semiflexible seleccionado para el proyecto.( Lovejoy-in.com, 2019)



**Figura 19-3:** Lovejoy tipo L-090.

Fuente: Lovejoy-in.com

El acoplamiento elástico *Lovejoy tipo L* antes seleccionado, se compone de dos mangones simétricos de acero sinterizado y un componente elástico en forma de estrella. Los mangones disponen de varias aletas, sobre las que queda intercalado el componente elástico. Por lo tanto, se concluye que es un acoplamiento que trabaja con fuerzas de compresión y en el posible caso que se presente una rotura o fisura del componente elástico, todos los elementos siguen acoplados al sistema de transmisión.

### 3.1.12. Análisis y selección del sistema de sujeción de la probeta de ensayo.

La sujeción de la probeta se la realiza a través de un porta brocas (mandril), de ajuste fácil de marca INCCO. Se escoge este tipo de elemento dado que el ajuste se lo realiza solo con la llave de ajuste de mandril de ½” y a medida que avanza el trabajo se realiza un auto ajuste de la broca en este caso de la probeta.

Especificaciones de mandril INCCO.

- Capacidad: 1 - 13mm
- Longitud cerrada: 98mm
- Largo abierto: 87mm
- Diámetro de la manga: 43mm.



**Figura 20-3:** Mandril INCCO.

Fuente: INCCO.

### 3.1.13. Selección de rodamiento de aplicación de carga.

Para la selección del rodamiento se toma en cuenta las siguientes características:

- Velocidad de operación.
- Capacidad de auto alineación.
- Diámetro interno igual a 1”.

Debido a que el trabajo va ser igual o similar al de los otros rodamientos ya seleccionados en la maquina se selecciona el rodamiento T205 de SKF, que cumple con los parámetros de carga antes descritos.



**Figura 21-3:** Chumacera de presión T205.

Fuente: Catálogo SKF

### 3.2. Diagnóstico de vibraciones.

Una vibración se la define como una oscilación mecánica respecto a un punto de referencia, que



da origen a deformaciones y tensiones sobre el material en el que se produce. Las vibraciones están caracterizadas esencialmente por las siguientes variables:

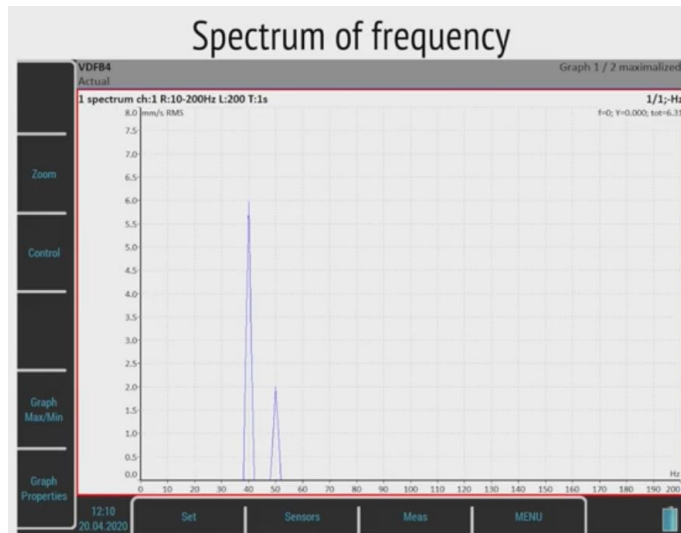
- Frecuencia: número de veces por segundo que se completa el ciclo de oscilación, medido en Hz.
- Amplitud, indica la intensidad de la vibración.
- Sentido de la vibración según las coordenadas x, y, z.

Luego de realizar nuestro diagnóstico de vibraciones se procede a utilizar un vibrómetro SKF CMDT 390-K-S, donde se realiza el diagrama del armónico del motor, donde obtenemos como resultado 0.3 mm/s, valor que está dentro del rango aceptable, para un motor monofásico eléctrico.

Cuando un cuerpo vibra y se pone en contacto con otro, el segundo se ve forzado a vibrar a la misma frecuencia que el original, por ello las vibraciones en este segundo elemento serán vibraciones forzadas. Como sabemos los cuerpos elásticos tienen ciertas frecuencias naturales (frecuencias a las que tiende el material a vibrar), dependientes de las características del propio material del que están compuestos y de las condiciones de contorno a las que están sometidos. Si la vibración de excitación ( $\Omega$ ) que se le transmite coincide o está muy próxima a una de esas frecuencias naturales ( $\omega n$ ) se produce lo que se llama fenómeno de resonancia ( $\Omega = \omega n$ ). Cuando el fenómeno de resonancia ocurre, los niveles de vibración pueden aumentar notablemente y causar daños en el material rápidamente.

Para la elección de los puntos de medición de las vibraciones y el logro de unos datos correctos en el desarrollo del ensayo, hay que tener en cuenta diversos factores y que según la figura 23-3 nos indica los rangos de vibraciones de las diferentes máquinas.

- La superficie de medida debe de ser lo más lisa posible.
- Debe el captador estar en el camino más directo a la fuente generadora de la vibración.
- La masa del medidor no debe ser mayor del 10% de la masa del sistema a analizar.
- Los cables deben estar correctamente extendidos sin pliegues para evitar el ruido en ellos, y realizar una correcta medida.
- No debe de estar deformada la base de colocación.
- Los transductores no pueden estar expuestos a humedad, sustancias corrosivas, campos magnéticos, radiación, ruido acústico, ni altas temperaturas si no están preparados para ello.



**Figura 22-3:** Esquema del armónico del motor

Realizado por: Luis Castagneto F.

Velocidad (mm/s, RMS)	Tipos de máquinas			
	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV
0,18 a 0,28	A	A	A	A
0,28 a 0,45				
0,45 a 0,71				
0,71 a 1,12	B			
1,12 a 1,8		B		
1,8 a 2,8	C		B	
2,8 a 4,5		C		B
4,5 a 7,1	D		C	
7,1 a 11,2		D		C
11,2 a 18			D	
18 a 28				D

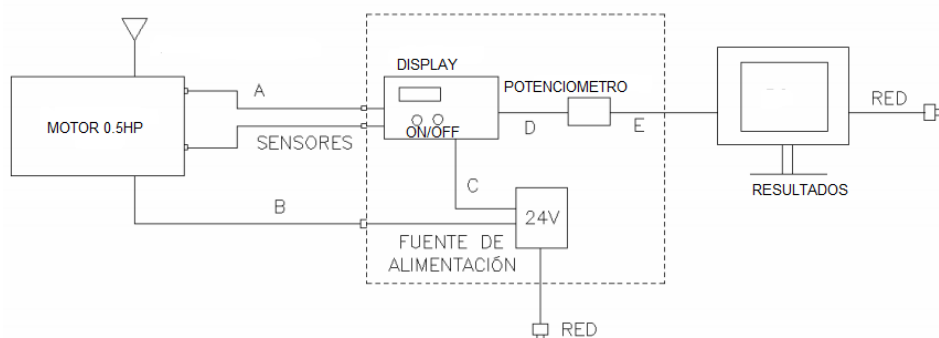
  

A	Buena
B	Satisfactoria
C	Insatisfactoria
D	Inaceptable

**Figura 23-3:** Vibraciones en los diferentes tipos de máquinas

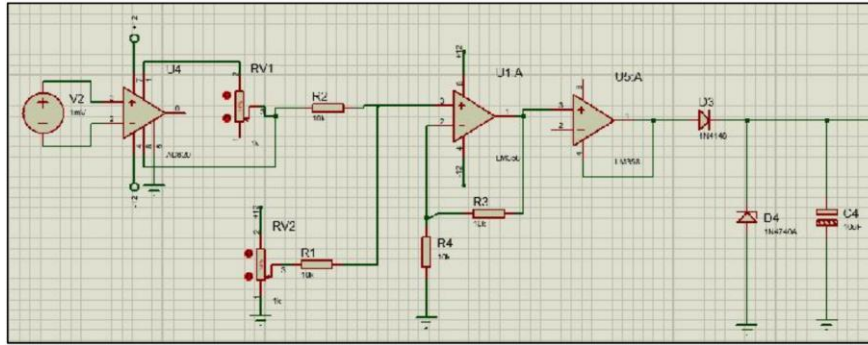
Realizado por: Luis Castagneto F.

### 3.3. Esquema eléctrico a instalarse



**Figura 24-3:** Esquema del sistema eléctrico

Realizado por: Luis Castagneto F.



**Figura 25-3:** Circuito de acondicionamiento interior

**Realizado por:** Luis Castagneto F.

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS.

Una vez que se hizo el diseño de los elementos mecánicos necesarios para el correcto funcionamiento de la maquina se procede a la compra del material, para el posterior mecanizado del material en las diferentes máquinas para tal efecto, indicando los diferentes procesos que se van a realizar para la construcción de los componentes mecánicos.

#### 4.1. Procesos de maquinado para la construcción de los elementos de máquina.

##### 4.1.1. Maquinado en los mandriles.

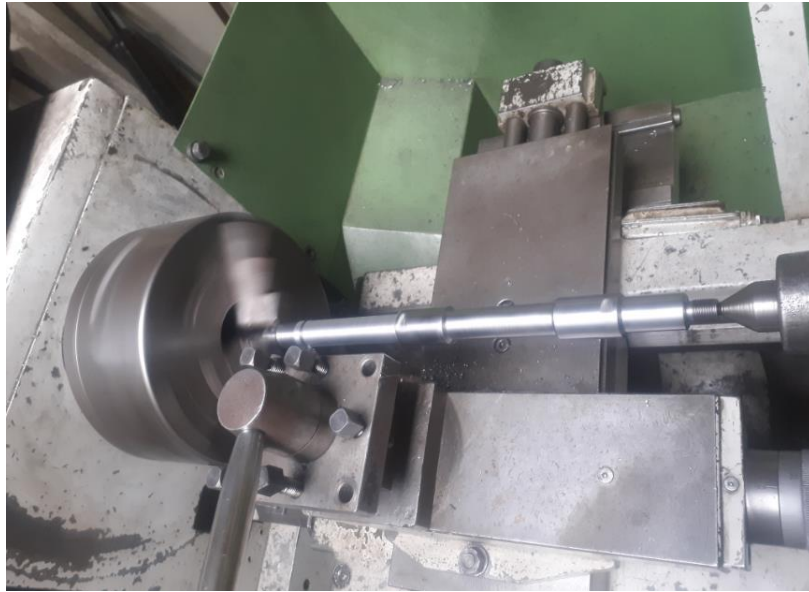
Se procede a rectificar la zona cónica devastando en el torno 20 mm para llegar a la medida del diseño ya que la medida al no ser comercial se procede a realizar este desbaste en el torno, además de realizar un refrentado en la base del mandril dejando la superficie totalmente plana.

##### 4.1.2. Maquinado en los ejes.

Una vez adquirido un eje motriz para el cumplir la función de conductor y conducido, se procede a realizar el corte en los dos sentidos y realizando los siguientes procesos:

- Centrar en el torno el eje motriz.
- Proceder a cortar el eje motriz con la ayuda de una sierra.
- Una vez realizado el corte proceder a separar las piezas y refrentarlas.
- Se procede a señalar con un punto y un martillo el lugar donde se procede a colocar las trampas de los prisioneros.
- Con la taladradora vertical y una broca N°8 se procede a realizar las trampas.
- Con la taladradora vertical y una broca N°10 se procede a realizar la trampa que ensamblará con el acople semiflexible.
- Se coloca en el torno el eje conductor para iniciar a hacer el roscado  $\frac{1}{2}$ " para ensamblar el mandril conductor. (Figura 1-4).
- Se coloca en el torno el eje conducido para iniciar a hacer el roscado  $\frac{1}{2}$ " para ensamblar el mandril conducido. (Figura 2-4).
- Se procede a desbastar el eje conductor y el eje conducido de 1" a  $\frac{3}{4}$ ", en todo el cuerpo del eje, a excepción de la zona ensamblada por las chumaceras y rodamientos.

- Se procede a pulir en la cepilladora eléctrica, retirando los residuos de limallas para darle el acabado superficial final con una lija 400, 600 y 1000. (figura 3-4).



**Figura 1-4:** Maquinado del eje conductor.

Realizado por: Luis Castagneto



**Figura 2-4:** Maquinado del eje conducido.

Realizado por: Luis Castagneto



**Figura 3-4:** Cepillado de los ejes luego del proceso de torneado.

**Realizado por:** Luis Castagneto F.

#### 4.1.3. *Manufactura de la estructura metálica.*

- Se procede a cortar con la sierra eléctrica el tubo rectangular 60\*40\*4, según las dimensiones especificadas. (Figura 4-4).
- Se procede a colocar los puntos de soldadura con electrodo 6011.
- Se procede a realizar los cordones de soldadura con la Soldadura MIG. (Figura 5-4).
- Se procede a cepillar y pasar la moladora para devastar la escoria residual y dejar el acabado superficial final.



**Figura 4-4:** Corte de elementos metálicos.

**Realizado por:** Luis Castagneto F.



**Figura 5-4:** Proceso de soldadura MIG de elementos metálicos.

**Realizado por:** Luis Castagneto F.

#### 4.1.4. Manufactura de las chumaceras de presión.

- Se procede a centrar en el trono la chumacera de presión en el mandril.
- Se coloca el porta roscas en el porta cuchillas del torno.
- Se procede a realizar la rosca correspondiente a  $\frac{1}{2}$ ". (Figura 6-4).
- Se procede a revisar el acople reductor de bronce a ser ensamblado en la rosca.



**Figura 6-4:** Torneado y roscado de chumaceras de presión.

**Realizado por:** Luis Castagneto F.

#### 4.1.5. *Maquinado del porta pesas.*

Una vez adquirido una barra para que cumpla la función de porta pesas, se procede a realizar los siguientes procesos:

- El material seleccionado es una barra de acero galvanizado de ½”.
- Se procede a realizar los cortes con una sierra en dos elementos de 50 cm y un elemento de 30 cm de longitud.
- Se procede a realizar el proceso de soldadura MIG a los elementos indicados, según el esquema del diseño para una porta pesas de máquina de Moore. (Figura 7-4).
- Se procede a pulir en el esmeril y la cepilladora los elementos soldados retirando los residuos de soldadura y dejando lista la pieza para la pintura final.



**Figura 7-4:** Proceso de soldadura MIG en porta pesas.

**Realizado por:** Luis Castagneto F.

#### 4.1.6. *Maquinado del acople semiflexible.*

- Una vez adquirido el acople escogido en el diseño (Figura 8-4), se procede a centrar en el torno el acople semiflexible para proceder a refrentar la superficie
- Se taladra el agujero para que se pueda ensamblar el eje conductor con una broca N°12. (Figura 9-4).
- Se repite este proceso de manufactura en las dos caras del acople semiflexible, para que se ensamble con el motor y el eje conductor.



- Se procede a colocar en la taladradora vertical para hacer los orificios que sujetarán los prisioneros utilizando una broca N°12.
- Se procede a centrar nuevamente en el torno para introducir machuelo y hacer una rosca de 3mm de diámetro.



**Figura 8-4:** Lovejoy tipo L-090

Realizado por: Luis Castagneto F.



**Figura 9-4:** Torneado del Lovejoy tipo L-090

Realizado por: Luis Castagneto F.

#### 4.1.7. *Manufactura de la probeta impresa en 3D*

- Primero se peletizó 120 g de filamento de PLA y 120 g de ABS, el mismo que se realizó en la peletizadora CSG 171T. (Figura 10-4 lit. a).
- Una vez peletizado el material se procedió a secar a una temperatura de 60 °C por un período de 8 horas para eliminar la humedad del material en un Horno Eléctrico Nabertherm. (Figura 10-4 lit. b).
- Una vez secado el material se realizó la impresión de la probeta tomando en cuenta la norma ASTM D671 y D638-02a y se tomó como referencia la probeta tipo I, la cual fue diseñada en software Inventor Profesional. (Figura 11-4).



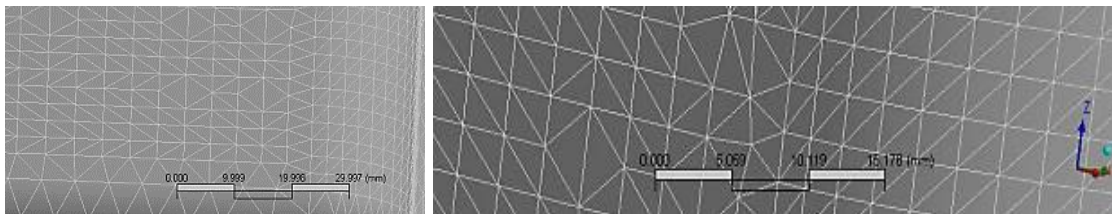
**Figura 10-4:** a) Peletizadora CSG 171T b) Horno Eléctrico Nabertherm

Realizado por: Luis Castagneto



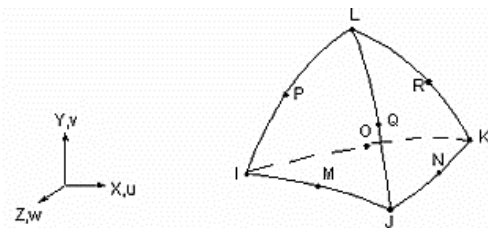
**Figura 11-4:** Probeta impresas en 3D

Realizado por: Luis Castagneto F.



**Figura 12-4:** Control de mallado en las probetas a) PLA b) ABS.

Realizado por: Luis Castagneto F.



**Figura 13-4:** Composición del mallados en las probetas de PLA Y ABS.

Realizado por: Luis Castagneto F.

Los parámetros para el control de mallado en la impresión 3D en los polímeros indicados que se ingresan son los siguientes: (Figura12-4 y 13-4).

- Solid 187
- 10 nodos por elemento
- 3 grados de libertad/nodo
- 13,668 elementos
- 26,053 nodos

## 4.2. Instalación y montaje de los elementos constitutivos de la máquina.

Luego de haber mecanizado los elementos constitutivos de la maquina se procede a su ensamblaje siguiendo el siguiente orden:

### 4.2.1. Montaje de la estructura metálica.

Se inicia con el proceso de soldadura de las columnas de la estructura y las bases de la misma que servirá de soporte de toda nuestra estructura, actividad que se puede observar en la figura 14-4.



**Figura 14-4:** Montaje de las columnas de la estructura metálica.

**Realizado por:** Luis Castagneto F.

### 4.2.2. Montaje de las placas y chumaceras

Para este montaje se procede a colocar la placa de fuerza con chumacera pivote y se procede a unir las juntas con los pernos adecuados, luego se coloca en la parte inferior en su soporte previamente construido y soldado la placa móvil, se coloca de igual manera la chumacera móvil en su soporte y se ajusta la junta con los pernos adecuados. (Figura 15-4).

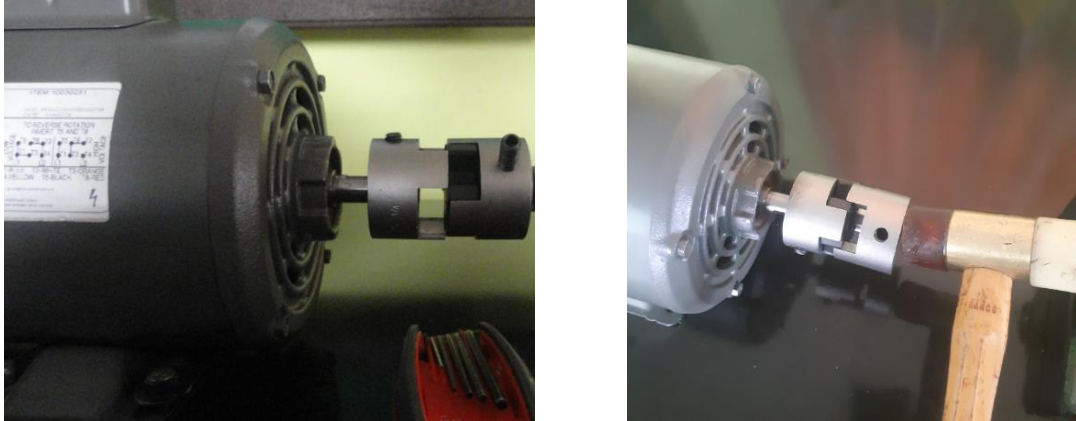


**Figura 15-4:** Montaje de las placas y chumaceras.

**Realizado por:** Luis Castagneto F.

#### 4.2.3. Montaje del acople semiflexible al eje del motor.

Para realizar el montaje del acople semiflexible al eje del motor nos valemos de la ayuda de un martillo de goma y para impedir que se desalinee el eje del acople se colocan dos prisioneros en los alojamientos opuestos del acople (Figura 16-4).



**Figura 16-4:** Montaje del acople semiflexible al eje del motor

Realizado por: Luis Castagneto F.

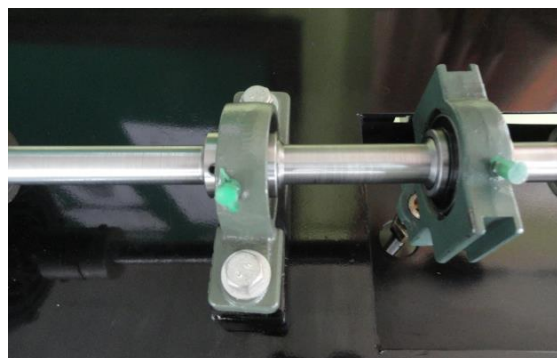
#### 4.2.4. Montaje del eje conductor en la chumacera guía.

Se procede a introducir el eje entre los orificios de las 2 chumaceras, verificando que la distancia entre las mismas sea la calculada y permita generar el momento flector necesario, posterior a ello de igual forma se procede a ajustar los prisioneros que poseen en el filo del cojinete las chumaceras, esto ayudados de una llave hexagonal N° 3.0, de esta manera se evita su desplazamiento innecesario. (Figura 17-4 y 18-4).



**Figura 17-4:** Montaje del eje en las chumaceras guías.

Realizado por: Luis Castagneto F.



**Figura 18-4:** Montaje y ajuste de las chumaceras de presión en los ejes.

Realizado por: Luis Castagneto

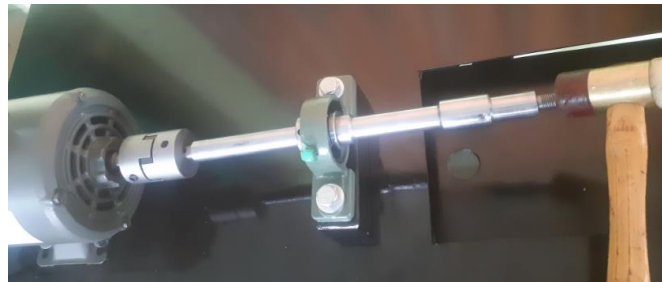
#### 4.2.5. Montaje del eje motriz al acople semiflexible.

Para realizar el montaje del eje motriz se procede a verificar que se encuentre unido el acople semiflexible y ajustado con los prisioneros, verificando también que se alineados los ejes, en esta parte nos ayudamos de un comparador de reloj, también es importante verificar con un nivel digital que las placas que soportan los elementos estén a la misma altura, una vez realizado estos pasos se procede a ajustar el eje con prisioneros y la base del motor con las respectivas arandelas planas, de presión, sus respectivos pernos con tuercas. (Figura 19-4 y 20-4).



**Figura 19-4:** Montaje del motor en el eje de motriz.

**Realizado por:** Luis Castagneto

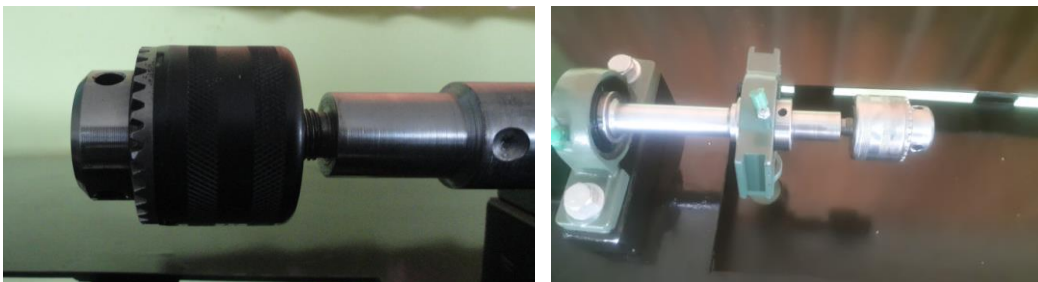


**Figura 20-4:** Acoplamiento del eje al motor eléctrico.

**Realizado por:** Luis Castagneto

#### 4.2.6. Montaje de los mandriles en los ejes.

Se procede a enroskar los elementos previamente mecanizados verificando su ajuste que sea el adecuado para que posteriormente en la etapa de funcionamiento no se presentes inconvenientes, además se debe verificar siempre permanezcan alineados los elementos ensamblados como se aprecia en la figura 21-4.

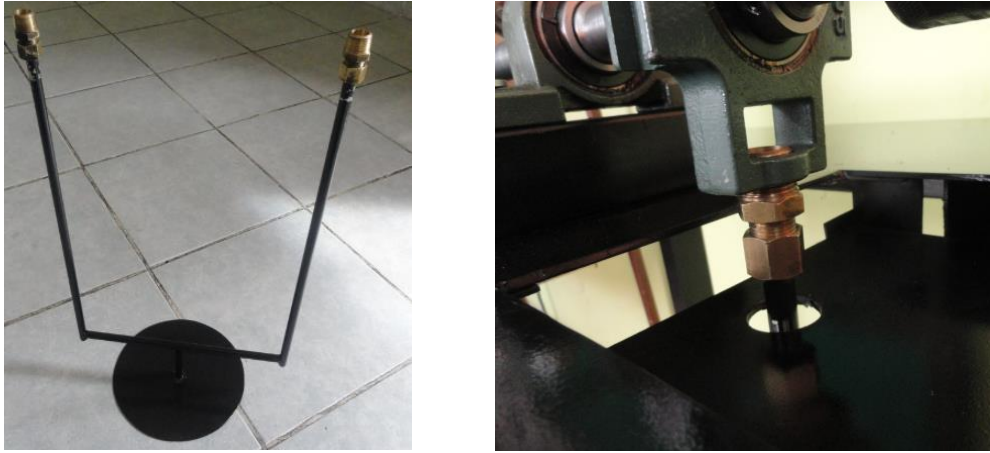


**Figura 21-4:** Montaje de los mandriles en los ejes.

**Realizado por:** Luis Castagneto F.

#### 4.2.7. Montaje del porta pesas con sus respectivas barras y acoples.

Se procede a colocar el casquillo del acople reductor de bronce en la barra de acero galvanizado y se introduce en la rosca cónica del acople, para luego enroscar en la chumacera de presión dispuesta para el mismo. (Figura 22-4).

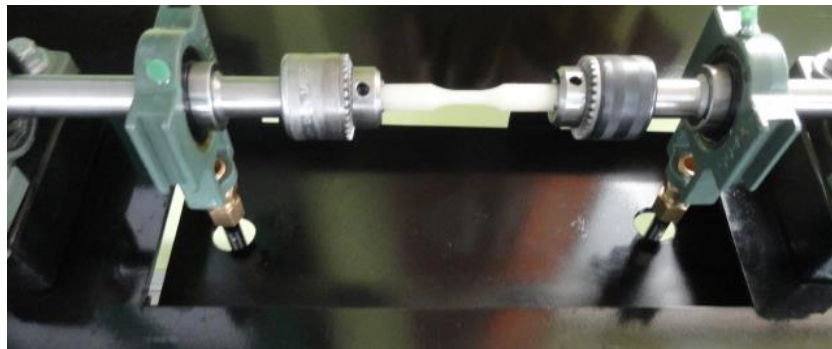


**Figura 22-4:** Montaje del porta pesas con sus respectivas barras y acoples.

**Realizado por:** Luis Castagneto F.

#### 4.2.8. Montaje de la probeta en los mandriles.

Se procede a colocar la probeta de ensayo a fatiga previamente impresa entre las mordazas y se la sujeta a las mismas para de esta manera estar listos para empezar con el inicio del ensayo, como se lo aprecia en la figura 23-4.



**Figura 23-4:** Montaje de la probeta y sujeción en las mordazas.

**Realizado por:** Luis Castagneto F.

#### 4.2.9. Acabado de los elementos mecánicos.

- Se procede a realizar el desbaste final de los elementos ensamblados.
- Se procede a colocar la capa final de pintura mediante el proceso de sopleado.
- Se procede a nivelar las columnas de la estructura para disminuir las vibraciones.

Todos los procedimientos los podemos observar plasmados en la figura 24-4, en el que se presenta un acabado de sus elementos mecánicos.



**Figura 24-4:** Acabado de los elementos mecánicos.

**Realizado por:** Luis Castagneto F.

### 4.3. Validación de resultados.

Una vez que se procede a realizado el ensayo de fatiga se obtienen los siguientes resultados:

**Tabla 1-4:** Validación de resultados

	Experimental	Simulación	%Error
Nº ciclos	7998	8115	1.4417

**Realizado por:** Luis Castagneto F.

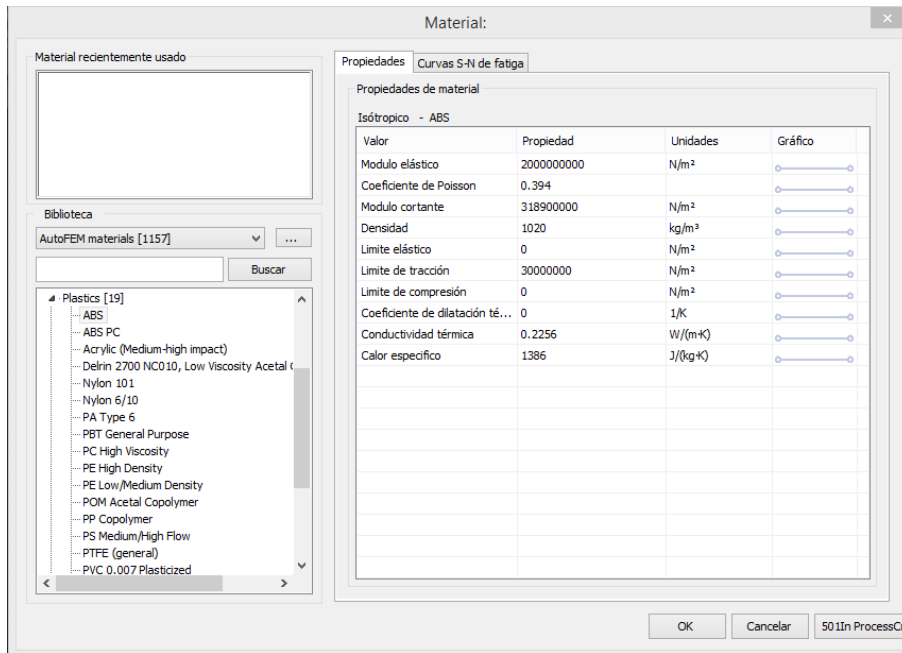
Se puede inferir que el ensayo realizado presenta una confiabilidad del 98.5582%, ya que la curva obtenida tiene un porcentaje de error del 1.4417% en comparación con la curva obtenida en la simulación computacional.

#### 4.3.1. Resultados de las pruebas experimentales.

**Tabla 2-4:** Resultados de pruebas experimentales

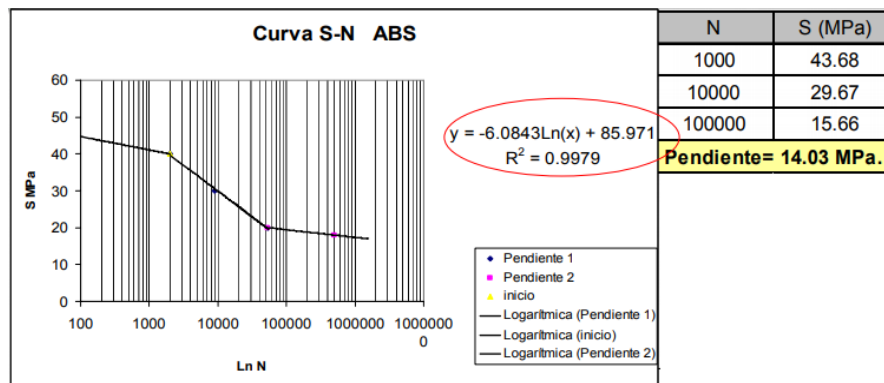
Número probeta	Esfuerzo Mpa	Número ciclos
1	10	8012
2	10	7998
3	10	8042
4	10	8132
5	10	7939
6	10	8009
7	10	7893
8	10	8028
9	10	7932

**Realizado por:** Luis Castagneto F.



**Figura 25-4:** Valores experimentales del ABS según simulación.

Realizado por: Luis Castagneto F.



**Figura 26-4:** Curva S-N experimental del ABS.

Realizado por: Luis Castagneto F.

La curva S-N experimental del ABS, que se la puede observar en la figura 26-4, concuerda con la estudiada en la fase teórica donde su comportamiento es similar, además que los valores ingresados durante la simulación (Figura 25-4), de igual manera concuerdan con los presentados en el ensayo realizado con la probeta impresa en 3D de ABS.



#### 4.4. Estudio de costos.

Se presenta el costo general de los materiales, elementos, partes, piezas y componentes empleados, durante la etapa de construcción e investigación del presente proyecto, por lo que se debe enlistar todos los valores económicos necesarios para la ejecución del proyecto.

##### 4.4.1. Costos directos

Se refieren a todos los costos que están relacionados directamente en la construcción de la máquina para ensayo de fatiga mecánica, es decir los costos de los equipos, materiales, máquinas o herramientas, transporte y mano de obra.

##### 4.4.2. Costo de materiales, elementos, partes y piezas mecánicas

En la tabla 1-5 se enlistan los materiales, elementos, partes y piezas mecánicas utilizados en la construcción de la máquina.

**Tabla 3-4:** Costo de los diferentes materiales, elementos, partes y piezas mecánicas.

Cantidad	Descripción	Unidad	Precio unitario	IVA	Precio total
3.21	Eje de Transmisión ASTM A36 $\varnothing = 1"$	[Kg]	1,68	0,65	6,04
3	Chumaceras UCP 205 - 16 (1") - CMB [UM=Und.]	Unidad	4,46	1,07	15,00
2	Cara Acople L-075 1/4" - Acoples - Love Joy [UM=Und.]	Unidad	19,64	2,36	44,00
1	Cauchos De Acople L-075 - Acoples - Challenge [UM=Und.]	Unidad	8,93	1,07	10,00
2	UCT 205-16 - Chumaceras - CMB [UM=Und.]	Unidad	8,93	2,14	20,00
2	Mandril y Llave de Taladro adaptable 1/2"	Unidad	7,95	0,95	17,80
6	Pernos M12	Unidad	1,00	6,00	6,00
4	Pernos M10	Unidad	1,00	4,00	4,00
2	Niple bronce de cañería $\phi \frac{1}{2}"$	Unidad	4,46	0,54	10,00
12	Arandelas planas M12	Unidad	0,89	0,11	12,00
4	Arandelas planas M10	Unidad	0,89	0,11	4,00
6	Arandelas de presión M12	Unidad	0,89	0,11	6,00
4	Arandelas de presión M10	Unidad	0,89	0,11	4,00
0.61	Plancha Acero Laminado En Caliente 4x8x3mm (1/8)"	Unidad	56,34	6,76	38,74
2	RD Disco Corte 7 X 1/16"	Unidad	1,41	0,17	3,16
2	Tubo rectangular laminado en frío	Unidad	13,39	1,61	30,00
2	Prisioneros $\frac{1}{2}"$	Unidad	0,45	0,05	1,00
1	Cañería acero $\frac{1}{2}"$	metro	5,36	0,64	6,00
34	Espécimen para ensayo fatiga	Unidad	3,57	0,43	136,00
0.5	Pintura sintética	[Ltrs]	4,64	0,56	2,60
0.5	Fondo Uni-Primer	[Ltrs]	8,93	1,07	5,00
4	Lijas	Unidad	1,00	0,12	4,48
0.5	Tiñer	[Ltrs]	1,79	0,21	1,00
1	Spray negro	[Ltrs]	2,23	0,27	2,50
SUBTOTAL 1					389,32

Realizado por: Luis Castagneto F.

#### 4.4.3 Costo de los componentes electrónicos y equipos eléctricos.

En la tabla 2-5 se enlistan los componentes utilizados en el sistema electrónico y equipos eléctricos permitiendo la adecuada operación y adquisición de datos.

**Tabla 4-4:** Costos de los componentes electrónicos y equipos eléctricos.

Cantidad	Unidad	Descripción	Precio unitario	Precio total
1	EA	Sensor de ranura	10,00	10,00
1	EA	Potenciómetro	5,00	5,00
1	EA	Carril DIN	2,00	2,00
1	EA	Canaleta dexson ranurada 25 x 25 (mm)	7,50	7,50
4	MTRS	Cable flexible N°18 rojo	0,25	5,00
4	MTRS	Cable flexible N°12 negro	0,60	2,40
2	MTRS	Cable de control multicolor	2,20	4,40
10	EA	Bornera de riel porta-fusible 2.5 (mm)	0,75	7,50
1	EA	Motor eléctrico monofásico 110/220V	91,00	91,00
SUBTOTAL 2				134,80

**Realizado por:** Luis Castagneto F.

#### 4.4.4 Costo de máquinas y herramientas.

El costo de las máquinas y herramientas utilizados durante los diferentes procesos de mecanizado se detallan en la tabla 3-5.

**Tabla 5-4:** Costo de máquinas y herramientas.

Horas	Descripción	USD/Hora	Precio total
2	Soldadura MIG/TIG	10,00	20,00
5	Torno manual	5,00	25,00
0,5	Compresor pintura	3,00	1,50
3	Amoladora/ esmeriladora	4,50	13,50
1	Taladradora vertical	1,50	1,50
3	Taladro manual	1,50	4,50
10	Herramientas menores de construcción	1,00	10,00
SUBTOTAL 3			76,00

**Realizado por:** Luis Castagneto F.

#### 4.4.5 Costo de mano de obra durante la construcción.

En la tabla 4-5 se detalla el valor económico de mano de obra durante la construcción mecánica y la implementación electrónica del proyecto técnico que se realizó y se detalla el personal que ha trabajado en todas las fases aplicativos hasta la puesta en funcionamiento de la misma. Los valores económicos están referenciados en el salario mínimo del sector manufacturero y eléctrico local (Año 2020).

**Tabla 6-4:** Costo de mano de obra durante la construcción.

Cantidad	Descripción	Horas-Personal	Costo USD	Valor total
1	Técnico mecánico	72	3,75	270
1	Técnico eléctrico	24	4,25	102,00
1	Técnico soldador	20	3,75	75,00
1	Técnico tornero	15	3,75	56,25
1	Mecánicos en general	72	3,00	216,00
SUBTOTAL 4				719,25

**Realizado por:** Luis Castagneto F.

#### 4.4.6 Costo por el transporte de máquinas, materiales y equipos.

Para este cálculo se ha tomado en cuenta el consumo de combustible para el vehículo que realizó la movilización de las diferentes materias primas desde el lugar de adquisición (Acerías) hasta el taller metalmecánico alcanzando un valor económico de 100 USD aproximadamente.

#### 4.4.7 Total costo directo.

En la tabla 5-5 se enlista el costo total que se invirtió en forma directa en el presente proyecto técnico de titulación.

**Tabla 7-4:** Total costo directo

Descripción	Costo USD
SUBTOTAL 1 (Tabla 4-1)	389,32
SUBTOTAL 2 (Tabla 4-2)	134,80
SUBTOTAL 3 (Tabla 4-3)	76,00
SUBTOTAL 4 (Tabla 4-4)	719,25
TRANSPORTE (Tabla 4-5)	100,00
TOTAL	1419,37

**Realizado por:** Luis Castagneto F.

## 4.5 Costos indirectos.

Estos costos están presentes en la fabricación de forma indirecta, en estos se aumenta al valor real del producto los valores económicos por conceptos ingenieriles. Estos valores se presupuestan con un 10% a 15% del costo total, los mismos que se detallan en la tabla 6-5.

**Tabla 8-4:** Costo total indirecto de fabricación

Descripción	Porcentaje	Precio total (\$)
Conceptos Ingenieriles	15%	212,91
Diversos Imprevistos	5%	70,97
Margen de utilidad	0%	0,00
TOTAL		283,88

**Realizado por:** Luis Castagneto F.

#### 4.6 Costos totales.

En la tabla 7-5 se enlistan los costos totales invertidos en el presente proyecto técnico de titulación que representan los totales de los costos directos e indirectos de fabricación tomando en cuenta que en estos valores ya se encuentra agregado el 12% del IVA.

**Tabla 9-4:** Costo total de la construcción de la máquina.

Costos	Valor USD
Directos	1419,37
Indirectos	283,88
TOTAL USD	1703,25

Realizado por: Luis Castagneto F.

Se puede determinar que el valor económico final del proyecto técnico de titulación es de 1703,25 USD.

#### 4.7 Estudio comparativo con máquinas similares.

Dentro del mercado se pueden encontrar una variedad de máquinas que tienen la finalidad de proporcionar datos experimentales del límite de resistencia a la fatiga mecánica, así como objetivos didácticos por lo que el presente proyecto técnico se justifica en torno a que presenta un ahorro significativo en comparación a las proformas solicitadas a los diferentes proveedores internacionales.

Al hacer un estudio comparativo con otras máquinas para ensayos de fatiga mecánica como las solicitadas en las proformas en el mercado inglés y mexicano nos podemos dar cuenta que las mismas que bordean los 12.936,00 USD y considerando que el prototipo desarrollado es totalmente funcional a un costo relativamente bajo (1.703,25 USD). Por lo que el prototipo implementado estaría costando un 21.31 % en comparación a las importadas por lo que se puede considerar que es económicamente ya que nos permite tener un ahorro del 78.69% siendo esto bastante significativo además que se permiten alcanzar los objetivos trazados a un costo relativamente menor, por lo que la máquina para ensayos a fatiga construida es bastante viable en el tema económico.

#### 4.8 Rentabilidad de la máquina de fatiga construida.

La rentabilidad o beneficio neto que nos entrega la máquina se la puede reflejar cuando se realizan los ensayos de resistencia a la fatiga mecánica con las probetas previamente adquiridas, y el estudiante puede aplicar los conocimientos y verificar que el trabajo para la cual fue diseñada esta de acorde a las necesidades que los alumnos de la asignatura requieren, además que con este banco de pruebas en el laboratorio se puede recuperar lo invertido ya que los estudiantes pueden engrandecer sus conocimientos con el transcurso de los periodos académicos.

#### 4.8.1 Estimación de la depreciación.

Se la puede determinar como la curva decreciente del valor económico total de la máquina y para este análisis se toma en cuenta que la tasa de depreciación es del 10%, la misma que está fijada por el Servicio de Rentas Internas. El tiempo límite de vida útil de esta máquina es de 10 años calendarios, por ser considerado como un activo fijo para la institución. En el transcurso de la vida se pueden presentar las siguientes causales considerados factores de la depreciación:

- Factor de falla funcional.
- Daños generados por diversos factores externos
- Daño o deterioro en su aspecto físico.
- Depreciación de su valor económico.

#### 4.8.2 Cálculo de la depreciación.

Para poder realizar el cálculo de la depreciación se consideran las siguientes causales:

- Tiempo de vida útil de la máquina.
- Valor económico de salvamento o residual.
- Método aplicativo para el cálculo de la depreciación.

Tiempo de vida útil de la máquina. - Es la duración estimada que trabajará la máquina en la cual estará directamente beneficiada la entidad adquiriente y para determinar la misma se toma en cuenta la capacidad de operabilidad de la máquina en comparación a los años de duración.

Valor económico de salvamento o residual. - Es una parte del costo del activo fijo que podrá obtener la institución una vez que la máquina haya finalizado su periodo de vida útil aplicada a una venta o permuta, este valor está determinado tomando el valor de compra del activo restando el valor del rescate, para lo cual utilizamos la siguiente ecuación:

$$S = C(1 - d)^n \quad [63]$$

Donde:

S: Valor económico de salvamento o residual [USD]

C: Valor económico inicial del activo [USD]

n: Tiempo de vida útil de la máquina [10 años]

d: Tasa de depreciación [10%]

$$S = 1.703,25(1 - 0.1)^{10}$$

$$S = 593,88$$

Método aplicativo para el cálculo de la depreciación. - Una vez realizado el cálculo del valor residual y el tiempo de vida útil de la máquina, se aplica el método del porcentaje fijo para obtener la depreciación anual del activo.

Método de porcentaje fijo: Consiste en realizar un cálculo mediante un método rápido y confiable en base a un porcentaje fijo en el descuento de la depreciación y para obtener su resultado se aplica la siguiente ecuación:

$$D = \frac{C - S}{n}$$
[64]

Donde:

- D*: Valor de la depreciación anual [USD]
- C*: Valor de costo inicial del activo [USD]
- S*: Valor económico de salvamento o residual [USD]
- n*: Tiempo de vida útil de la máquina [10 años]

$$D = \frac{1709,25 - 593,88}{10} = 111,537 \text{ USD}$$

Una vez realizado dicho cálculo, procedemos a realizar la tabla de depreciación de la máquina, la misma que se encuentra descrita en la tabla 8-5.

**Tabla 10-4:** Depreciación y agotamiento de la máquina de fatiga.

Años	Depreciación anual [USD]	Depreciación acumulada [USD]	Valor contable [USD]
0	0	0	1709,25
1	111,54	111,54	1597,71
2	111,54	223,08	1486,17
3	111,54	334,62	1374,63
4	111,54	446,16	1263,09
5	111,54	557,70	1151,55
6	111,54	669,24	1040,01
7	111,54	780,78	928,47
8	111,54	892,32	816,93
9	111,54	1003,86	705,39
10	111,54	1115,40	593,85

**Realizado por:** Luis Castagneto F.

El valor económico de salvamento o residual en los 10 años de tiempo de vida útil de la máquina es 593,85 USD y el valor de la depreciación anual es 111,54 USD.

## CONCLUSIONES

- Se realizó el estudio de la literatura referente al diseño y construcción de máquinas para ensayos de fatiga mecánica por flexión en polímeros impresos en 3D y nuestro trabajo final fue óptimo y seguro ya que cuenta con una malla de tol perforado protector y práctica ya que su composición es totalmente didáctica y permite al alumno una comprensión de lo que está realizado; por lo que el diseño de esta máquina se ha realizado para las condiciones con la mayor exigencia.
- El funcionamiento de los subsistemas eléctrico y mecánico por los que está constituida la máquina para la realización del ensayo de fatiga mecánica por flexión es satisfactorio, ya que los resultados obtenidos en los ensayos experimentales están dentro de un rango del (0-2,75%) frente a los datos teóricos expuestos por literaturas respecto a la fatiga en polímeros, ya que para aplicaciones didácticas de docencia se los puede tomar como válidos.
- Durante nuestros ensayos realizados en las probetas de ABS, y PLA obtuvimos las gráficas resultantes indicadas en la fase de experimentación y al compararlas con las gráficas del comportamiento de estos materiales los mismos que están referenciadas por la literatura, al hacer la comparación de las mismas con nuestro ensayo obtenemos un margen de error de un 2,75%,
- En el transcurso de la etapa de selección de los materiales se pudo evidenciar que dichos materiales se los pueden encontrar fácilmente en el mercado nacional, ya que en su mayor parte son accesibles, lo que nos facilita la compra de los mismos. Se pudo demostrar que el diseño de esta máquina es totalmente factible, con un precio por debajo de los \$3000.00, en comparación con la máquina cotizada que supera extremadamente el presupuesto inicial.
- Durante la impresión de las probetas para el ensayo se respetaron todas las recomendaciones dadas por los fabricantes para la utilización de polímeros respecto a los diferentes parámetros como temperatura de impresión que para el ABS es de 240°C y para el PLA de 215°C, la cual se encuentra en el rango de fusión del material, y además se adhiere de una mejor manera a la superficie de impresión, de igual forma la velocidad de impresión fue de 60mm/s recomendada por el fabricante para una buena calidad de impresión.
- Durante el análisis de las vibraciones se determinó que para disminuir este aspecto de compensó la misma con peso en la estructura, ya que el material de construcción de la misma permite absorber dichas vibraciones, además, de colocar un polímero elástico en las terminales

de las columnas lo que permite tener una mayor estabilidad a la hora de la puesta en marcha del equipo, por lo que al momento tenemos vibraciones moderadas

#### **RECOMENDACIONES.**

- Se realice un estudio más estricto referente a las vibraciones, ya que permitiría ampliar los conocimientos referentes a esta área del conocimiento tan importante en la formación profesional.
- Se realice un estudio referente a la implementación de mejor sistema de acoplamiento que sea más funcional y práctico, con el fin de no perder el alineamiento en la maquina por el montaje y desmontaje de las probetas entre ensayo y ensayo.
- Se trabaja en obtener el diseño de un sistema que permita obtener la gráfica del comportamiento de la fatiga en forma automática, durante el ensayo.



## **GLOSARIO**

**ABS:** El ABS es un material termoplástico amorfo, es decir que no tiene temperatura de fusión verdadera y esta se encuentra en un rango de 220 a 240°C, y cuenta con buenas propiedades mecánicas haciéndolo uno de los materiales más usados por la tecnología de manufactura aditiva FDM. (Escobar, 2016).

**CAD:** El término CAD que se traduce como Diseño Asistido por Computador (DAC), o Diseño Asistido por Ordenador (DAO), aunque el acrónimo inglés es el más utilizado. En un sentido amplio, podemos entender el CAD como la aplicación de tecnologías de la información y de la comunicación al proceso de diseño. (Mott, 2006)

**CAE:** La Ingeniería asistida por computadora es un modelo geométrico de un producto es el elemento central dentro del concepto de la CAE y consiste en la representación del mismo en la memoria de la computadora. Todos los demás elementos de la CAE utilizan esta descripción geométrica como punto de partida. Ejemplo, el contorno de la pieza puede emplearse para determinar el paso de la herramienta al mecanizarse mediante un sistema de control numérico. (Mott, 2006)

**CAM:** La Fabricación asistida por computadora es un sistema que permite usar computadoras en el proceso de control de fabricación industrial, buscando su automatización. En un sistema moderno, la automatización abarca el proceso de transporte, almacenamiento, mecanizado o conformado, montaje y expedición del producto. (Mott, 2006)

**CNC:** El Control Numérico Computarizado es un sistema que permite controlar en todo momento la posición de un elemento físico. Normalmente una herramienta, que está montada en una máquina. Esto se consigue mediante un programa y un conjunto de órdenes añadidas. (Mott, 2006)

**PLA:** El Ácido Poliláctico es un biopolímero termoplástico cuya molécula precursora es el ácido láctico. Puede obtenerse por dos vías: la química o la biotecnológica. La producción química está basada en la reacción de acetaldehído con ácido cianhídrico para dar así lacto nitrilo, el cual se hidroliza para obtener ácido láctico. La parte biotecnológica está basada en la fermentación de sustratos ricos en carbohidratos por microorganismos. (L. Serna y F. Albán, 2011).

## BIBLIOGRAFÍA

**ALVARRACÍN CÓRDOVA, Jhon Stalin, & LOAYZA HIDALGO, Hermán Patricio.** *Diseño y construcción de un banco para realizar ensayos de fatiga por flexión para los diferentes aceros.* Azuay : (Bachelor's thesis, Universidad del Azuay). 2010. pp. 4-6.

**ANDREWS, E. H.** *Fatigue in polymers and Testing of polymers*, New York, Interscience, Vol. 4, 1967, pp. 237–296.

**AURAS, R. A. (ed).** *Poly (lactic acid): synthesis, structures, properties, processing, and applications*, Vol. 10., 2011. Pp. 25-40.

**BLEDZKI, A. K.; & SPERBER, V. E.** *Comportamientos recientes y aplicaciones de polímeros rellenos de fibra natural.* Cusco , 2007.

**CARRERO, Jairo.** *Establecimiento de un procedimiento para calcular la incertidumbre en ensayos de tracción en barras corrugadas para refuerzo de concreto.* Bogotá : Fundación Universitaria Agraria de Colombia, 2014.

**CASADO DEL PRADO, J. A.** *Comportamiento en fatiga de poliamidas reforzadas con fibra de vidrio corta.* Cantabria : Universidad de Cantabria., 2001. pp. 32-85.

**CEPEDA, A. B.** *Materiales reforzados de poliolefinas recicladas y nanofibras de celulosa de henequén.* Revista Iberoamericana de Polímeros, 2011, pp. 12-15.

**CRAMB, Making.** *Shaping and treating of steel: casting.* Assn of Iron & Steel Engineers. 2003, pp. 2-10.

**DE CIURANA, J.; & SERENÓA, L.** *Selecting process parameters in RepRap additive manufacturing system for PLA scaffolds manufacture.* s.l. : Procedia Cirp, Vol. 5., 2013. pp. 152-157.

**EWING, P. D.; & WILLIAMS, J. G.** *High accuracy machine for combined tension-torsion studies on polymers. Conference on Creep and Creep Rupture in Thermoplastics, Plastic Inst.,* 1974, pp. 2-8.

**ESCOBAR, C.** *Tipos de Impresoras 3d* [En línea] 2016. <https://impresoras3D.com/blogs/noticias/102883975-tipos-de-impresoras-3D>.

**FINDLEY, W. N.; & GJELSVIK, A.** *A versatile biaxial testing machine for investigation of*

*plasticity creep or relaxation of materials under variable loading paths*. s.l. : Ordnance Corps. Dept., of the Army, 1961.

**FONDA, C.** *Guía Práctica para tu primera impresión 3D*, Trieste Italy, 2014, pp. 2-10.

**FPVMAX.** *5 trucos para ahorrar en impresión 3D*. [En línea] 14 de abr de 2017. <http://fpvmax.com/2017/04/14/impresion-3d-barata/>.

**GARCÍA, Jesús.** *Impresoras 3D El Futuro Hoy*. 2014, Obtenido de Impresoras 3D El Futuro Hoy, pp. 1-15.

**GARCIA, Miguel.** *Soldadura tig y mig*. Madrid : Paraninfo, SA, 2014. pp. 2-6.

**GOTHAM, K. V.** *A formalised experimental approach to the fatigue of thermoplastics*. *Plastics and Polymers*, 1969, pp. 309-320.

**HAUGEN, E. B.; & WIRSCHING, P. H.** *Probabilistic Design of Machine Design*. New York : McGraw-Hill Book Company, Vol. 47, 1975. pp. 10-14.

**JONES, R.** *RepRap - the replicating rapid prototyper*, *Robótica*. 1. Vol. 29, 2011, pp. 177-191.

**LADBURY, V. W.** *Biaxially stretched acrylic sheet*. *J. Plastic Inst.* 1960, pp. 184–193.

**LAWRENCE, C. C.** *Multiaxial fatigue of polymethylmethacrylate*. Londres : University of London, 1973, pp.52-69.

**LEET, Kenneth.** *Fundamentos de análisis estructural*. Segunda Edición. 2006. pp. 166-167.

**LIPSON, H. & KURMAN, M.** *La revolución de la impresión 3D; el presente y el futuro de una máquina que puede crear (casi) cualquier cosa*. 2015, Anaya Multimedia (GA).

**MALLON, P. J.** *The creep response of polymers to uniaxial stress and hydrostatic stress systems*. Belfast University, 1969.

**MARSHALL, G. P.; & WILLIAMS, J. G.** *Environmental stress crack growth in low-density polyethylenes*. *Plastics and Polymers*, 1970, pp. 35–101.

**MERIAM, J. L.; & KRAIGE, L. G.** *Mecánica para ingenieros. Dinámica. II*. Barcelona : Reverté, Vol. 2. 1998. pp. 160-190.

**MOTT, R. L.** *Diseño de Elementos de Maquinas*. México: Pearson educación, 2006, pp. 45-89.

**NJUGUNA, K.; & PIELICHOWSKI, J.** *Thermal degradation of polymeric materials*. Smithers

Rapra Publishing, 2005, pp. 6-27.

**ÑAUTA ÑAUTA, Adrián Eugenio ; & VERGARA IDROVO, Marcelo Roberto.** *Simulación de termofluidos de PLA natural y ABS en el proceso de impresión en 3D.* Cuenca : Master's thesis, 2017, pp. 18-49.

**ONORAN, K.; & FINDLEY, W. N.** *Combined stress creep experiments on visco-elastic materials with abrupt changes in state of stress.* London : Proc. Instn mech, 1963.

**ORTIZ BERROCAL, Luis.** *Resistencia de materiales.* Madrid : McGraw-Hill, 2007 pp.45-90.

**PLUMBRIDGE, W. J.** *Fatigue-crack propagation in metals and polymeric materials.* 1972, pp. 939-962.

**POWELL, P. ; & TURNER, S.** *The transformation of research results into design practice.* Plastics and Polymers, 1971, pp. 261–266.

**POWELL, P. C.** *Prediction of end-product performance.* Plastics and Polymers, 1971, págs. 43-52.

**RAULINO, B. R.** *Manufatura aditiva: desenvolvimento de uma máquina de prototipagem rápida baseada na tecnologia FDM.,* 2017, pp. 19-28.

**REN, Jie.** *Poli (ácido láctico) biodegradable: síntesis, modificación, procesamiento y aplicaciones.* Shanghai : Springer Science & Business Media., 2011, pp. 2-5.

**ROBERTSON, A.; & NEWPORT, A. J.** *Report on the drop of stress at yield in armco iron.* London : Report Memoranda Aero. M.56 Committee, 1927, pp. 3-9.

**ROMERO BARRENO, C. E.; & VACA MORALES G. O.** *Construcción de una impresora 3D para la elaboración de objetos plásticos utilizando el método de modelado por deposición fundida (MDF),* Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2015, pp. 25-42.

**RODRÍGUEZ, J.; & RESTREPO, D.** *Caracterización de propiedades mecánicas de piezas en ABS en función de parámetros de proceso de Manufactura aditiva FDM.* Madrid, XXI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, 2016.

**RODRÍGUEZ, Martí.** *Estudio sobre la optimización de los parámetros de fabricación en una impresora 3D con tecnología FDM.* Universitat Politècnica de Catalunya, 2017, pp. 36-49.

**SALVADOR, M. D. (ed).** *Thermal analysis of polymer resin matrix reinforced with E-glass fibers degraded in neutral environment.* Valencia : Proceedings of 11th European conference

on composite materials, 2004.

**SERNA, L. & ALBÁN, F.** *Ácido poliláctico (PLA): Propiedades y aplicaciones*. 1. s.l. : Ing. Compet, Vol. 5, 2011, pp. 16 - 26.

**SHIGLEY, J. E. (ed).** *Diseño en ingeniería mecánica J. E. Shigley y L. D. Mitchell*. 8va. Rochester : McGrae Hill, 2008. pp. 266.

**TAUCHERT, T. R.; & AFZAL, S. M.** *Heat generated during torsional oscillation of polymethylmethacrylate tubes*. 1ra. ed., 1967, pp. 28-31.

**THOMAS, D. A.** *Uniaxial compressive creep studies*. *Plastics and Polymers*, 1969, pp. 485–492.

**TURNER, S.** *ICI Research Laboratories*. Welwyn Garden City, Creep studies on plastics, 1971, pp. 213–239.

**WONG, W. S. (ed).** *Superficies de autolimpieza ultraduraderas y transparentes mediante autoensamblaje a gran escala de redes poliméricas jerárquicas interpenetradas*. Australia : *Materiales e interfaces aplicados por ACS*, Vol. 8, 2016. pp. 258-259.