

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



## FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

### CENTRO DE ESTUDIOS DE POSGRADO

#### MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO

---

**Tema:** “Estudio del comportamiento a fatiga mecánica del Teflón y Nylon para determinar la relación esfuerzo - número de ciclos bajo la aplicación de cargas variables y su influencia en el diseño de máquinas”

---

Trabajo de Investigación

Previa a la obtención del Grado Académico de Magister en Diseño  
Mecánico

**Autor:** Ing. Jorge Patricio Guamanquispe Toasa

**Director:** Ing. M.Sc. Telmo Jesús Gerardo Moreno Romero

Ambato - Ecuador

2012

## AL CONSEJO DE POSGRADO DE LA UTA

El tribunal receptor de la defensa del trabajo de investigación con el tema: “Estudio del comportamiento a fatiga mecánica del Teflón y Nylon para determinar la relación esfuerzo - número de ciclos bajo la aplicación de cargas variables y su influencia en el diseño de máquinas”, presentado por: Ing. Jorge Patricio Guamanquispe Toasa y conformado por: Ing. Mg. Edison Viera Alulema, Ing. Mg. Manolo Córdova Suárez e Ing. Mg. Pablo Valle Velasco, Miembros del Tribunal, Ing. M.Sc. Telmo Jesús Moreno Romero, Director del trabajo de investigación y presidido por: Ing. Mg. Francisco Pazmiño Gavilanes Presidente del Tribunal; Ing. Mg. Juan Garcés Chávez Director del CEPOS – UTA, una vez escuchada la defensa oral el Tribunal aprueba y remite el trabajo de investigación para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.

-----  
Ing. Mg. Francisco Pazmiño Gavilanes  
Presidente del Tribunal de Defensa

-----  
Ing. Mg. Juan Garcés Chávez  
DIRECTOR CEPOS

-----  
Ing.M.Sc. Telmo Jesús Moreno Romero  
Director de Trabajo de investigación

-----  
Ing. Mg. Edison Viera Alulema  
Miembro del Tribunal

-----  
Ing. Mg. Manolo Córdova Suárez  
Miembro del Tribunal

-----  
Ing. Mg. Pablo Valle Velasco  
Miembro del Tribunal

## AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el trabajo de investigación con el tema “Estudio del comportamiento a fatiga mecánica del teflón y nylon para determinar la relación esfuerzo - número de ciclos bajo la aplicación de cargas variables y su influencia en el diseño de máquinas”, nos corresponde exclusivamente al Ingeniero Jorge Patricio Gamanquispe Toasa y al Ingeniero M.Sc. Telmo Jesús Gerardo Moreno Romero Director del Trabajo de investigación; y el patrimonio intelectual de la misma a la Universidad Técnica de Ambato.

-----

-----

Ing. Jorge Patricio Gamanquispe Toasa    Ing. M.Sc. Telmo Jesús Moreno Romero

Autor

Director de Tesis

## **DERECHOS DE AUTOR**

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este trabajo de investigación o parte de él un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de trabajo de investigación, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de esta, dentro de las regulaciones de la Universidad.

-----  
Ing. Jorge Patricio Guamanquispe Toasa

## DEDICATORIA

Esta obra lo dedico a todas aquellas personas que se interesen en el estudio del comportamiento a fatiga de los polímeros, en especial a los alumnos de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, así como también a personas particulares que deseen obtener información necesaria para diseñar elementos de máquinas sometidos a esfuerzos fluctuantes.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a las autoridades de la Universidad Técnica de Ambato, especialmente las autoridades de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica quienes gestionaron para que se lleve a cabo el Programa de Maestría en Diseño Mecánico.

## ÍNDICE

### PAGINAS PRELIMINARES

Portada .....	i
Al Consejo de Posgrado de la UTA .....	ii
Autoría de la investigación .....	iii
Derechos de autor .....	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimiento .....	vi
Índice .....	vii
Paginas preliminares y contenido .....	vii
Tablas .....	xi
Figuras.....	xi
Resumen .....	xix
Summary .....	xx

### CONTENIDO

1. El problema.....	1
1.1 Tema: .....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	1
1.2.1 Contextualización .....	1
1.2.2 Análisis crítico.....	4
1.2.3 Prognosis.....	4
1.2.4 Formulación del problema .....	5
1.2.5 Preguntas directrices .....	5
1.2.6 Delimitación del problema.....	5
1.3 Justificación.....	6
1.4 Objetivos de la investigación .....	7

1.4.1	Objetivo general:	7
1.4.2	Objetivos específicos:	7
2.	Marco teórico	8
2.1	Antecedentes investigativos	8
2.1.1	Antecedentes	8
2.1.2	Fundamento teórico	10
2.2	Fundamentación filosófica	47
2.3	Fundamentación legal	48
2.4	Categorías fundamentales	49
2.5	Hipótesis	49
2.6	Señalamiento de variables	49
2.6.1	Variable dependiente:	49
2.6.2	Variable independiente:	49
3.	Metodología	50
3.1	Enfoque	50
3.2	Modalidad básica de la investigación	50
3.2.1	De campo	50
3.2.2	Bibliográfico	51
3.2.3	Experimental	51
3.3	Nivel o tipo de investigación	51
3.3.1	Exploratoria	51
3.3.2	Descriptivo	51
3.3.3	Asociación de variables	52
3.4	Población y muestra	52
3.5	Operacionalización de las variables	54
3.5.1	Variable Independiente:	54
3.5.2	Variable dependiente:	55

3.6 Recolección de la información.....	56
3.6.1 Observación.....	56
3.7 Procesamiento y análisis.....	56
3.7.1. Plan de procesamiento .....	56
3.7.1. Plan de análisis e interpretación de resultados.....	57
4. Análisis e interpretación de resultados .....	59
4.1 Determinación de parámetros de investigación.....	59
4.1.1 Determinación del tamaño de muestra .....	59
4.1.2 Verificación de la frecuencia de aplicación de esfuerzo .....	59
4.1.3 Relación de esfuerzo .....	61
4.1.4 Análisis de deflexión .....	63
4.2 Registro de datos .....	68
4.2.1 Datos de deflexión .....	68
4.2.2 Datos de Temperatura Vs Número de ciclos .....	71
4.3 Análisis estadísticos de los ensayos con probetas de Nylon.....	72
4.3.1 Relación temperatura – número de ciclos para el Nylon.....	73
4.3.2 Corrección del esfuerzo con la temperatura .....	79
4.3.3 Regresión S-N para el Nylon .....	82
4.3.4 Intervalos de confianza para el Nylon.....	88
4.4 Análisis estadísticos de los ensayos con probetas de Teflón.....	90
4.4.1 Relación Temperatura – Número de ciclos para el Teflón.....	91
4.4.2 Corrección del esfuerzo con la temperatura para el Teflón .....	95
4.4.3 Regresión para el teflón.....	98
4.4.4 Intervalos de confianza.....	104
4.5 Demostración de la Hipótesis.....	106
4.5.1 Demostración de la hipótesis para el Nylon.....	106
4.5.2 Demostración de la hipótesis para el Teflón.....	110

5.	Conclusiones y recomendaciones .....	113
5.1	Conclusiones .....	113
5.2	Recomendaciones .....	114
6.	Propuesta .....	116
6.1	Datos Informativos .....	116
6.2	Antecedentes de la propuesta.....	118
6.3	Justificación.....	119
6.4	Objetivos .....	120
6.4.1	Objetivo general.....	120
6.4.2	Objetivos específicos.....	120
6.5	Análisis de factibilidad .....	120
6.6	Fundamentación.....	121
6.6.1	Determinación de parámetros de funcionamiento .....	121
6.6.2	Funcionamiento de la máquina.....	123
6.6.3	Diseño y selección de los elementos.....	125
6.7	Metodología, Modelo operativo .....	145
6.7.2	Eje .....	147
6.7.3	Biela.....	148
6.7.4	Mordaza.....	149
6.7.5	Soporte de la probeta .....	150
6.7.6	Base del motor.....	151
6.7.7	Bancada.....	151
6.7.8	Maquinaria y equipo utilizado .....	152
6.8	Administración.....	153
6.8.1	Costos directos .....	153
6.9	Previsión de la evaluación.....	155
	Bibliografía.....	157

1. Anexo A.....	160
Formatos .....	160
2. Anexos B .....	163
Probetas .....	163
3. Anexo C.....	164
Propiedades de los polímeros .....	164
4. Anexo D.....	171
Tablas y gráficas .....	171
5. Anexo E .....	172
6. Anexo F .....	174
7. Anexo G.....	177
8. Anexo H.....	181
9. Anexo fotos.....	182
10. Anexo Planos.....	183

## **TABLAS**

Tabla 2-1 Propiedades mecánicas del Nylon 310 (Schwartz Technical Plastics LAMIGAMID® 310 Cast Polyamide 6, Conditioned).....	32
Tabla 2-2 DuPont™ Teflon® FEP 5100 Fluoropolymer Resin.....	35
Tabla 3-1 Valores de Z más utilizados, según el valor de $\alpha$ .....	53
Tabla 4-1 Determinación del tamaño de muestra .....	59
Tabla 4-2 Determinación de la frecuencia de aplicación de cargas .....	60
Tabla 4-3 Datos estadísticos para las revoluciones.....	61
Tabla 4-4 datos estadísticos para la frecuencia.....	61
Tabla 4-5 Datos de ensayo del Nylon .....	69

Tabla 4-6 Datos de ensayo del Teflón .....	70
Tabla 4-7 Registro de Temperatura Vs N para el Nylon .....	71
Tabla 4-8 Registro de Temperatura Vs N para el Teflón .....	72
Tabla 4-9 Relación Esfuerzo - Número de ciclos para el Nylon .....	73
Tabla 4-10 Tabla de regresión para la T Vs Log N para el Nylon .....	76
Tabla 4-11 Constantes de regresión para el Nylon.....	77
Tabla 4-12 Factor de corrección de E por temperatura .....	79
Tabla 4-13 Corrección del esfuerzo con la temperatura .....	80
Tabla 4-14 Valores de regresión Nylon.....	84
Tabla 4-15 Resumen de regresión.....	87
Tabla 4-16 Relación Esfuerzo - Número de ciclos para el Teflón .....	91
Tabla 4-17 Tabla de regresión para la T Vs Log N para el Teflón .....	93
Tabla 4-18 Constantes de regresión para el Teflón .....	93
Tabla 4-19 Factor de corrección de E por temperatura para el Teflón.....	95
Tabla 4-20 Corrección del esfuerzo con la temperatura para el Teflón ...	96
Tabla 4-21 Valores de regresión para el Teflón.....	100
Tabla 4-22 Resumen de regresión.....	103
Tabla 4-23 Esfuerzos esperados y calculados.....	106
Tabla 4-24 Cálculo de los valores relacionados.....	107
Tabla 4-25 Valores del estadístico.....	109
Tabla 4-26 Cálculos para la demostración de la hipótesis para el Teflón .....	111

Tabla 6-1 Costos directos .....	154
Tabla 6-2 Costos por mano de obra .....	154
Tabla 6-3 Costos de material para ensayos .....	155
Tabla 6-4 Costos totales .....	155

## **TABLAS DE ANEXOS**

Formato 1-1 Formato para toma de datos para ensayo a fatiga.....	161
Formato 1-2 Formato para toma de datos para determina la relación T - N .....	162
Tabla 3-1 Propiedades de Polímeros comunes .....	164
Tabla 3-2 Propiedades de Polímeros comunes (continuación).....	165
Tabla 3-3 Propiedades Mecánicas de la Poliamida .....	166
Tabla 3-4 Propiedades mecánicas del Teflón .....	167
Tabla 3-5 Datos de algunas Poliamidas .....	168
Tabla 3-6 Propiedades del Teflón.....	168
Tabla 3-7 Propiedades mecánicas del Nylon 310 (Schwartz Technical Plastics LAMIGAMID® 310 Cast Polyamide 6, Conditioned).....	169
Tabla 3-8 DuPont™ Teflon® FEP 5100 Fluoropolymer Resin.....	170
Tabla 4-1 Tabla t-Student .....	171
Tabla 5-1 Arranque de motores .....	172
Tabla 5-2 tabla para la selección de motores eléctricos trifásicos .....	173
Tabla 5-3 Selección de cables para motores.....	173
Tabla 6-1 Factores a y b para determinar el factor de acabado .....	174

Tabla 6-2 Factor Kb .....	174
Tabla 6-3 Factor de temperatura .....	175
Tabla 6-4 Factor de confiabilidad.....	175
Tabla 6-5 Factor de sensibilidad a las muescas .....	176
Tabla 7-1 Factor Fl.....	177
Tabla 7-2 Factor de confiabilidad.....	177
Tabla 7-3 Selección de rodamientos.....	180

## **FIGURAS**

Figura 2-2-1 Relación de esfuerzo Vs número de ciclos hasta la falla.....	13
Figura 2-2 Máquina de probeta rotatoria de Moore para ensayo a Fatiga	13
Figura 2-3 Máquina para ensayo a fatiga de polímeros.....	14
Figura 2-4 Curva esfuerzo versus número de ciclos.....	26
Figura 2-5 Monómero del Nylon.....	29
Figura 2-6 Monómero del Teflón.....	33
Figura 2-7 Viga en flexión .....	35
Figura 2-8 Amplitud de esfuerzo .....	36
Figura 2-9 Curvas de Wöhler (S-N) según norma DIN 53442 (a), usando PA como ejemplo (b) .....	39
Figura 2-10 Amplitud de esfuerzo Vs número de ciclos.....	39
Figura 2-11 Efecto de la temperatura sobre el módulo de elasticidad para la Poliamida .....	41

Figura 2-12 Efecto de la temperatura sobre el módulo de elasticidad para el Teflón .....	41
Figura 2-13 Probeta Tipo A para ensayo a fatiga de polímeros.....	42
Figura 2-14 Probeta Tipo B para ensayo a fatiga de polímeros.....	43
Figura 2-15 Máquina para ensayo a fatiga de polímeros.....	44
Figura 2-16 Operacionalización de variables.....	49
Figura 4-1 Deformación de la probeta .....	62
Figura 4-2 Variación de esfuerzo.....	62
Figura 4-3 Probeta.....	64
Figura 4-4 Diagrama de fuerza cortante y momento flector.....	65
Figura 4-5 Relación de temperatura Vs número de ciclos para el Nylon .	74
Figura 4-6 Relación de temperatura Vs log del número de ciclos para el Nylon.....	74
Figura 4-7 Relación S Vs N para el Nylon .....	81
Figura 4-8 Relación S Vs Log N para el Nylon .....	81
Figura 4-9 Relación Log S Vs Log N para el Nylon.....	82
Figura 4-10 Relación Esfuerzo – Número de ciclos para el Nylon.....	85
Figura 4-11 Relación Esfuerzo – Log número de ciclos para el Nylon.....	86
Figura 4-12 Relación de temperatura Vs número de ciclos para el Teflón .....	92
Figura 4-13 Relación de temperatura Vs log del número de ciclos para el Teflón.....	92
Figura 4-14 Relación S Vs N para el Teflón.....	97

Figura 4-15 Relación S Vs Log N para el Teflón.....	97
Figura 4-16 Relación Log S Vs Log N para el Teflón.....	98
Figura 4-17 Relación Esfuerzo – Número de ciclos para el teflón .....	101
Figura 4-18 Relación Esfuerzo – log número de ciclos para el Teflón...	102
Figura 4-19 Curva de probabilidad a una cola .....	108
Figura 4-20 Curva de probabilidad a una cola .....	112
Figura 5-1 Tipo de falla en probeta de Nylon .....	114
Figura 5-2 Tipo de falla en probeta de Teflón .....	114
Figura 6-1 Máquina para ensayo a fatiga de polímeros.....	117
Figura 6-2 Probeta Tipo A para ensayo a fatiga de polímeros.....	117
Figura 6-3 Probeta Tipo B para ensayo a fatiga de polímeros.....	118
Figura 6-4 Mecanismo de la máquina de ensayos.....	122
Figura 6-5 Deformación de la probeta .....	122
Figura 6-6 Esfuerzo aplicado a la probeta .....	123
Figura 6-7 Estructura de la máquina.....	123
Figura 6-8 Arrancador de motor.....	124
Figura 6-9 Circuito electrónico para contar el número de vueltas.....	124
Figura 6-10 Disco.....	125
Figura 6-11 Parámetros para calcular la inercia de un disco .....	126
Figura 6-12 Balancín.....	130
Figura 6-13 Biela.....	135

Figura 6-14 Soporte de la probeta .....	143
Figura 6-15 Recomendaciones de alturas de trabajo. ....	144
Figura 6-16 Cubo del disco.....	145
Figura 6-17 Disco.....	146
Figura 6-18 Disco completo .....	146
Figura 6-19 Balancín.....	147
Figura 6-20 Eje .....	147
Figura 6-21 Eje completo .....	148
Figura 6-22 Alojamiento del rodamiento .....	148
Figura 6-23 Ojal de la biela.....	149
Figura 6-24 Biela.....	149
Figura 6-25 Mordaza.....	150
Figura 6-26 Cuerpo del soporte .....	150
Figura 6-27 Soporte .....	151
Figura 6-28 Bancada .....	152
Figura 6-29 Máquina.....	152

## **FIGURAS DE ANEXOS**

Figura 2-1 Probeta Tipo A para ensayo a fatiga por flexión de polímeros .....	163
Figura 2-2 Probeta Tipo B para ensayo a fatiga por flexión de polímeros .....	163
Figura 7-1 Viscosidad relativa y de servicio .....	178

Figura 7-2 Factor $a_{23}$ .....	179
Figura 7-3 Factor de limpieza .....	179
Figura 8-1 Simbología de soldadura .....	181
Figura 9-1 Máquina.....	182
Figura 9-2 Probetas .....	182
Figura 9-3 Probeta deformada.....	182

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**CENTRO DE ESTUDIOS DE POSGRADO**  
**MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A FATIGA MECÁNICA  
DEL TEFLÓN Y NYLON PARA DETERMINAR LA RELACIÓN  
ESFUERZO – NÚMERO DE CICLOS BAJO LA APLICACIÓN DE  
CARGAS VARIABLES Y SU INFLUENCIA EN EL DISEÑO DE  
MÁQUINAS**

**Autor:** Ing. Jorge Patricio Guamanquispe Toasa  
**Tutor:** Ing. M.Sc. Telmo Jesús Gerardo Moreno Romero  
**Fecha:** 21 de agosto del 2012

**RESUMEN**

En el presente trabajo de investigación se determinó el comportamiento a fatiga mecánica tanto del Nylon como del Teflón, para lo cual se realizaron ensayos de acuerdo a la norma ASTM D-671 para determinar las curvas de Wöhler y mediante un análisis estadístico inferencial poder determinar la influencia que puede tener en la utilización de estos materiales como elementos de máquinas, se pudo determinar mediante regresión una relación matemática del esfuerzo en función del número de ciclos para cada uno de los materiales mencionados. Además se determinó la influencia de la temperatura en la relación esfuerzo - número de ciclos. El método de ensayo fue utilizar probetas estandarizadas empotradas como vigas en cantiléver con esfuerzos totalmente invertidos con una frecuencia de 30 Hz. con espesores entre 3 y 8 mm. sobre los cuales se generaron deformaciones cuya magnitud iba variando en cada ensayo y mediante un contador electrónico se determinó el número de ciclos hasta la falla, para poder tener la información suficiente para la generación de la curva antes mencionada.

**Descriptor:** Fatiga, esfuerzo, deformación, ciclos, cargas, límite de fatiga, polímeros, Nylon, Poliamida, teflón,

**TECHNICAL UNIVERSITY OF AMBATO**  
**CENTER OF POSTGRADUATE STUDIES**  
**MASTER OF MECHANICAL DESIGN**

THE STUDY OF THE BEHAVIOR OF MECHANICAL FATIGUE  
IN TEFLON AND NYLON TO DETERMINE THE  
RELATIONSHIP BETWEEN STRENGTH AND NUMBER OF  
CYCLES UNDER THE APPLICATIONS OF VARIOUS LOADS  
AND ITS INFLUENCE ON THE DESIGN OF MACHINES

**Author:** Ing. Jorge Patricio Guamanquispe Toasa  
**Tutor:** Ing. M.Sc. Telmo Jesús Gerardo Moreno Romero  
**Date:** 21 de agosto del 2012

**SUMMARY**

In the present investigational work, the behavior of mechanical fatigue was determined for Nylon and Teflon, this was done by performing test, under the ASTM D-671 norm, to determine the Wöhler curve and through the analysis of inferential statistics determine the influence that could be had by the usage of these materials as elements in machinery. It was possible to determine through regression, a mathematical relationship of the strength in function to the number of cycles was determined for each one of the materials mentioned. Also the influence of temperature on the relationship of strength and number of cycles The method used for testing was to use a fixed, standardized testing specimen, like cantilever support beams, with the forces totally inverted, with a frequency of 30 Hz and thickness between 3 and 8 mm on which were generated deformations, whose magnitude varied in each test and through an electric counter the number of cycles to failure was determined, in order to obtain sufficient information to be able to generate the before mentioned curve.

**Descriptors:** Fatigue, strength, deformation, cycles, loads, fatigue limits, polymers, Nylon, polyamide, Teflon.

## **CAPÍTULO 1**

### **1. EL PROBLEMA**

#### **1.1 TEMA:**

“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A FATIGA MECÁNICA DEL TEFLÓN Y NYLON PARA DETERMINAR LA RELACIÓN ESFUERZO - NÚMERO DE CICLOS BAJO LA APLICACIÓN DE CARGAS VARIABLES Y SU INCIDENCIA EN EL DISEÑO DE MÁQUINAS”

#### **1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

##### **1.2.1 CONTEXTUALIZACIÓN**

A nivel mundial el Instituto de Ciencia y Tecnología se dedica al desarrollo y publicación de nuevas tecnologías. El Área de Ciencia y Tecnología de Materiales del CSIC promueve el avance del conocimiento científico y desarrollo tecnológico de materiales al servicio de la sociedad. La aplicación de los materiales a nuevos usos se puede conseguir mejorando y cambiando sus propiedades por innovadores tratamientos y procesados. De forma similar la imaginación puesta al servicio de estos objetivos producirá nuevos materiales de propiedades nunca antes imaginadas.

El CSIC ha desarrollado un extenso número de investigaciones, entre ellos podemos mencionar el estudio realizado con nano compuesto polimérico con propiedades térmicas, mecánicas y eléctricas sustancialmente mejoradas debido a una excelente dispersión de la carga en la matriz polimérica y a una óptima adhesión interfacial refuerzo-matriz. La matriz es poli (éter cetona) (PEEK) o polímeros estructuralmente similares, los refuerzos son nano materiales de carbono funcionalizados en cuya superficie se injerta covalentemente un polímero derivado de la matriz. Estos nano compuestos son idóneos para aplicaciones en la industria aeroespacial, aeronáutica o del transporte, así como para

fabricación de recubrimientos antiestáticos y de apantallamiento de señales eléctricas.

También han desarrollado nuevos nano compuestos poliméricos basados en polipropileno y materiales ligeros, como partículas esféricas de nitruro de carbono, usando técnicas habituales de procesado en fundido. Estas nano partículas no requieren exfoliación o modificación previa, y utilizando poca cantidad de las mismas es posible la obtención de materiales mucho más duros y ligeros.

A nivel iberoamericano, la revista Iberoamericana de Polímeros, ha generado una gran cantidad de investigaciones, entre ellas podemos mencionar: en su volumen 12(2) Yonnier Fernando González Trujillo y Rubén Antonio Vargas Zapata de la Universidad del Valle, Cali, Colombia realiza un estudio sobre Propiedades termodinámicas y eléctricas del PVA 64 (2011).

Paul D. Toasa C. en el 2009 realiza un estudio sobre fatiga en polímeros y a partir de datos experimentales estima valores puntuales e intervalos de confianza para el esfuerzo. Dicha estimación se basa en cálculos estadísticos que parten de una regresión lineal y culminan en el análisis de una distribución t-student.

Erasmus Correa Gómez de la Universidad michoacana de San Nicolás de Hidalgo, realiza un estudio sobre resistencia a la fatiga ultrasónica de plásticos industriales (Poliamida Nylomaq), en la que concluye que la durabilidad del material con aproximadamente entre el 9 al 11 % del límite de fluencia es de  $5.6 \times 10^8$  a  $2.9 \times 10^9$  ciclos.

BASF Corporations, realizó un estudio sobre resistencia a la fatiga en ciclos bajos del polietileno (PET) reforzado con fibra de vidrio, en este trabajo se puso especial interés en cuanto a la frecuencia, geometría de las probetas y forma de aplicar la carga.

En la Universidad de Coimbra-Portugal, en 1999, J. A. M. Ferreira y otros realizaron un estudio sobre el comportamiento a carga estática y de fatiga

en compuestos de polipropileno reforzado con fibra de vidrio, en el que concluyen que la curva esfuerzo - deformación del material es no lineal para todo nivel de esfuerzo y que dicha relación depende mucho de la disposición de las fibras.

Procedente de la Universidad de Harvard, W. Carothers inició en 1928 sus actividades en Du Pont, para dirigir un programa de investigación básica sobre la estructura de los polímeros y el estudio del mecanismo de polimerización, Carothers preparó y caracterizó una amplia gama de polímeros tales como: poliésteres, poliamidas preparadas a partir de diácidos y de diaminas (poliamidas AA-BB), nailon 6,6 y 6 que en la actualidad tiene mucha importancia debido a sus propiedades.

Además de los mencionados existen innumerables trabajos relacionados tales como: “Comportamiento dinámico de laminados de fibra de carbono a velocidades de deformación intermedia y baja temperatura” realizado por M Sánchez, J.A., Güemes, J.M. Pintado, C. Navarro; “Obtención de propiedades de comportamiento mecánico en materiales compuestos a temperaturas criogénicas” por J.G. Carrión, J.M. Pintado, J.L. García; “Propiedades mecánicas y fracturas de compuestos de poli estireno y micro esferas de vidrio” por M. Sánchez, A. B. Martínez, M. LL. Maspocho, J.I. Velasco, R. Segura; “Obtención de propiedades de comportamiento mecánico en materiales compuestos a temperaturas criogénicas” por J.G. Carrión, J.M. Pintado, J.L. García; “Optimización de la tenacidad a fractura de matrices epoxi con termoplásticos I” por Martínez, E. Aizpurua, M Franco, M.A. Corcuera, P. Remiro, I. Mondragón. Los que servirán de base para el presente estudio.

En el Ecuador no existe investigación al respecto, nuestra industria por demás consumista tanto en materia prima como en tecnología se ha despreocupado por completo sobre este tema y las únicas instituciones que han venido desarrollando algo de investigación han sido las universidades, el tema de los polímeros en nuestro país es prácticamente nuevo y por ende existen muy pocos trabajos realizados como tesis de grado.

En el caso de nuestra provincia a pesar de ser pionera en construcción de carrocerías que es donde se puede utilizar mayoritariamente los polímeros, tampoco se ha hecho nada y nuestros industriales han tenido que importar piezas moldeadas en plásticos o realizarlos de manera empírica o artesanal. Se espera que la Universidad Técnica de Ambato por intermedio de la FICM con su programa de Maestría en Diseño Mecánico realice algunas investigaciones relacionados con polímeros, mediante el desarrollo de tesis de grado.

### **1.2.2 ANÁLISIS CRÍTICO**

En la actualidad nuestro país ha sufrido muchos cambios en todo nivel y se han visto afectado varios sectores y beneficiados otros, uno de los sectores afectados es el carrocerero y el metalmecánico en general que por la falta de investigación para el desarrollo de nuevos materiales ha tenido que importar, por lo que dichas empresas no pueden ser competitivas con industrias de la región. Otro de los problemas que esto genera es la falta de empleo y posterior migración de mano de obra hacia otros países.

### **1.2.3 PROGNOSIS**

No es difícil imaginar el impacto que la investigación en nuevos polímeros va a tener en el futuro de nuestra sociedad. Toda nueva tecnología, desde el avión supersónico y el tren de alta velocidad a las pequeñas baterías para teléfonos móviles, pasando por la optoelectrónica, los nuevos implantes quirúrgicos y nuevos tejidos sintéticos, necesita del desarrollo de un conjunto amplio de materiales con propiedades muy específicas. Sin la investigación y el conocimiento de nuevos polímeros (plásticos en su acepción más popular) estas tecnologías no podrían desarrollarse en el futuro y, ni tan siquiera, imaginarse, y específicamente sin el estudio planteado no se podría saber sobre la posibilidad de utilizar polímeros como elementos de máquinas sometidos a fatiga.

#### **1.2.4 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Se puede utilizar el Teflón y el Nylon en la manufactura de máquinas, especialmente de elementos sometidos a fatiga mecánica?

#### **1.2.5 PREGUNTAS DIRECTRICES**

¿Cómo se puede generar información sobre las propiedades mecánicas de los polímeros mediante la aplicación de la norma ASTM A 671?

¿Cómo se puede determinar que polímero se puede usar como elemento de máquinas?

¿Los polímeros son muy poco utilizados a nivel mundial como elementos de máquinas?

¿Existe insuficiente información de materiales no convencionales para el diseño de máquinas?

#### **1.2.6 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA**

##### **1.2.6.1 Delimitación temporal**

La realización del estudio sobre el comportamiento a fatiga de los polímeros fue realizada durante el período comprendido entre septiembre del 2011 hasta julio del 2012.

##### **1.2.6.2 Delimitación espacial**

La investigación necesaria para el estudio sobre el comportamiento a fatiga mecánica del Nylon y el Teflón fue realizada en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato ubicada en la ciudad de Ambato Campus Huachi Chico.

##### **1.2.6.3 Delimitación de contenido**

El estudio sobre el comportamiento mecánico de los polímeros se centró en el estudio a fatiga mecánica del Nylon y el Teflón. Las materias relacionadas con nuestro tema de investigación fueron: Diseño de

Elementos Mecánicos, Ingeniería de materiales, Procesos de Manufactura y Sistemas Mecánicos.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

El desarrollo de esta investigación fue justificado por muchos aspectos, uno de ellos fue el grado de importancia, ya que al finalizar el mismo se pudo disponer de gran información sobre el comportamiento a fatiga mecánica tanto del Teflón como del Nylon, es decir se dispone de gráficas S – N, datos muy necesarios para el diseñador. Otro factor fue el aspecto tecnológico ya que al incorporar este tipo de materiales se considera que es posible construir máquinas más eficientes, silenciosas y livianas. Otro aspecto fundamental fue la innovación que se logró en el estudio en cuanto al tipo de equipo que se desarrolló para los ensayos, ya que si bien es cierto ya existen estas máquinas para ensayar materiales ferrosos, ahora ya podemos disponer en la facultad de una máquina para el ensayo de polímeros. Otro aspecto fue la factibilidad tanto técnica como económica, ya que para ello se contó con el financiamiento por parte del investigador y la máquina se lo pudo construir en talleres de la localidad.

Siendo la Visión del CEPOS - UTA consolidar su calidad, diversidad y respuesta a los requerimientos de la Educación Superior y de los sectores productivos, social y gubernamental y la misión satisfacer las demandas científico-tecnológicas de la sociedad ecuatoriana en interacción dinámica con sus actores; formar profesionales líderes con pensamiento crítico, reflexivo, creativo, con conciencia social que contribuyan al desarrollo científico, técnico, cultural y axiológico del país; con este proyecto se logró desarrollar la investigación científica y tecnológica como un aporte en la solución de los problemas; ahora se puede producir bienes y prestar servicios, para contribuir al mejoramiento de la calidad de vida de los ecuatorianos e impulsar el desarrollo sustentable del país.

## **1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL:**

Desarrollar un estudio sobre el comportamiento a fatiga mecánica del Teflón y el Nylon, para determinar la relación esfuerzo cíclico y número de ciclos y poder determinar la posibilidad de su utilización en la fabricación de elementos de máquinas.

### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Determinar, mediante la aplicación de la norma ASTM D 671, el comportamiento a fatiga mecánica de los polímeros mencionados.
- Generar información para relacionar el número de esfuerzos aplicados hasta la falla con la amplitud del esfuerzo aplicado.
- Establecer, mediante un análisis estadístico, parámetros del comportamiento a fatiga de los polímeros para determinar la posibilidad de utilizar los polímeros mencionados como elementos de máquinas.
- Analizar estadísticamente los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio.
- Evaluar los datos obtenidos para establecer la posibilidad de utilizar estos polímeros como elementos de máquinas.

## **CAPÍTULO II**

### **2. MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS**

##### **2.1.1 ANTECEDENTES**

Existe una gran cantidad de trabajos relacionados con la fatiga mecánica de los materiales poliméricos, sin embargo se mencionan los más relevantes.

L. P. Canal, J. Segurado, J. LLorca, del departamento de Ciencia de Materiales de la Universidad Politécnica de Madrid en los informes de la Mecánica de Fractura, Vol. 1 (2007), han estudiado el comportamiento mecánico hasta la rotura de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados por fibras unidireccionales mediante técnicas micro mecánicas computacionales. En dicha investigación se ha comprobado cómo el aumento de la porosidad inicial disminuye la tensión de plastificación de la matriz y acelera el daño en el material. La variación en la sensibilidad a la presión provoca que las bandas de cortante y la porosidad se concentren en orientaciones diferentes dentro del material.

José Antonio Casado del Prado, en su Tesis Doctoral presentada en la Universidad de Cantabria para la obtención del título de Doctor en Ciencias Físicas realizada en el 2001, realiza un estudio sobre el comportamiento en fatiga de poliamidas reforzadas con fibra de vidrio corta, en este estudio se concluye que, la adición de fibras a los materiales poliméricos termoplásticos introduce significativas mejoras en sus propiedades mecánicas. Los valores de rigidez y de resistencia son mucho más altos que los correspondientes a los del polímero sin reforzar. Asimismo, la resistencia ante los fenómenos de fluencia es mayor y su estabilidad dimensional es, generalmente, mejor. También la

incorporación de fibras al polímero puede, a menudo, dotarle de un beneficioso incremento de la temperatura máxima de servicio.<sup>1</sup>

Estudios realizados por Pétrault et al en 1993<sup>2</sup> acerca del comportamiento en fatiga sobre la poliamida (PA) pone 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 a fatiga termodinámica.

Wyzgowski y Novack<sup>3</sup>, en 1991, observaron incrementos térmicos en el fondo de fisuras del nylon de alrededor de 50 °C. El elevado calor generado en la fatiga de este material se traduce en un incremento considerable de su temperatura local e incluso global, detectable superficialmente.

Estudios realizados por Wyzgoski<sup>4</sup> en 1990 sobre el comportamiento en fatiga de la PA 6.6, pusieron de manifiesto el acusado efecto de la frecuencia en su respuesta mecánica, incluso para valores de las mismas inferiores a los que producen calentamiento de histéresis. Así, se pudo determinar una mayor velocidad de crecimiento de fisura por ciclo para las frecuencias más bajas, indicando, por lo tanto, que el tiempo bajo carga es un factor significativo en la cinética de fisuración. Este hecho indica que la fluencia visco elástica establece, en este caso, un mecanismo importante en la propagación de la fisura por fatiga. De esta forma, fue posible cuantificar la velocidad de crecimiento de la fisura por ciclo como una función del tiempo bajo carga.

---

<sup>1</sup> De S. K. and White J. R.: "Short fibre-polymer composites". Woodhead Publishing Limited. Cambridge, England. 1996.

<sup>2</sup> Pétrault, D.; Bertin, Y.; Ranganathan, N. & Fouquet, J.: "A study in fatigue on polyamide-polymer". *Fatigue 93: 5th International Conference on Fatigue*. Vol. 3. pp. 1417-1422.

<sup>3</sup> M.G. Wyzgowski, G.E. Novak, *Fatigue Fracture of nylon polymers, Part II Effect of glass-fiber reinforcement*, *J. Mater. Sci.* 26 (1991), 6314-6324

<sup>4</sup> Wyzgoski, M.; Novak, G. and Simon, D. "Fatigue fracture of nylon polymers". Part 1. *Effect of frequency*. *Journal of Materials Science*, (1990) pp. 4501-4510.

Hertzberg y sus colaboradores, en 1975<sup>5</sup>, establecen una relación de la citada fisuración en base a dos contribuciones diferentes. Una componente representa el crecimiento de la fisura debido al proceso real de la fatiga, de tal forma que cada ciclo introduce una cierta cantidad de daño y su consecuente extensión de grieta.

## **2.1.2 FUNDAMENTO TEÓRICO**

### **2.1.2.1 Fatiga de los materiales**

Al fenómeno de fatiga se conoce como la aplicación repetida de ciclos de carga y descarga que debilitan las piezas, incluso cuando los esfuerzos generados sean considerablemente menores que la resistencia de rotura estática e incluso del límite elástico del material. Cada ciclo de fluctuación del esfuerzo deteriora o daña la pieza un poco. Tras un cierto número N de ciclos determinado, la pieza está tan debilitada que se rompe por fatiga. Para complicar el tema también se observa en piezas metálicas que por debajo de un cierto valor del esfuerzo no se produce la rotura por elevado que sea el número N de ciclos de trabajo de la pieza. Todo esto hace que la fatiga sea realmente compleja y por desgracia para el ingeniero tiene que seguir diseñando piezas y elementos de máquinas confiables. Este fenómeno de fatiga se presenta en la mayoría de elementos de máquinas rotativas, automóviles, tornillos, alas de aviones, productos de consumo, plataformas marítimas, barcos, puentes y todo tipo de estructuras.

La vida a fatiga se puede definir como el "fallo debido a cargas repetitivas...<sup>6</sup> que incluye la iniciación y propagación de una grieta o conjunto de grietas hasta el fallo final por fractura" (Fuchs, 1980). El análisis de fatiga estructural es una herramienta para evaluar la validez de un diseño, o su durabilidad, bajo condiciones de carga simples o

---

<sup>5</sup> Hertzberg R.; Manson J. and Skibo, M. *Polymer Engineering and Science* (1975), p. 252.

<sup>6</sup> *Introducción al Análisis de Fatiga o Durabilidad, Nota Técnica NºFT01, Categoría: Postprocesado Última revisión: Agosto-2006*

complejas conocidas como cargas de servicio que la estructura puede soportar antes de que se inicie cualquier grieta.

Los estudios estructurales lineales y no lineales no predicen los fallos por fatiga. Calculan la respuesta de un diseño sujeto a un entorno específico de cargas y restricciones. Si los resultados de desplazamientos y tensiones están por debajo de un cierto nivel admisible el ingeniero proyectista puede concluir que el diseño es seguro en ese entorno de sollicitaciones con independencia de cuantas veces se aplique la carga.

Los resultados de estudios estructurales (estáticos y dinámicos, lineales y no lineales) se usan como datos básicos de partida para definir el estudio de fatiga. El número N de ciclos requeridos para que el fallo por fatiga ocurra en un punto depende del material y de la fluctuación de las tensiones. Esta información, nos proporciona la llamada Curva S-N.

Las grietas por fatiga se inician en la superficie del material. Por ello debe evitarse en lo posible rayaduras y marcas en las superficies, sobre todo en zonas con elevado nivel de tensión. Cualquier tratamiento superficial (térmico o mecánico) que produzcan un estado de tensiones residuales de compresión en la superficie de las piezas aumentando la dureza de la superficie (por ejemplo, el temple, granallado o laminado superficial) incrementará la vida a fatiga de la pieza.

El análisis de fatiga se basa en la regla de Miller de daño acumulado para estimar la vida a fatiga a partir de un historial de tensiones o deformaciones. La estimación se realiza reduciendo los datos de carga a una secuencia de picos y valles, contando los ciclos y calculando la vida a fatiga. Para realizar un análisis a Fatiga o de durabilidad, debe proporcionar información específica para el análisis de fatiga tales como:

- Propiedades a fatiga de los materiales.
- Variación de las cargas a fatiga.
- Opciones de análisis a fatiga.

El proceso de fatiga de los materiales se presenta en tres fases:

**Fase 1 (Iniciación):** Una o más grietas se desarrollan en el material. Las grietas pueden aparecer en cualquier punto del material pero en general ocurren alrededor de alguna fuente de concentración de tensión y en la superficie exterior donde las fluctuaciones de tensión son más elevadas. Las grietas pueden aparecer por muchas razones: imperfecciones en la estructura microscópica del material, rayaduras, arañazos, muescas y entallas causados por las herramientas de fabricación o medios de manipulación. En materiales frágiles el inicio de grieta puede producirse por defectos del material (poros e inclusiones) y discontinuidades geométricas.

**Fase 2 (Propagación):** Alguna o todas las grietas crecen por efecto de las cargas. Además, las grietas generalmente son finas y de difícil detección, aun cuando se encuentren próximas a producir la rotura de la pieza.

**Fase 3 (Rotura):** La pieza continúa deteriorándose por el crecimiento de la grieta quedando tan reducida la sección neta de la pieza que es incapaz de resistir la carga desde un punto de vista estático produciéndose la rotura por fatiga.

La Curva S-N de un material define valores de tensiones alternas vs. El número de ciclos requeridos para causar la falla a una determinada relación de tensión. La figura 2.1 muestra una curva típica S-N. El eje-Y representa la tensión alterna (S) y el eje-X representa el número de ciclos (N). La curva S-N se basa en una relación de tensiones o tensión media  $\sigma_m$ . Para cada material se pueden definir múltiples curvas S-N con diferentes valores de tensión media.

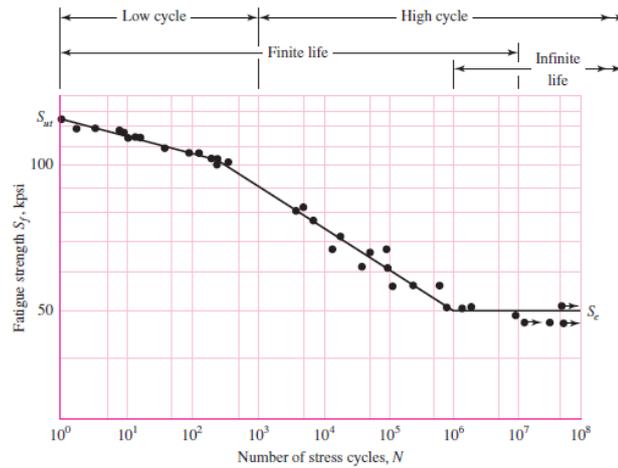


Figura 2-2-1 Relación de esfuerzo Vs número de ciclos hasta la falla

Fuente: (Shigley's, 2008)

Las curvas S-N se basan en la vida a fatiga media o en una probabilidad de fallo dada. La generación de la curva S-N de un material requiere muchos ensayos mediante la utilización de una máquina de ensayos como la representada en la figura 2.2 para metales y una como la representada en la figura 2.3 para polímeros, mediante la cual da una forma estadística al variar las tensiones alternas, las tensiones medias (o la relación de tensiones) y contar el número de ciclos. Para caracterizar un material se toma un conjunto de probetas y se las somete a sollicitaciones variables con diferentes niveles de tensión, contándose el número de ciclos que resisten hasta la falla.

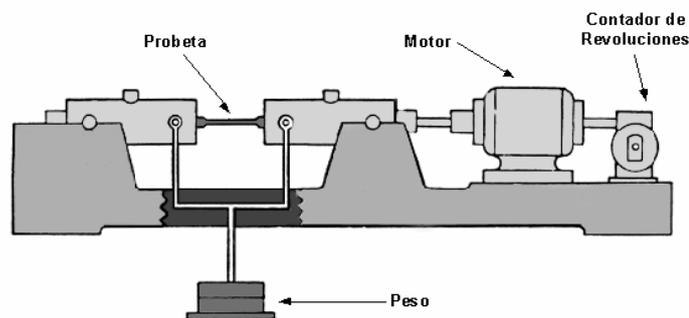


Figura 2-2 Máquina de probeta rotatoria de Moore para ensayo a Fatiga<sup>7</sup>

Fuente: Tomado de Nota Técnica N°FT01 Introducción al Análisis de Fatiga o durabilidad

<sup>7</sup> Nota Técnica N°FT01 Introducción al Análisis de Fatiga o Durabilidad Categorías: postprocesado Última revisión: Agosto-2006



Figura 2-3 Máquina para ensayo a fatiga de polímeros

Fuente: Tomado de CEAST USA. Inc.

Debido a la elevada dispersión estadística propia de la fatiga los resultados se agrupan en una banda de roturas. Una parte de esta dispersión puede atribuirse a errores del ensayo, pero es una propiedad del fenómeno físico lo cual obliga a realizar un gran número de ensayos de probetas a fin de determinar la banda de fractura con suficiente precisión. Por tanto, caracterizar un material a fatiga supone un costo muy elevado.

Por ejemplo, suponiendo que se desea conocer el comportamiento a fatiga de un material hasta  $1 \times 10^8$  ciclos utilizando seis valores de la tensión con tres probetas por cada tensión. El ensayo más largo de  $1 \times 10^8$  ciclos demoraría unos 14 días en una máquina capaz de producir 5000 rpm. Por tanto si sólo se dispone de una máquina el tiempo para realizar todos los ensayos sería de varios meses. Existen métodos de ensayo rápidos pero la fiabilidad de los resultados es menor.

En base a los ensayos sobre probetas se han desarrollado métodos para cálculo y diseño a fatiga. La extrapolación de los resultados de los ensayos de fatiga a las piezas reales está basado en la utilización de una serie de valores modificativos empíricos, y por ello la fiabilidad de los métodos de cálculo es reducida si se compara por ejemplo con un cálculo estático lineal ya que existen numerosos factores que intervienen en el comportamiento a fatiga de un sistema físico que son imposibles de

introducir en un modelo de elementos finitos, teniendo el usuario que "estimar" su efecto. Por tanto, en sistemas de alta responsabilidad es imprescindible recurrir a ensayos sobre prototipos.

Los fundamentos para la predicción de vida a fatiga se basan en las propiedades del material obtenidas en el laboratorio ensayando con pequeñas probetas sujetas a cargas dinámicas hasta que se rompan o aparezca la primera grieta. El método de tensión-deformación local asume que la vida de la probeta en el laboratorio se puede relacionar con la vida de la estructura real. Es más, se asume que las cargas utilizadas en la estimación de vida a fatiga de la estructura son tensiones locales o deformaciones locales en posiciones críticas.

Dado que los fundamentos del análisis de fatiga están basados en datos empíricos, se debe considerar los siguientes puntos antes de realizar un análisis de fatiga:

- ✓ Si se utilizan propiedades del material publicados en tablas, debe tenerse en cuenta las condiciones del ensayo utilizadas para obtener esos datos.
- ✓ Asegurarse de que las condiciones correspondan al problema que se está investigando, y que se incluyan los procesos utilizados para la fabricación del material y las mismas condiciones de carga del ensayo.
- ✓ Verificar la validez de las cargas y su aplicación correcta.

Aparte de estas limitaciones, el análisis de fatiga es muy interesante, especialmente si se utiliza como una herramienta para ver las características y tendencias de un posible fallo a fatiga. Modificando parámetros y comparando estimaciones de vida, se pueden observar tendencias a favor de un diseño más seguro. Únicamente a través de estudios comparativos el ingeniero podrá obtener un conocimiento real de los mecanismos de trabajo.

### 2.1.2.2 Fatiga en polímeros

Estudios realizados por Herman y sus colaboradores en 1990<sup>8</sup> sobre algunos materiales poliméricos no especificados, así como también los realizados por Pétrault et al en 1993<sup>9</sup> acerca del comportamiento en fatiga sobre la poliamida (PA) ponen de manifiesto un fuerte calentamiento térmico de histéresis, efecto que depende de la amplitud de las tensiones y la frecuencia a la que son aplicadas las cargas variables. La rotura obtenida puede considerarse, por lo tanto, de origen termodinámico.

Cuando un material polimérico es sometido a ciclos de carga variable, su temperatura aumenta y se aproxima a una crítica de ablandamiento, cuyo valor depende de cada polímero termoplástico, esto hace que se produzca un ablandamiento y posterior debilitamiento del material, superando la resistencia y provocando la rotura, sin embargo, cuando se aplican 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.

Así, dependiendo de la amplitud de la tensión y de la frecuencia de la aplicación del esfuerzo, el fallo por fatiga de algunos polímeros se produce por dos causas fundamentales como se describen a continuación:

**Fatiga térmica.-** Cuando el material polimérico es sometido a una variación de esfuerzos superior al nivel de tensiones crítico, se producen movimientos de los segmentos de sus cadenas moleculares, que modifican su conformación para adaptarse a la perturbación impuesta. Estos movimientos moleculares, localizados inicialmente en los grupos laterales de las cadenas poliméricas, se identifican como "transiciones o relajaciones visco elásticas" en el polímero, y son características en cada material a unas temperaturas propias. Una parte de la energía producida

---

<sup>8</sup> (Herman, Hertzberg, & Manson, 1990)

<sup>9</sup> (Pétrault, Bertin, & Ranganathan)

es almacenada por el material como consecuencia de su deformación, pero los movimientos moleculares provocan un calentamiento por fricción, por lo que otra parte de la energía producida se consume irreversiblemente. La escasa conductividad térmica del material polimérico provoca que gran parte de la energía producida en forma de calor no se disipe, dedicándose a incrementar su temperatura.

**Fatiga mecánica.-** 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 un debilitamiento progresivo del material y su posterior rotura debida a la propagación de fisuras o defectos inherentes al 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 conlleva a su rotura brusca.

En función de lo anteriormente mencionado para cada polímero existe un rango tanto de frecuencias como de amplitud de carga dentro de los cuales se produce uno u otro tipo de falla.

### **2.1.2.3 Tipos de polímeros**

Los polímeros son macromoléculas (generalmente orgánicas) formadas por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeros. Existen varias formas posibles de clasificar los polímeros, atendiendo a sus propiedades y usos finales, los polímeros pueden clasificarse en plásticos, elastómeros, fibras, recubrimientos, adhesivos, espumas y películas. Dependiendo de sus propiedades, un polímero puede utilizarse en dos o más de estas aplicaciones. Por ejemplo, un plástico, si se entrecruza y se utiliza por debajo de su temperatura de transición vítrea, puede comportarse satisfactoriamente como un elastómero. Un material fibroso se puede utilizar como plástico si no está trefilado. Otra forma de clasificarlos atendiendo a su comportamiento al elevar la temperatura pueden ser termoplásticos, termoestables y elastómeros.

#### **2.1.2.4 Polímeros termoplásticos y termoestables**

Los termoplásticos se ablandan al calentarse (a veces funden) y se endurecen al enfriarse (estos procesos son totalmente reversibles y pueden repetirse). Estos materiales normalmente se fabrican con aplicación simultánea de calor y de presión. A nivel molecular, a medida que la temperatura aumenta, la fuerza de los enlaces secundarios se debilita (por que la movilidad molecular aumenta) y esto facilita el movimiento relativo de las cadenas adyacentes al aplicar un esfuerzo. La degradación irreversible se produce cuando la temperatura de un termoplástico fundido se eleva hasta el punto que las vibraciones moleculares son tan violentas que pueden romper los enlaces covalentes. Los termoplásticos son relativamente blandos y dúctiles. La mayoría de los polímeros lineales y los que tienen estructuras ramificadas con cadenas flexibles son termoplásticos.

Los polímeros termoestables se endurecen al calentarse y no se ablandan al continuar calentando. Al iniciar el tratamiento térmico se origina entrecruzamientos covalente entre cadenas moleculares contiguas. Estos enlaces dificultan los movimientos de vibración y de rotación de las cadenas a elevadas temperaturas. Generalmente el entrecruzamiento es extenso: del 10 al 50% de las unidades manométricas de las cadenas están entrecruzadas. Solo el calentamiento a temperaturas excesivamente altas causa rotura de estos enlaces entrecruzados y degradación del polímero. Los polímeros termoestables generalmente son más duros, resistentes y más frágiles que los termoplásticos y tienen mejor estabilidad dimensional. La mayoría de los polímero entrecruzados y reticulados, como el caucho vulcanizado, los epoxi, las resinas fenólicas y de poliéster, son termoestables.

#### **a) Aplicación de los polímeros**

En la categoría de plásticos se incluye posiblemente el mayor número de materiales poliméricos diferentes. Se clasifican como plásticos el polietileno, polipropileno, cloruro de polivinilo, poli estireno,

fluorocarbonos, epoxis, fenólicos y poliésteres. Los plásticos tienen una amplia variedad de combinaciones de propiedades. Algunos son muy duros y frágiles; otros son flexibles y presentan tanto elasticidad como plasticidad al estar sometidos a un esfuerzo y a veces, experimentan gran deformación antes de la rotura.

Los polímeros clasificados como plásticos pueden tener cualquier grado de cristalinidad y todas las estructuras y configuraciones moleculares. También normalmente suelen subdividirse en termoplásticos y termoestables.

Varios plásticos tienen propiedades especiales. En las aplicaciones donde la transparencia óptica es crítica, el poliestireno y el polimetacrilato de metilo son especialmente útiles; sin embargo, es imprescindible que el material sea altamente amorfo. Los fluorocarbonos tienen bajo coeficiente de fricción y son extremadamente resistentes a los ataques químicos, incluso a elevadas temperaturas. Se utilizan como recubrimiento en utensilios de cocina, en cojinetes y casquillos y en componentes electrónicos para elevadas temperaturas.

Los termoplásticos más importantes que se utilizan comercialmente son el polietileno, el estireno butadieno acrilonitrilo (ABS), el policloruro de vinilo (PVC), el butirato acetato de celulosa (CAB), policloruro de vinilideno (Sarán), fluorocarbonos (teflón, Kel-F, Kynar), policarbonatos, polipropileno, nylon y acetales (Delrin). Los plásticos termoestables más importantes son los siguientes: poliéster reforzado con vidrio, poliéster de bisfenol reforzado con vidrio, epoxi reforzado con vidrio, éster vinílico reforzado con vidrio, furano y fenol reforzado con vidrio, y también con refuerzo de asbesto.

El plástico más resistente a los productos químicos que existe en el mercado es el politetrafluoroetileno o PTFE (Teflón). Este termoplástico prácticamente no se ve afectado por ningún alcalino o ácido, a excepción del flúor y del cloro a temperaturas altas, y los metales fundidos. Conserva sus propiedades hasta 260°C (500°F). El clorotrifluoroetileno o PCTFE

(Kei-F, Plaskon) posee también una resistencia excelente a la corrosión contra casi todos los ácidos y los álcalis hasta 180°C (350°F). Se ha desarrollado un derivado del Teflón a partir de la copolimerización de tetrafluoretileno y hexafluoropropileno. Esta resina, FEP, tiene propiedades similares al PTFE, con la excepción de que no se recomienda para exposiciones continuas a temperaturas por encima de 200°C (400°F). Asimismo, el FED se puede extruir en equipos tradicionales de extrusión, mientras que las piezas de PTFE se deben fabricar mediante técnicas complejas de “metalurgia de polvo”. Otra versión es la del fluoruro de polivinilideno o PVF<sub>2</sub> (Kynar), que tiene una resistencia excelente a los álcalis y a los ácidos hasta 150 C (300°F).

### **b) Propiedades de los polímeros**

Las propiedades mecánicas de los polímeros se especifican con los mismos parámetros utilizados para los metales: módulo elástico y resistencia a la tracción, al impacto y a la fatiga. El ensayo esfuerzo-deformación se emplea para caracterizar parámetros mecánicos de muchos materiales poliméricos. La mayoría de las características mecánicas de los polímeros son muy sensibles a la velocidad de deformación, a la temperatura y a la naturaleza química del medio (presencia de agua, oxígeno, disolventes orgánicos, etc.) en los materiales de alta elasticidad, como las gomas, conviene modificar las técnicas de ensayo o la forma de las probetas utilizadas para los metales.

El módulo de elasticidad, la resistencia a la tracción y la ductilidad (en porcentaje de alargamiento) de los polímeros se denomina como en los metales. Los polímeros son, en muchos aspectos, mecánicamente distintos de los metales. Por ejemplo, el módulo elástico de los polímeros de alta elasticidad es del orden de 7 MPa y el de los de baja elasticidad de  $4 \times 10^3$  MPa, mientras que en los metales los valores del módulo elástico son mayores y el intervalo de variación es menor: va de  $48 \times 10^3$  a  $410 \times 10^3$  MPa. La resistencia máxima a la tracción de los polímeros es del orden de 100 MPa, mientras que la de algunas aleaciones metálicas es de 4100 MPa. La elongación plástica de los metales raramente es

superior al 100%, mientras que algunos polímeros de alta elasticidad pueden experimentar elongaciones del 1000%.

Las características mecánicas de los polímeros son muchos más sensibles a las variaciones de temperatura, en condiciones ambientales, que las de los metales. Al observar el comportamiento esfuerzo-deformación del polimetacrilato de metilo (Plexiglas) a temperaturas comprendidas entre 4 y 60°C se aprecia que el incremento de temperatura produce disminución del módulo elástico, disminución de la resistencia a la tracción y aumento de la ductilidad, el polímero es totalmente frágil a 4°C mientras que a 50 y 60 °C experimenta una considerable deformación plástica.

La influencia de la velocidad de deformación puede también ser importante en el comportamiento mecánico. Generalmente la disminución de la velocidad de deformación tiene el mismo efecto que el aumento de la temperatura en el comportamiento esfuerzo-deformación, es decir, el material se comporta como más blando y más dúctil.

El conocimiento de los mecanismos de la deformación contribuye a controlar las características mecánicas de estos materiales. En este sentido existen dos modelos de deformación diferentes. Uno de ellos implica la deformación plástica que ocurre en los polímeros semicristalinos. La característica más importante de estos materiales suele ser la resistencia. Por otro lado, los elastómeros se utilizan por sus excepcionales propiedades de elasticidad.

### **a) Viscoelasticidad**

Un polímero amorfo se comporta como un vidrio a baja temperatura, como un sólido gomoeástico a temperaturas intermedias (por encima de la temperatura de transición vítrea) y como un líquido viscoso a temperaturas elevadas. Frente a deformaciones relativamente pequeñas, el comportamiento mecánico a bajas temperaturas es elástico y cumple la ley de Hook. A temperaturas muy elevadas prevalece el comportamiento viscoso o líquido elástico. A temperaturas intermedias aparece un sólido,

como de goma, que presenta características mecánicas intermedias entre estos dos extremos: esta condición se llama viscoelasticidad.

La deformación elástica es instantánea; esto significa que la deformación total ocurre en el mismo instante que se aplica el esfuerzo (la deformación es independiente del tiempo). Además, al dejar de aplicar el esfuerzo la deformación se recupera totalmente: la probeta adquiere las dimensiones originales.

Por el contrario, para el comportamiento totalmente viscoso, la deformación no es instantánea. Es decir, la deformación, como respuesta a un esfuerzo aplicado, depende del tiempo. Además, esta deformación no es totalmente reversible o completamente recuperable después de eliminar el esfuerzo.

Un comportamiento viscoelástico intermedio, origina una deformación instantánea seguida de una deformación viscosa dependiente del mismo, una forma de anelasticidad.

Un ejemplo de comportamiento viscoelástico es el polímero de silicona, conocido como masilla tonta. Cuando a esta masilla se le da forma de bola y se la deja caer sobre una superficie horizontal, la bola rebota elásticamente (la velocidad de deformación durante el bote es muy rápida). Por otro lado, si la masilla se estira gradualmente con fuerza creciente, el material se alarga o fluye como un líquido muy viscoso. Para este y otros materiales viscoelásticos, la velocidad de deformación determina si la deformación es elástica o viscosa.

### **b) Módulo de relajación visco elástico**

El comportamiento visco elástico de los materiales poliméricos depende del tiempo y de la temperatura. Para medir y cuantificar este comportamiento se utilizan varias técnicas experimentales. Las medidas del esfuerzo de relajación representan una posibilidad. Este ensayo consiste en deformar rápida y levemente una probeta hasta un nivel predeterminado. El esfuerzo necesario para mantener esta deformación a

temperatura constante se mide con función del tiempo. El esfuerzo decrece con el tiempo debido al fenómeno de relajación molecular que ocurre dentro del polímero. Se puede definir un módulo de relajación.

### **c) Fluencia visco elástica**

Muchos materiales poliméricos experimentan una deformación que depende del tiempo al aplicarles un esfuerzo constante. Esta deformación se denomina fluencia visco elástica. Este tipo de deformación puede ser significativa a temperatura ambiente y con esfuerzos inferiores al límite elástico del material. Por ejemplo, los neumáticos de un automóvil pueden formar partes planas debido al contacto con el suelo cuando el automóvil está aparcado durante mucho tiempo. El ensayo de fluencia de los polímeros se realiza de la misma manera que para los metales. Normalmente se aplica instantáneamente un esfuerzo de tracción y se mantiene constante mientras se determina la deformación en función del tiempo. Además, el ensayo se realiza en condiciones isotérmicas. Los resultados de fluencia se representan como el módulo de fluencia  $E_c(t)$  que depende del tiempo.

### **d) Fractura de polímeros**

La resistencia a la rotura de los materiales poliméricos es relativamente menor que la de los metales y cerámicas. Por regla general, los polímeros termoestables presentan fractura frágil. La formación de grietas en la región donde se localizan las tensiones está asociada con el proceso de rotura. Durante la rotura se deshacen los enlaces covalentes de las estructuras entrecruzadas y reticuladas.

Los polímeros termoplásticos presentan fractura dúctil y frágil, y muchos experimentan la transición dúctil-frágil. La baja temperatura, la alta velocidad de deformación, la presencia de entallas agudas, el incremento del espesor de las muestras y las modificaciones de la estructura polimérica son factores que favorecen la fractura frágil. Los termoplásticos vítreos son frágiles a baja temperatura, pero se convierten en dúctiles al

aumentar la temperatura y aproximarse a la temperatura de transición vítrea y presentan comportamiento plástico antes de romperse.

Un fenómeno asociado a la fractura de algunos polímeros termoplásticos vítreos es la microfisuración. Las microfisuras constituyen una región tensionada asociada a fisuras, grietas, partículas de impurezas y heterogeneidades moleculares. Normalmente esta región se propaga perpendicularmente al eje de esfuerzo de tracción. Asociadas a las microfisuras existen regiones de deformación permanente localizada, que conducen a la formación de fibrillas (regiones con cadenas moleculares orientadas) y pequeños poros dispersos (microporos) e interconectados. El espesor de una microfisura suele ser de unas 5  $\mu\text{m}$  o menos.

Las microfisuras, a diferencia de las grietas, son capaces de soportar cargas transversales a la dirección de su propagación. Las cargas soportadas serán menos de las de un material sin microfisuras o sin grietas. Si se aplica un esfuerzo de tracción suficiente a lo largo de las microfisuras se forman grietas por rotura de la estructura fibrilar y ensanchamiento de los huecos. A continuación la grieta se extiende por su extremo.

#### **e) Resistencia al impacto**

En algunas aplicaciones de los materiales poliméricos es de gran interés conocer el grado de resistencia al impacto de probetas entalladas. Estos valores se obtienen mediante ensayos Izod o Charpy. Como en los metales, los polímeros presentan rotura dúctil o frágil cuando se someten al impacto de una carga, dependiendo de la temperatura, del tamaño de la probeta, de la velocidad de deformación y del modo de aplicar la carga. Tanto los polímeros cristalinos como los amorfos son frágiles a baja temperatura y tienen relativamente poca resistencia al impacto. Sin embargo, estos materiales experimentan transición dúctil-frágil en un estrecho intervalo de temperaturas, similar al que se muestra para el acero. Desde luego, la resistencia al impacto decrece gradualmente a altas temperaturas, cuando el polímero empieza a reblandecerse.

Ordinariamente, las dos características relacionadas con el impacto más solicitadas son elevada resistencia al impacto a temperatura ambiente y una temperatura de transición frágil-dúctil a temperatura inferior a la ambiental.

#### **f) Resistencia a la fatiga**

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. Algunos polímeros presentan límite de fatiga (un nivel de esfuerzo por debajo del cual el esfuerzo para que se produzca el fallo se hace independiente del número de ciclos). Otros polímeros no parece que tenga tal límite. Como era de esperar, la resistencia a la fatiga y el límite de fatiga de los polímeros es mucho menor que la de los metales.

Es el esfuerzo máximo con el cual no ocurrirá falla en un número particular de ciclos; la resistencia a la fatiga es necesaria cuando se diseña con materiales como aluminio y polímeros, ya que estos no tienen esfuerzo límite de fatiga.

#### **g) Resistencia a la torsión y dureza**

Otra propiedad mecánica que a veces condicionan las aplicaciones de los polímeros son la resistencia a la torsión y la dureza. La resistencia a la torsión de algunos plásticos es de gran importancia, sobre todo la de las láminas o películas utilizadas para embalaje. La resistencia a la torsión es la energía requerida para torcer una probeta de una geometría con la resistencia a la tracción.

Como en los metales, la dureza de un polímero representa la resistencia del material al rayado y la penetración. La mayoría de los ensayos de

dureza se realizan mediante técnicas de penetración similares a la de los metales.

## h) Esfuerzo límite

El ensayo de fatiga define el esfuerzo inducido máximo que resistirá el material (esto es, la probeta) con un número infinito de ciclos, o la carga máxima permisible que se puede aplicar para prevenir la falla del componente a un número determinado de ciclos de carga. Como se muestra en la gráfica siguiente, para evitar que falle una pieza de acero grado herramienta por fatiga correspondiente a 10.000 ciclos de carga, se debe garantizar que el esfuerzo aplicado esté por debajo de 90.000 Psi. (Ver Figura 2.4)

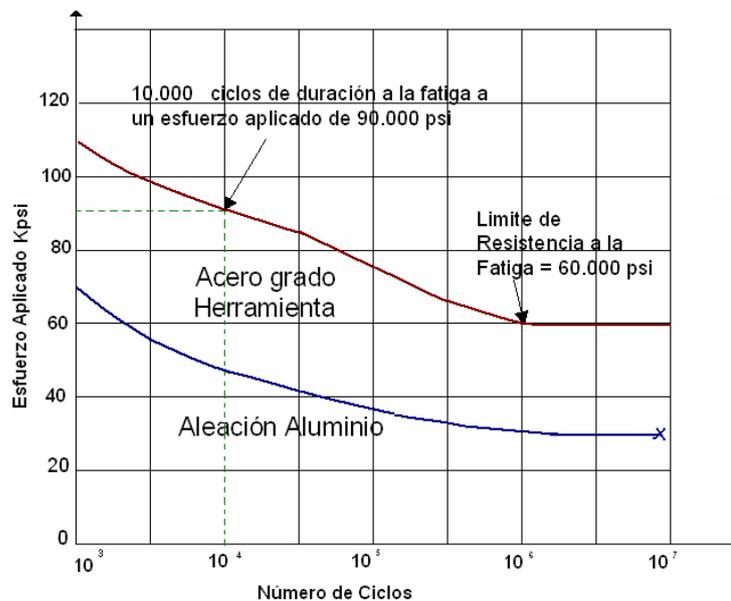


Figura 2-4 Curva esfuerzo versus número de ciclos

*Fuente: Tomado de Fatiga Protocolo Curso de Materiales Facultad Ingeniería Industrial de la Escuela colombiana de Ingeniería*

En cambio, para que la pieza de dicho material resista un número infinito de ciclos de carga, el esfuerzo aplicado deberá ser menor a 60.000 Psi. Esto se llama "límite de fatiga".

### **i) Relación de fatiga**

Esta relación permite estimar propiedades de fatiga a partir del ensayo de tracción. En los aceros la resistencia límite de fatiga es aproximadamente la mitad de su resistencia a la tensión: Pero, cuando los aceros están en estado templado y revenido (bonificados), esta relación puede bajar a 0.4 y aún menor. La mayor parte de los materiales son sensibles a muescas o fisuras y a otros factores; siendo por esto importante analizar sus efectos en las propiedades de fatiga. Las otras circunstancias que influyen en la rotura por fatiga son:

- ✓ Variaciones de sección: el límite de fatiga se reduce por los cambios bruscos de sección o entalladuras de cualquier otra clase (sitio con concentración de esfuerzos).
- ✓ Temperatura: en casi todos los materiales metálicos el aumento de temperatura por encima de cierto valor, disminuye el esfuerzo límite de fatiga. También existe fatiga térmica que se produce por un cambio en la temperatura; este sucede cuando el material se calienta de manera no uniforme, haciendo que unas partes se dilaten más que otras.
- ✓ Tamaño de la pieza: no es lo mismo trabajar con componentes pequeños, que con componentes muy grandes; en estos existe mayor probabilidad de rotura.
- ✓ Tratamientos térmicos: las características internas provocadas por tratamientos térmicos, crean localización de esfuerzos que pueden originar fisuras.
- ✓ Corrosión: cuando la corrosión existe y va actuando, cada punto de corrosión se convierte en un entalle que rebaja notablemente el límite de fatiga.

### **j) Transición vítrea**

A temperaturas bajas, el polímero se encuentra en su estado vítreo, en el que los movimientos moleculares (saltos conformacionales) están “congelados”. La variación de la capacidad calorífica con la temperatura

es de forma lineal. Al llegar a la transición vítrea comienzan ya a tener lugar movimientos de segmentos de las cadenas del polímero, aumenta el volumen libre, haciéndose el material más blando. La capacidad calorífica de este estado es diferente del correspondiente al estado vítreo, teniendo lugar un salto en  $C_p$  a la temperatura de transición vítrea,  $T_g$ . Desde un punto de vista termodinámico, la transición vítrea, puede considerarse como una transición de segundo orden, ya que es la segunda derivada de la función característica termodinámica, la energía libre de Gibbs  $G$ , la que sufre un salto durante la transición [ $c_p/T = (\partial^2/\partial T^2)_p$ ]. Por tanto, la transición vítrea no lleva asociado ningún cambio de fase (transición isofásica).

El factor más importante que determina el valor de la temperatura de transición vítrea, es la flexibilidad de la cadena polimérica considerada aisladamente y de las interacciones entre tales cadenas. La flexibilidad de la cadena viene determinada, pues, por la estructura química. Las cadenas formadas por enlaces C-C y C-O, son notablemente flexibles y así las poliolefinas tienen  $T_g$ s relativamente bajas. La rotación alrededor del enlace C-C viene limitada por la sustitución por grupos alquilo y, así, el polipropileno y otras poliolefinas ramificadas tienen una  $T_g$  más alta que la del polietileno. Estructuras poliméricas mucho más rígidas, como la del polimetacrilato de metilo y los policarbonatos, presentan  $T_g$  altas.

El término temperatura de fusión sólo se debe emplear en los polímeros cristalinos y semicristalinos, en el caso de los amorfos por encima de la  $T_g$  las cadenas adquieren mayor movilidad llegando a hacerse fluidas sin que exista realmente fusión, en este caso se habla de un intervalo de ablandamiento.

Por encima de la  $T_g$  los enlaces secundarios de las moléculas son mucho más débiles que el movimiento térmico de las mismas, por ello el polímero se torna gomoso y adquiere cierta elasticidad y capacidad de deformación plástica sin fractura. Este comportamiento es específico de polímeros termoplásticos y no ocurre en polímeros termoestables.



Existen varios tipos de Nylon, aunque en la actualidad los más importantes son el Nylon 6 y el Nylon 6,6.

El nylon 6 o policaprolactona es formado por la polimerización de la abertura del anillo de la caprolactona. En este proceso, la banda del péptido sin la molécula de la caprolactona es rota, con los grupos activos de cada uno de los lados, se reforman dos nuevas bandas mientras que el monómero llega a formar parte de la cadena polimérica. En este polímero, todas las bandas de amidas están en la misma dirección, pero esto no es causa de una mayor divergencia de las propiedades del nylon 6,6.

El nylon 6,6, además llamado nylon 66, es obtenida por la policondensación de la hexametildiamina (6 átomos de carbono) y el ácido adíptico (6 átomos de carbono). Las unidades de diácido y de diamina alternan en la cadena polimérica.

Las poliamidas presentan unas propiedades físicas próximas a las de los metales como la resistencia a la tracción entre 400-600 Kg/cm<sup>2</sup>. Tienen un coeficiente de rozamiento muy bajo no necesitando lubricantes las piezas que son sometidas a fricción, buena resistencia química, fácil moldeo, y resistencia a temperaturas de trabajo de hasta 1200 °C.

De manera general, las características del Nylon, son:

- ✓ Dureza.
- ✓ Capacidad de amortiguación de golpes, ruido, vibraciones.
- ✓ Resistencia al desgaste y calor.
- ✓ Resistencia a la abrasión.
- ✓ Inercia química casi total.
- ✓ Antiadherente.
- ✓ Inflamable.
- ✓ Excelente dieléctrico.
- ✓ Alta fuerza sensible.

- ✓ Excelente abrasión.

Como fibra debido a su elasticidad, resistente, no la ataca la polilla, no requiere planchado, se utiliza en la confección de medias, tejidos y telas de punto. Aunque ya hemos dicho que el nailon se usa principalmente en la industria textil. En forma rígida y gracias a la gran resistencia que presenta este material a los agentes químicos, disolventes y abrasión, aunado a la gran dureza y tenacidad hacen de este material el ideal para su uso en piezas que están sometidas a un gran desgaste se utiliza en numerosas aplicaciones en ingeniería, por ejemplo rodamientos, engranajes, cojinetes, neumáticos, especialmente para bicicletas.

Los usos generales del Nylon, se enlistan a continuación:

- ✓ Fibra de Nylon.
- ✓ Medias.
- ✓ Polainas.
- ✓ Cerdas de los cepillos de dientes.
- ✓ Hilo para pescar.
- ✓ Redes.
- ✓ Fibra de alfombra.
- ✓ Fibra de bolsas de aire.
- ✓ Piezas de autos (como el depósito de gasolina).
- ✓ Piezas de máquinas (como engranes y cojinetes).
- ✓ Paracaídas.
- ✓ Cuerdas de guitarra.
- ✓ Chaqueta.
- ✓ Cremalleras.
- ✓ Palas de ventiladores industriales.
- ✓ Tornillos.

## Propiedades mecánicas del Nylon

A continuación se presenta una tabla con las propiedades mecánicas del Nylon 310, que es el producto motivo de nuestra investigación, éste es el polímero que se encuentra en nuestro mercado y pertenece a las poliamidas 6, su nombre comercial es “LAMIGAMID 310”

Tabla 2-1 Propiedades mecánicas del Nylon 310 (Schwartz Technical Plastics LAMIGAMID® 310 Cast Polyamide 6, Conditioned)

Physical Properties	Metric
Density	1.15 g/cc
Moisture Absorption at Equilibrium	2.20 %
Water Absorption at Saturation	7.00 %
	@Temperature 20.0 °C

Mechanical Properties	Metric
Ball Indentation Hardness	125 MPa
Tensile Strength, Yield	65.0 MPa
Creep Strength	>= 12.0 MPa
	>= 16.0 MPa
Tensile Modulus	2.80 GPa
Flexural Modulus	2.50 GPa
Flexural Strength	60.0 MPa
Compressive Strength	39.0 MPa
	63.0 MPa
	90.0 MPa
Coefficient of Friction	0.0800
Coefficient of Friction, Dynamic	0.420
Tear Strength Test	>= 0.250
K Factor (Wear Factor)	9.00e-11
Izod Impact Resistance	NB
Izod Impact, Notched (ISO)	>= 15.0 kJ/m <sup>2</sup>

Fuente: Tomado de MatWeb Datos Técnicos de Materiales

<http://www.matweb.com/search/GetMatsByTradename.aspx?navletter=L&tn=LAMIGAMID%C2%AE>

### 2.1.2.6 Teflón

El Teflón PTFE es un polímero que gana sus características del efecto agregado de los enlaces del carbón-flúor, al igual que todos los fluocarbonos, cuya polimerización y cadena molecular se presenta en la figura 2.6.

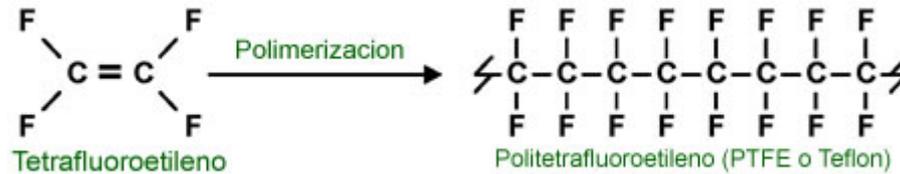


Figura 2-6 Monómero del Teflón

Fuente: Tomado de comercioindustrial.com, Brunssen de Occidente

El coeficiente de fricción de plásticos se mide generalmente contra el acero pulido. El coeficiente de fricción de PTFE Teflón es 0.1 o menos, que son los segundos lo más bajo posible de cualquier material sólido después del carbón tipo diamante que es el primero.

El PTFE Teflón tiene características dieléctricas excelentes. Esto es especialmente verdad en altas radiofrecuencias, haciéndolo conveniente para el uso como aislador en cables y montajes del conector y como material para las tarjetas de circuitos impresos usadas en las frecuencias microondas. Combinado con su temperatura de fusión elevada, esto le hace el material de la opción como sustituto de alto rendimiento para el polietileno más débil y más bajo del punto de fusión que es de uso general en los usos baratos. Su resistencia a granular extremadamente alta le hace un material ideal para los electrets de fabricación de larga vida, los dispositivos útiles que son los análogos electrostáticos de imanes.

El Teflón debido a su fricción baja, se utiliza para los usos donde es necesaria la acción de desplazamiento de piezas: cojinetes, bujes, engranajes, placas de deslizamiento, etc. En estos usos realiza perceptiblemente mejor que nylon y el acetal; es comparable al polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE), aunque UHMWPE sea más resistente al desgaste que el Teflón. Para estos usos, las versiones del Teflón con el aceite mineral o el disulfuro de molibdeno encajado como lubricantes adicionales en su matriz están siendo manufacturadas.

La alta resistencia a la corrosión de PTFE Teflón le hace el ideal para los ambientes del laboratorio como los envases, los agitadores magnéticos y tubería para los productos químicos altamente corrosivos tales como ácido hidrofúrico, que disolvería los envases de cristal. PTFE Teflón se

puede utilizar como cinta del sello de la cuerda de rosca en usos de la plomería.

### **Utilización del Teflón**

El Teflón es uno de los polímeros más utilizados, entre las principales aplicaciones podemos mencionar las siguientes:

- ✓ Utilizado para el sellado en la fabricación de productos de polietileno, como antiadherente y aislante eléctrico.
- ✓ Para el forrado de rodillos de máquinas selladoras de polietileno.
- ✓ En las máquinas envasadoras de: pastas, galletas, granos, semillas, golosinas, tortillas de harina de maíz, etc.
- ✓ En el sellado de la envoltura de productos lácteos y cárnicos.
- ✓ En la elaboración de pan y repostería (forrado de charolas).
- ✓ En el sellado para el envasado de jabones, detergentes, fertilizantes, vitamínicos, etc.
- ✓ Forrado de mesas de corte y planchado. Evita la estática y el abrillantado de telas.
- ✓ Para maquinaria que maneje altas temperaturas que requieran propiedades antiadherentes.
- ✓ Utilizado como separador en la fabricación de piedras abrasivas.
- ✓ En la fabricación de llantas (forrado de mesas de corte).
- ✓ Fabricación de tableros para circuitos integrados, utilizado como antiadherente en las prensas de laminados.
- ✓ Aislamiento eléctrico en rotores (revestido de ranurados, separadores de Fase).
- ✓ Aislamiento, enrollado de alambres y cables.
- ✓ Fabricación de marcos para ventanas.

### **Propiedades mecánicas del teflón**

También se incluye una tabla con las propiedades mecánicas del Teflón que es una marca registrada de DuPont usada bajo licencia, de igual manera es uno de los teflones mayormente comercializados en nuestro medio, pertenece a la familia de los Fluoropolímeros.

Tabla 2-2 DuPont™ Teflon® FEP 5100 Fluoropolymer Resin

Physical Properties	Metric	English
Specific Gravity	2.15 g/cc	2.15 g/cc
Water Absorption	<= 0.0100 %	<= 0.0100 %
Melt Flow	22.0 g/10 min	22.0 g/10 min
Mechanical Properties	Metric	English
Hardness, Shore D	56	56
Tensile Strength, Ultimate	21.0 MPa	3050 psi
Elongation at Break	310 %	310 %
Flexural Modulus	0.634 GPa	92.0 ksi
Coefficient of Friction	0.0800 - 0.300	0.0800 - 0.300
Izod Impact, Notched	NB	NB

Fuente: Tomado de MatWeb Datos Técnicos de Materiales

<http://www.matweb.com/search/GetMatsByTradename.aspx?navletter=L&tn=LAMIGAMID%C2%AE>

### 2.1.2.7 Esfuerzo aplicado

De acuerdo a lo especificado en la norma la probeta es cargada como una viga en cantiléver, por lo que en la misma se desarrollan tanto fuerza cortante ( $V$ ) como momento flector ( $M$ ), como se muestra en la siguiente figura.

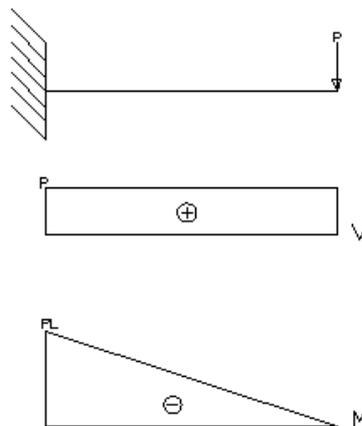


Figura 2-7 Viga en flexión

Fuente: El autor

Estos a su vez generan:

Esfuerzos normales

$$\sigma_x = \frac{Mc}{I}$$

Ecuación 2-1

Y esfuerzos tangenciales

$$\tau_{xy} = \frac{VQ}{bI}$$

Ecuación 2-2

Que varían senoidalmente como se muestra a continuación

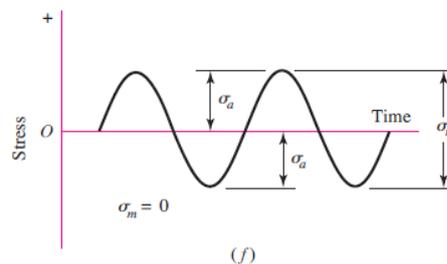


Figura 2-8 Amplitud de esfuerzo

Fuente: Tomado de Shigley 2008

En donde:

- ✓  $\sigma_x$ =Esfuerzo Normal.
- ✓  $\sigma_m$ =Esfuerzo medio.
- ✓  $\sigma_a$ =Amplitud d esfuerzo.
- ✓  $\tau_{xy}$ =Esfuerzo Tangencial.
- ✓ M=Momento flector.
- ✓ c=Distancia desde el eje neutro hasta las fibras externas de la viga.
- ✓ I=Momento de inercia.
- ✓ V=Fuerza cortante.
- ✓ Q=Momento estático.
- ✓ b=Ancho de la sección.

Si se considera como criterio de falla debido a la flexión generada el inicio de fisura, este ocurre en las fibras externa en donde se tiene un esfuerzo normal máximo y un esfuerzo tangencial igual a cero, por lo tanto sabiendo que el momento de inercia es

$$I = \frac{bh^3}{12}$$

Ecuación 2-3

En nuestro caso con la nomenclatura indicada el momento de inercia es

$$I = \frac{b_1 t^3}{12}$$

Siendo

$$c = \frac{t}{2}$$

Ecuación 2-4

Y reemplazando en la Ecuación 2.1 el momento flector que producirá la falla está dado por la siguiente fórmula:

$$\sigma_x = \frac{6M}{bt^2}$$

En donde

t.=altura de la sección o espesor de la probeta.

### 2.1.2.8 Deflexión

En una viga como la de la figura 2.7 que es una representación esquemática de la probeta ensayada, mediante el método de las secciones se puede hacer un análisis de deflexión, se puede determinar la deflexión que ocurre a lo largo de la viga mediante el método de las secciones, para lo cual se realiza un corte o seccionamiento a una distancia X medida desde el extremo izquierdo de la misma, para lo cual se tiene que el momento flector es:

$$M = P(X - L)$$

Y de la ecuación diferencial de segundo orden para la deflexión es:

$$EIY'' = M$$

Ecuación 2-5

Lo que nos da:

$$EIY'' = P(X - L)$$

Integrando sucesivamente dos veces se tiene:

$$EIY' = \frac{P(X - L)^2}{2} + C1$$

$$EIY = \frac{P(X - L)^3}{6} + C1X + C2$$

Ahora como las constantes de integración C1 y C2 son las condiciones de apoyo y para el caso del empotramiento valen cero se tiene:

$$EIY' = \frac{P(X - L)^2}{2}$$

Ecuación 2-6

$$EIY = \frac{P(X - L)^3}{6}$$

Ecuación 2-7

Por lo tanto la deformación en cualquier punto de la viga es:

$$Y = \frac{P(X - L)^3}{6EI}$$

Ecuación 2-8

### 2.1.2.8 Ensayo a fatiga mecánica de los polímeros

Los polímeros pueden experimentar fallo por fatiga en condiciones de carga cíclica. Al igual que con metales, la fatiga se produce a niveles de tensión que son bajos en relación con el límite elástico. Las pruebas a fatiga en los polímeros no han sido tan extensas como con metales, sin embargo, los datos de fatiga se trazan de la misma manera para ambos tipos de material, y el resultante de las curvas tiene la misma forma

general. Curvas de fatiga para algunos polímeros comunes se muestra en las Figuras 2.9 y 2.10. Algunos polímeros tienen un límite de fatiga (un nivel de tensión a la que el estrés por el hecho pasa a ser independiente del número de ciclos), mientras que otros parecen no tener dicho comportamiento. Como era de esperar en la figura la resistencia a la fatiga para los materiales poliméricos son mucho menores comparados con los metales.

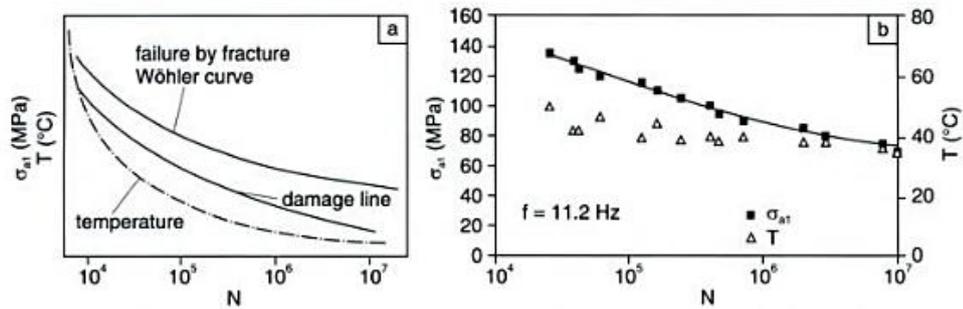


Figura 2-9 Curvas de Wöhler (S-N) según norma DIN 53442 (a), usando PA como ejemplo (b)

Fuente: Fuente: Hanser Verlag Polymer testing

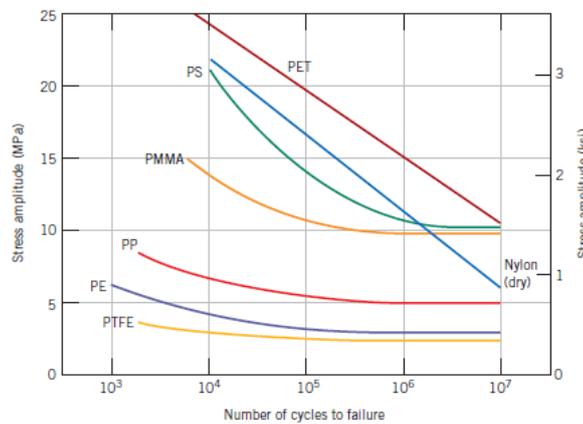


Figura 2-10 Amplitud de esfuerzo Vs número de ciclos

Fuente: Tomado de M. N. Riddell, "A Guide to Better Testing of Plastics," Plast. Eng., Vol. 30, No. 4, p. 78, 1974

El comportamiento a fatiga de los polímeros es mucho más sensible a la frecuencia de carga que para los metales. Polímeros de ciclismo en las frecuencias altas y/o tensiones relativamente grandes puede causar un calentamiento localizado, en consecuencia, el fracaso puede ser debido a un ablandamiento del material.

Los principales métodos de ensayo a fatiga mecánica de los polímeros son:

- ✓ Tension – Tension.
- ✓ Compresión – compresión.
- ✓ Flexión en cuatro puntos (flexural).
- ✓ Viga en voladizo.

Las curvas de Wöhler (S – N) para polímeros son determinados por medio de ensayos a fatiga por flexión, utilizando cargas cíclicas con amplitud de esfuerzo normal máximos y medios constantes o relaciones de esfuerzos  $R=-1$ . La norma DIN 53442 establece el procedimiento para el desarrollo de dicho ensayo, cuyo principio se basa según indica la figura 2.7 Las probetas utilizadas son planas de espesor constante entre 2 y 8 mm, la sección reducida es la sección donde se espera que la probeta falle. Es necesario monitorear la temperatura durante todo el ensayo, el número de ciclos es determinado para posteriormente graficar la curva S – N.

El comportamiento a fatiga mecánica de los polímeros en ciclos bajos se considera hasta  $N=10^4$  ciclos a una frecuencia  $f=1-3$  Hz, y a fatiga por flexión  $f=30$  Hz según la ASTM D 671 estas pruebas son realizadas con una relación de esfuerzos de  $R=0,1$ , excepto para fatiga por flexión en donde  $f=30$  Hz y  $R=-1$

El ensayo estándar de fatiga de los plásticos en flexión se realiza según se especifica en el "Manual on Fatigue Testing", ASTM STP 91-A y "Mechanical Testing of Materials", A.J. Fenner, Philosophical Library, Inc. ASTM D 671

### **Relación Módulo de elasticidad Vs Temperatura**

En el comportamiento de los plásticos un factor muy importante a tomar en cuenta es la influencia de la temperatura. La firma Intech ha investigado la influencia de este parámetro en el módulo de elasticidad E específicamente para las poliamidas, como se muestra en la figura siguiente.

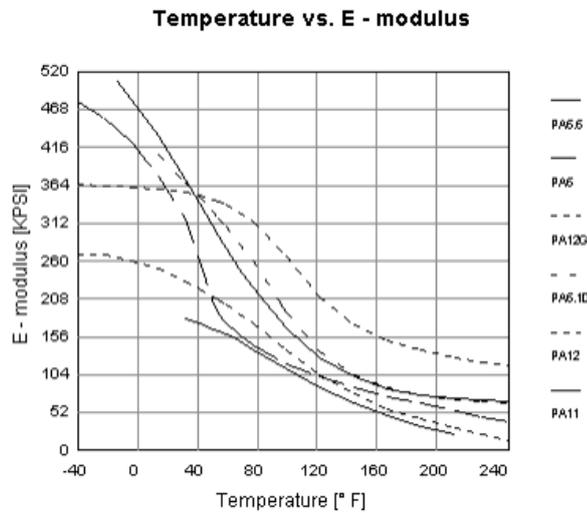


Figura 2-11 Efecto de la temperatura sobre el módulo de elasticidad para la Poliamida  
 Fuente: Tomado de Materiales para engranajes plásticos, Características y propiedades, por: Moya Jorge y otros de la Universidad Veracruzana, Xalapa

De igual manera se tiene para el Teflón la relación entre el módulo de elasticidad Vs la temperatura, investigación realizada por DuPont y representada en la siguiente figura.

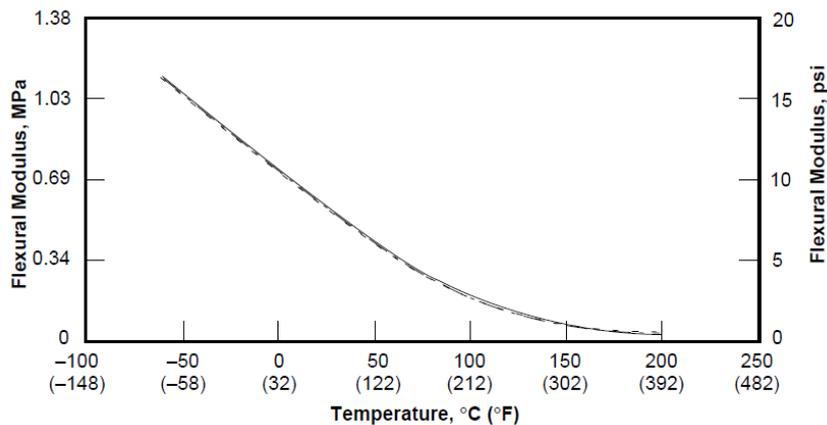


Figura 2-12 Efecto de la temperatura sobre el módulo de elasticidad para el Teflón  
 Fuente: Tomado de Products and Properties Handbook, Teflón FEP of DuPont.

### 2.1.2. 9 Probetas

La norma ASTM E 466 especifica los especímenes usados en las pruebas de fatiga axiales. Sin embargo, para las pruebas en las que se mantiene a la probeta en rotación y flexión (prueba de fatiga), no existe ninguna especificación por parte de la ASTM, ni tampoco en el tipo de máquina a

utilizar. Las dimensiones específicas de los especímenes dependen del objetivo experimental, de la máquina en que va a ser usado, y del material disponible. La ASTM especifica las técnicas de preparación, los detalles y reportes técnicos. En el reporte se debe informar: un boceto del espécimen, con dimensiones; y la medida de la aspereza superficial. La preparación de la superficie es sumamente crítica en todos los especímenes de fatiga. Para los ensayos de fatiga de polímeros por medio de viga en cantiléver la ASTM D 671 ha establecido dos tipos de probetas como las mostradas en las figuras 2.13 y 2.14 con espesores constantes de 2 a 8 mm, en donde la sección reducida es donde se espera que la probeta falle.

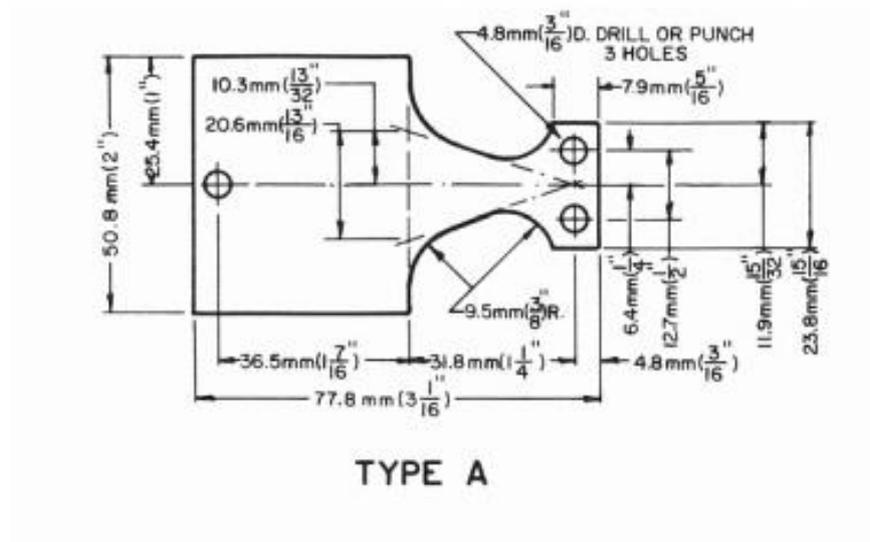


Figura 2-13 Probeta Tipo A para ensayo a fatiga de polímeros

Fuente: Tomado de Handbook of Plastics Testing and Failure Analysis, John Wiley & Sons, (2007)

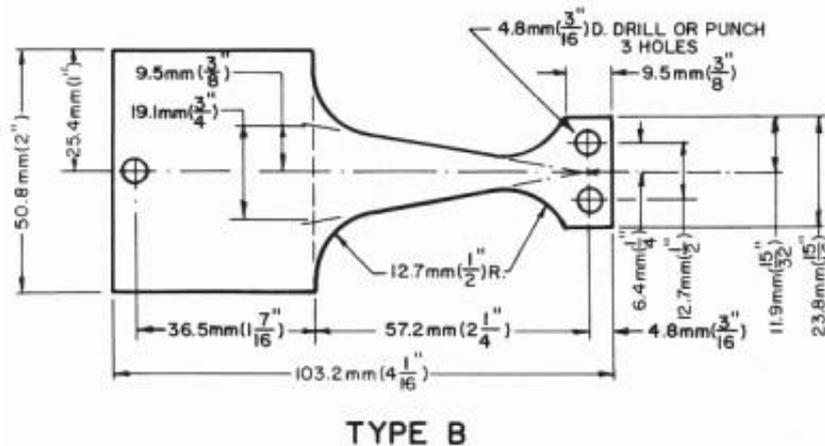


Figura 2-14 Probeta Tipo B para ensayo a fatiga de polímeros

Fuente: Tomado de Handbook of Plastics Testing and Failure Analysis, John Wiley & Sons, (2007)

### 2.1.2.10 Procedimiento de análisis de resistencia a la fatiga<sup>10</sup>

En los polímeros dependiendo de la amplitud de la tensión y de la frecuencia de la aplicación del esfuerzo, el fallo por fatiga se presenta de dos diferentes formas: fallo por fatiga térmica y fallo por fatiga mecánica. La primera conlleva un ablandamiento térmico en el que el material fluye con facilidad precediendo a la propagación de la fisura que conduce al fallo. Este mecanismo requiere la aplicación de grandes amplitudes de tensión en un rango particular de frecuencias. La segunda forma de fallo se presenta a más baja amplitud de tensiones, en la que se observa una propagación de la fisura por fatiga convencional o mecánica. 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.

El procedimiento de ensayo para polímeros según la Norma ASTM D 671 consiste en ensayar probetas usando máquinas para vigas en cantiléver capaz de producir esfuerzos de amplitud constante en cada ciclo, la característica principal de esta máquina es un rotor excéntrico montado

<sup>10</sup> Facultad de Ingeniería Industrial, edición 2008-1  
[copernico.escuelaing.edu.co/lpinilla/www/.../PROTOCOLO%20FATIGA.pd...](http://copernico.escuelaing.edu.co/lpinilla/www/.../PROTOCOLO%20FATIGA.pd...)

sobre el eje de un motor que gira a velocidad constante (aprox. 1800 rpm) este movimiento desbalanceado de la excéntrica produce una fuerza alternante, el número de revoluciones es contado mediante un circuito electrónico que se para cuando la probeta falla, una máquina utilizada para este ensayo se muestra en la figura 2.15 Se debe tener cuidado de eliminar todas las asperezas y marcas que puedan dar errores en el ensayo.



Figura 2-15 Máquina para ensayo a fatiga de polímeros

Fuente: Tomado de CEAST U.S.A. Inc

#### 2.1.2.11 Nomenclatura

- A Área / constante.
- $b_i$  Ancho de probeta / Ancho de sección.
- c Distancia desde el eje neutro hasta las fibras externas de la viga.
- C Capacidad básica dinámica.
- $C_o$  Capacidad básica estática.
- $C_i$  Constantes de integración.
- D Diámetro.
- d Error / promedio de diferencias muestrales / diámetro

E	Módulo de elasticidad.
F	Fuerza.
f	Frecuencia.
h	Altura de sección.
H	Potencia.
H <sub>o</sub>	Hipótesis nula.
H <sub>a</sub>	Hipótesis alternativa.
I	Momento de inercia.
k	Constante / tamaño de muestra / condición de apoyo.
k <sub>i</sub>	Factores de Marín.
L	Longitud.
L <sub>h</sub>	Vida nominal en horas.
M	Momento flector.
m	Masa.
N	Número de ciclos / potencia.
n	Tamaño de muestra / factor de seguridad.
P	Carga aplicada / potencia / carga dinámica equivalente.
P <sub>o</sub>	Carga estática equivalente.
Q	Momento estático.
q	Proporción.
R	Relación de esfuerzos.
r	Relación de esbeltez.

S	Esfuerzo.
s	Varianza de la muestra.
Se	Límite de fatiga.
Sut	Resistencia última a la tracción.
T	Temperatura / estadístico de prueba / torque.
t	Espesor de probeta / estadístico de prueba.
V	Fuerza cortante / volumen / velocidad tangencial.
$W^t$	Carga tangencial.
X	Distancia hasta la falla / variable.
Y	Deflexión / variable
Z	Estadístico de prueba
$Y'$	Rotación.
$Y''$	Segunda derivada de la deflexión / Fuerza cortante.
$\alpha$	Aceleración angular.
$\delta$	Deflexión.
$\sigma^2$	Varianza poblacional.
$\sigma_x$	Esfuerzo normal.
$\tau_{xy}$	Esfuerzo tangencial.
$\sigma_m$	Esfuerzo medio.
$\sigma_a$	Amplitud d esfuerzo.
$\tau_{xy}$	Esfuerzo Tangencial.
$\omega$	Velocidad angular.

## 2.2 FUNDAMENTACIÓN FILOSÓFICA

La presente investigación se fundamentó en el paradigma crítico propositivo, ya que las características de este paradigma permitieron ser flexibles en cuanto a consideraciones de diseño y métodos de elaboración que a la presente investigación compete.

Además permitió una correcta interpretación, comprensión y explicación de las variables involucradas en esta investigación para considerar las cualidades más no las cantidades que en el desarrollo de dicha investigación se podrán encontrar y producir durante el transcurso investigativo del tema.

Mediante el paradigma propuesto se pudo plantear alternativas de solución al presente problema en desarrollo, siempre enfocándose a un desarrollo de fácil comprobación y proporcionando una correcta comprensión.

En la antigua Grecia la aplicación de los materiales y su contacto directo con el hombre permitió un mayor acercamiento al conocimiento científico. Así se observa a Tales de Mileto y su aseveración de “El mundo está compuesto por agua”, a Anaxímenes que señala al aire como materia prima de la que se derivan todas las demás por transformación, Empédocles con la introducción de los cuatro elementos fundamentales de la materia: el agua, el aire, el fuego y la tierra y Demócrito que atribuía el origen de la materia a la congregación de átomos, y relaciono sus propiedades con el movimiento de estas partículas indivisibles. Todas estas aseveraciones independientemente de su verdad o falsedad buscan una explicación en los propios elementos de la naturaleza y por lo tanto permiten ser comprobables.

Al final de la antigüedad la alquimia, cuya meta principal era el descubrimiento de la piedra filosofal, material capaz de transformar el plomo en oro, potenció descubrimientos importantes y se comenzó el uso de otros materiales, como el antimonio, los ácidos, el bismuto, el zinc, los cerámicos, etc.

En México la ingeniería de materiales llegó con el establecimiento del Real Seminario de Minería en 1792 donde se reunieron gran cantidad de celebres investigadores españoles, alemanes y novo hispanos, bajo la dirección de Fausto de Elhúyar, descubridor del tungsteno, permitiendo el nacimiento de tecnologías revolucionarias como lo atestiguó Von Humboldt en su visita en 1803, llevando a México a ser el primer productor mundial de plata, hecho que se mantiene vigente en nuestros días. Un gran descubrimiento lo constituyó el hallazgo del elemento químico número 23, por Don Manuel Andrés del Rio en el año 1805, bautizado como Eritronio, aunque treinta años después los estudios de Niels Gabriel Sedstromen anunciarían al mismo elemento con el nombre de vanadio, cuyo nombre permanece hasta la fecha.

En la actualidad es posible un mejor estudio de la estructura y de las propiedades de los materiales gracias a una serie de equipos: microscopios electrónicos, máquinas universales, medidores de dureza, etc. Que permiten una medición adecuada de las mismas y por lo tanto un control de estas.

### **2.3 FUNDAMENTACIÓN LEGAL**

El presente trabajo se desarrollará mediante la aplicación de varias normas, entre ellas tenemos las siguientes:

- ASTM D 628 Determinación de las propiedades mecánicas en tensión para plásticos.
- ASTM D 790 Determinación de las propiedades mecánicas en flexión para plásticos.
- ASTM D 695 Determinación de las propiedades mecánicas en compresión para plásticos.
- ASTM D 671-90 Ensayo de materiales para verificar el comportamiento a fatiga de los polímeros.
- ASTM D 573 Deterioro bajo condiciones de temperatura.
- CASA I+D-E Normas para ensayo de materiales.

## 2.4 CATEGORÍAS FUNDAMENTALES

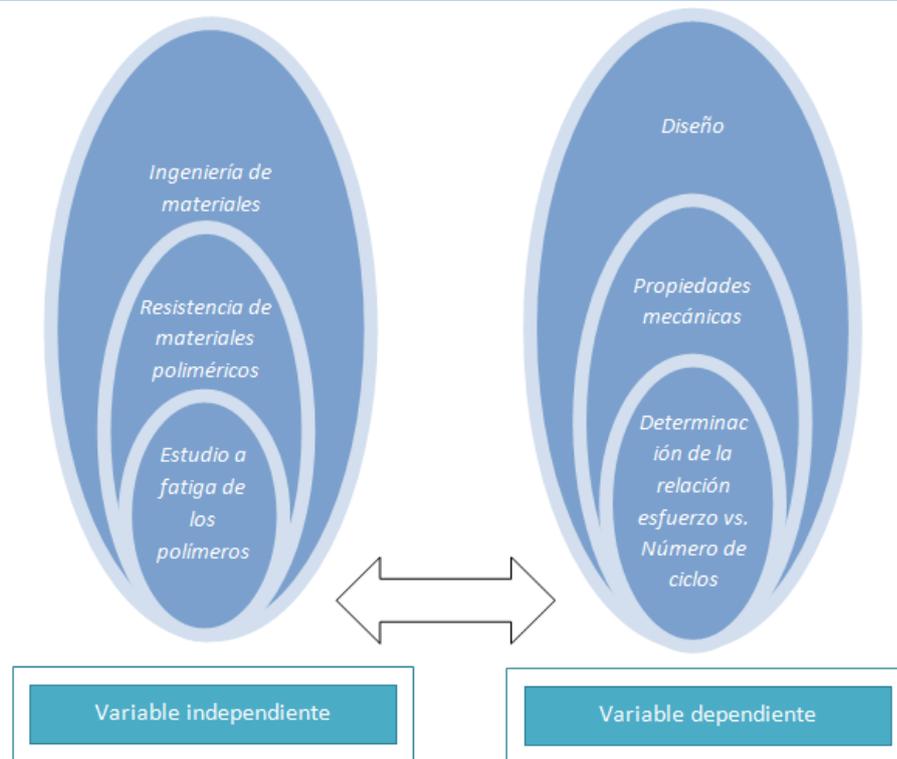


Figura 2-16 Operacionalización de variables

Fuente: El autor

## 2.5 HIPÓTESIS

Con el estudio del comportamiento a fatiga mecánica del Teflón y el Nylon se determina la posibilidad de utilizar en el diseño de elementos de máquinas.

## 2.6 SEÑALAMIENTO DE VARIABLES

### 2.6.1 VARIABLE DEPENDIENTE:

Estudio del comportamiento a fatiga mecánica del Teflón y el Nylon.

### 2.6.2 VARIABLE INDEPENDIENTE:

Determinar la relación esfuerzo - número de ciclos bajo la aplicación de cargas variables.

## **CAPÍTULO III**

### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.1 ENFOQUE**

En el presente trabajo se hace un análisis y estudios predominantemente cuantitativos, ya que las variables existentes en el proyecto admiten fracciones los cuales a su vez son explicativos, porque se realizan diferentes tipo de cálculos para determinar el comportamiento mecánico de los polímeros (Nylon y Teflón).

La información necesaria indispensable para la realización del proyecto proviene principalmente de fuentes primarias y secundarias, realizando posteriormente el análisis de las mismas.

Las fuentes primarias nos proporcionaran información importante, la cual se recopila o encuentra en fuentes como en libros, tesis, documentales, internet, etc.

Las secundarias son resúmenes y listados de ensayos realizados con probetas estandarizadas y sometidas a fatiga, para determinar su resistencia.

#### **3.2 MODALIDAD BÁSICA DE LA INVESTIGACIÓN**

##### **3.2.1 DE CAMPO**

La investigación de laboratorio es indispensable en este proyecto en vista que se ensayan las probetas para la recolección de datos y someterlo a un análisis estadístico para determinar las medidas de tendencia central y desviación, para evaluar la fiabilidad de nuestro proyecto.

### **3.2.2 BIBLIOGRÁFICO**

La recolección de información es uno de los procesos más importante y complejos ya que se puede recurrir a fuentes tales como libros, tesis, internet no solamente para la investigación de las propiedades mecánicas de los polímeros sino también para comparar datos y ampliar los conocimientos.

### **3.2.3 EXPERIMENTAL**

La investigación experimental es indispensable en este proyecto puesto que para el desarrollo del trabajo se analiza y evalúa la fiabilidad de nuestro proyecto. Para lo cual se utiliza una máquina de ensayos a fatiga de acuerdo a Norma ASTM D 671 de viga en cantiléver mediante la cual se realiza una serie de pruebas para poder establecer la relación entre el esfuerzo generado y el número de ciclos aplicados (curva S – N)<sup>11</sup>. Ya que la representación de las curvas de Wöhler son importantes para el análisis a fatiga de los materiales.

## **3.3 NIVEL O TIPO DE INVESTIGACIÓN**

### **3.3.1 EXPLORATORIA**

El proyecto a desarrollar trata de solucionar un problema que se presenta en la actualidad en el sector de la ingeniería de materiales, el incremento de este mercado y los problemas que conlleva a obtener un conjunto de datos que nos permite garantizar su utilización en el diseño de elementos de máquinas.

### **3.3.2 DESCRIPTIVO**

Se puede predecir que el proyecto cumple con las necesidades que este sector requiere en especial los profesionales en el área de ingeniería mecánica dedicados al diseño de maquinaria a los cuales va destinado

---

<sup>11</sup> *August Wohler, 1819-1914. Ingeniero alemán que realizó experimentos sistemáticos sobre la fatiga entre 1852 y 1870*

este estudio e investigación la cual busca una mejor calidad en el producto que está obteniendo.

Los conocimientos que se deben tener para el desarrollo y la aplicación de este proyecto de investigación son muy amplios, ya que se requiere de asignaturas implicadas pero en especial ingeniería de materiales, mecánica de sólidos, diseño mecánico y estadística.

### **3.3.3 ASOCIACIÓN DE VARIABLES**

En este proyecto fue importante asociar las variables, ya que de esta manera se pudo determinar si en realidad la implementación del estudio del comportamiento mecánico de los polímeros motivo de estudio en realidad contribuye en la determinación de la posibilidad de utilización de los mismos como elementos de máquinas.

### **3.4 POBLACIÓN Y MUESTRA**

Con la estimación del tamaño de muestra se pudo conocer la proporción de la población que tiene las características obtenidas en este estudio, a partir del estudio de un solo grupo de ellas (una muestra). Los datos estadísticos sirven para conocer los parámetros de la población, por eso, se habla de conocer el tamaño de la muestra necesaria, para la estimación de parámetros con una determinada precisión.

La población sobre la cual trata la investigación está constituida por el volumen de producción mundial del Teflón y el Nylon, dicha producción es indeterminada, por lo que el tamaño de la muestra se determinará utilizando la siguiente ecuación<sup>12</sup>.

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 \cdot p_0 \cdot q_0}{d^2}$$

Ecuación 3-1

En esta ecuación se puede observar que el tamaño de la muestra depende de tres factores:

---

<sup>12</sup> (Fuentelsaz, 2004)

- ✓ El nivel de confianza,  $(1-\alpha)$ , seguridad o probabilidad con la que el método dará una respuesta correcta, los niveles de confianza para los intervalos de confianza son del 95% al 99%. El nivel de confianza prefijado da lugar a un coeficiente ( $Z_\alpha$ ) que está en función de  $\alpha$ , ver tabla 3-1.
- ✓ La precisión que deseamos para nuestro estudio o error máximo d. y
- ✓ La proporción esperada de que las mismas tengan dicha características una idea del valor aproximado del parámetro que queremos medir. Tomar un valor de  $p=0.5$  maximiza el tamaño muestral.

Tabla 3-1 Valores de Z más utilizados, según el valor de  $\alpha$

$\alpha$	0,10	<b>0,05</b>	0,01	0,001
$Z_\alpha$	1,645	<b>1,960</b>	2,576	3,291

Fuente: Tomado de (Fuentelsaz, 2004)

### 3.5 OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

#### 3.5.1 VARIABLE INDEPENDIENTE:

Estudio sobre el comportamiento a fatiga mecánica del Teflón y Nylon.

54

CONCEPTO	CATEGORÍA	INDICADOR	ITEMS	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
La fatiga mecánica de los polímeros se define como el fallo debido a cargas repetitivas... que incluye la iniciación y propagación de una grieta o conjunto de grietas hasta el fallo final por fractura" (Fuchs, 1980).	Fatiga mecánica	Esfuerzo	MPa	Ensayos de laboratorios
	Falla de materiales poliméricos	Número de ciclos	$N \cdot 10^{(0-5)}$ ciclos	Hoja de toma de datos
		Resistencia a fatiga de polímeros	$Se = Ff \cdot Sut$ $Sut(\text{Teflón}) = 200 \text{ a } 300 \text{ Kg/cm}^2$ $Sut(\text{Nylon}) = 650 \text{ Kg/cm}^2$	Ensayos de laboratorios Hoja de toma de datos

### 3.5.2 VARIABLE DEPENDIENTE:

Determinación de la relación esfuerzo – número de ciclos del teflón y nylon para determinar su adecuada utilización en el diseño de elementos de máquinas.

CONCEPTO	CATEGORÍA	INDICADOR	ÍTEMS	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
Es la relación que existe entre la carga de flexión totalmente invertida y el número de veces que se aplica la misma hasta el inicio de la falla o rotura, esta relación es un parámetro importante en el diseño.	-Carga aplicada  -Número de ciclos hasta la falla  -Diseño	Pesos normalizados  Frecuencia y tiempo de ensayo  Límite de fatiga  Criterios de fallas	KN  30 Hz; 1,4 Horas  -Diagrama esfuerzo-deformación  -Método de fatiga-vida (deformación-vida)	Ensayos de laboratorios Hoja de toma de datos  Ensayos de laboratorios Hoja de toma de datos Ensayos de laboratorios Hoja de toma de datos

### **3.6 RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN**

De acuerdo al desarrollo de la operacionalización de variables se recolectó información por medio de las siguientes técnicas con sus respectivos instrumentos:

#### **3.6.1 OBSERVACIÓN**

Para lo cual se toma notas de todo lo que se considera necesario en un cuaderno, para describir los hechos de significación especial, que ayuda a registrar incidentes hasta tener una base informativa suficiente; se utiliza un cuaderno de notas para describir todo lo observado, además se anota fechas, cantidades y expresiones que se escuchan.

### **3.7 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS**

#### **3.7.1. PLAN DE PROCESAMIENTO**

A continuación se presenta de manera detallada, el procedimiento para llevar a cabo la prueba de fatiga:

- 1) Se determina qué material se utilizará para la prueba (esto depende del material en que se han fabricado las probetas previamente).
- 2) Se determina la deflexión que se aplica a la probeta, la misma que a su vez determina el esfuerzo aplicado para el desarrollo de la prueba.
- 3) Este esfuerzo inducido equivale a un porcentaje del esfuerzo máximo o resistencia a la tracción del material, (Se recomienda aplicar esfuerzos menores al 90% y mayores al 30% de la resistencia a la tracción del material).
- 4) Se procede a ubicar la probeta en los soportes.
- 5) Con la probeta lista y ajustada, se procede a verificar que el interruptor interno esté activado y ubicado en el sitio que garantice que la máquina se detenga justo en el momento de la falla del material.

- 6) Se enciende el interruptor del contador numérico de ciclos. En este momento la probeta empieza a girar.
- 7) Se observa detalladamente el movimiento que presenta la probeta (tensión – compresión) al encontrarse aplicada la carga.
- 8) Registrar el número de ciclos que ha resistido el material hasta presentar falla, este dato se obtiene del contador digital de ciclos.
- 9) Extraer las partes de la probeta (rota) utilizada de la máquina y caracterizar el tipo de falla ocurrido.

### **3.7.1. PLAN DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

A continuación se presenta de manera detallada, el procedimiento para analizar e interpretar los resultados de la prueba de fatiga:

- 1) Tabulación de los datos de acuerdo a la necesidad y a la relación que tengan con las variables de la hipótesis, se elaboran tablas en las que se indique:
  - a) Material.
  - b) Dimensiones.
  - c) Tipo de carga aplicada.
  - d) Esfuerzo generado.
  - e) Frecuencia.
  - f) Número de ciclos hasta la falla.
  - g) Tipo de falla.
- 2) Representación de los resultados obtenidos a través de las siguientes tablas y gráficos.
  - a) Tablas de datos de materiales ensayados.
  - b) Tablas de relación entre esfuerzo generado y número de ciclos hasta la falla.
  - c) Se elaboran gráficos de distribución de frecuencia.
  - d) Gráficos el esfuerzo generado versus el número de ciclos hasta la falla.
  - e) Diagrama de Gauss.
  - f) Diagramas de caja para determinar datos anómalos.

- 3) Analizar y relacionar los resultados obtenidos con las diferentes partes de nuestra investigación y con los requerimientos planteados, para lo cual se realiza un análisis estadístico descriptivo y por último un análisis inferencial para poder hacer proyecciones necesarias para el diseño mecánico.
- 4) Interpretar los resultados obtenidos y establecer la posibilidad de utilizar estos materiales como elementos de máquinas.

## CAPÍTULO IV

### 4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE INVESTIGACIÓN

##### 4.1.1 DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE MUESTRA

Aplicando la ecuación 3.1, utilizando la tabla 3.1 y considerando un error del 7 % se obtiene el tamaño de muestra como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 4-1 Determinación del tamaño de muestra

p	q	p.q	$Z_{\alpha}$	$\alpha$	precisión(error)	Tamaño n
0.95	0.05	0.0475	1.645	0.1	7%	26.23

Fuente: El autor

Lo que significa que el estudio realizado mediante la utilización de 26 probetas de cada material (Nylon y Teflón) se tendrá una probabilidad del 95 %, de que el 90 % de la producción tendrá las características obtenidas en este estudio y con un error máximo del 7 %.

##### 4.1.2 VERIFICACIÓN DE LA FRECUENCIA DE APLICACIÓN DE ESFUERZO

Para tener una seguridad sobre la frecuencia de aplicación de esfuerzos en la probeta en cantiléver, se verifica la misma aunque en la placa del motor se observa que funciona a 1720 RPM, luego de realizar 16 ensayos en los que se mide el tiempo y se relaciona con el número de ciclos mediante un contador electrónico. Los datos se presentan en la tabla 4.2, luego del análisis estadístico realizado se demuestra que en realidad el motor funciona a 1799 RPM como se muestra en la tabla 4.3, con lo cual

nos da una frecuencia de 29,99 Hz como muestran los datos estadísticos en la tabla 4.4, con lo que se cumple con lo que exige la Norma ASTM D 671, por lo tanto nuestro estudio se realizó con una frecuencia de 29,99 Hz.

Tabla 4-2 Determinación de la frecuencia de aplicación de cargas

<b>Determinación de la frecuencia</b>				
<b>Ensayo #</b>	<b>Revoluciones</b>	<b>Tiempo [s]</b>	<b>Frecuencia [Hz]</b>	<b>RPM</b>
1	662	22	30.091	1805.455
2	1471	49	30.020	1801.224
3	1816	61	29.770	1786.230
4	2191	72	30.431	1825.833
5	2322	77	30.156	1809.351
6	2403	81	29.667	1780.000
7	3413	114	29.939	1796.316
8	3608	120	30.067	1804.000
9	3626	121	29.967	1798.017
10	3979	133	29.917	1795.038
11	3998	134	29.836	1790.149
12	5394	180	29.967	1798.000
13	7675	256	29.980	1798.828
14	10800	360	30.000	1800.000
15	23380	780	29.974	1798.462
16	170250	5683	29.958	1797.466

Fuente: El autor

Con los datos de la tabla anterior se calculan los datos de tendencia central y de dispersión tanto para las revoluciones del motor como para la frecuencia.

Tabla 4-3 Datos estadísticos para las revoluciones

DATOS ESTADÍSTICOS	
Media	1799.023
Error típico	2.525
Mediana	1798.239
Moda	#N/A
Desviación estándar	10.099
Varianza de la muestra	101.982
Curtosis	2.946
Coefficiente de asimetría	0.814
Rango	45.833
Mínimo	1780.000
Máximo	1825.833
Suma	28784.367
Cuenta	16.000

Fuente: El autor

Tabla 4-4 datos estadísticos para la frecuencia

DATOS ESTADÍSTICOS	
Media	29.984
Error típico	0.042
Mediana	29.971
Moda	#N/A
Desviación estándar	0.168
Varianza de la muestra	0.028
Curtosis	2.946
Coefficiente de asimetría	0.814
Rango	0.764
Mínimo	29.667
Máximo	30.431
Suma	479.739
Cuenta	16.000

Fuente: El autor

#### 4.1.3 RELACIÓN DE ESFUERZO

Por definición la relación de esfuerzo, en flexión es la relación que existe entre el esfuerzo mínimo y el esfuerzo máximo generado en la probeta, como indica la siguiente ecuación.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{máx}}$$

Ecuación 4-1

Como se indicó anteriormente el esfuerzo generado en una viga en cantiléver en el punto donde la probeta falla depende exclusivamente del esfuerzo normal dado por la ecuación 2.1, según la forma de funcionamiento de la máquina esquematizado en la siguiente figura.

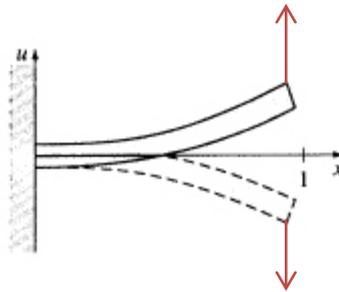


Figura 4-1 Deformación de la probeta

Fuente: El autor

Este esfuerzo se aplica cíclicamente y su variación es sinusoidal como se indica en la figura 2.8 y reproducida a para facilitar la explicación.

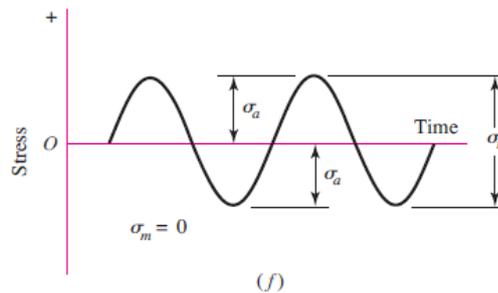


Figura 4-2 Variación de esfuerzo

Fuente: (Shigley's, 2008)

Por lo tanto La relación de esfuerzo es igual a -1 como así también lo especifica la norma ASTM D 671.

#### 4.1.4 ANÁLISIS DE DEFLEXIÓN

Para determinar la deformación que se genera en la probeta se realizó un análisis de la deflexión en una viga en cantiléver como la representada en la figura 4.1, para lo cual se desarrolla la ecuación diferencial de segundo orden de la deformada de la viga (ecuación 2.5).

$$EIY'' = M$$

El momento flector en el punto X donde se genera la falla, de acuerdo a la figura 4.3 dado por la ecuación 2.5 es:

$$M_x = PX - PL$$

Reagrupando convenientemente entonces el momento flector a una distancia X desde el extremo izquierdo de la viga está dada por la siguiente ecuación.

$$M_x = -\left(1 - \frac{X}{L}\right)PL$$

Ecuación 4-2

Por lo tanto el esfuerzo a una distancia X desde el extremo izquierdo que es donde la probeta falla, la ecuación 2.1 queda de la siguiente manera.

$$\sigma_x = -\frac{6PL}{bt^2} \cdot \left(1 - \frac{X}{L}\right)$$

Ecuación 4-3

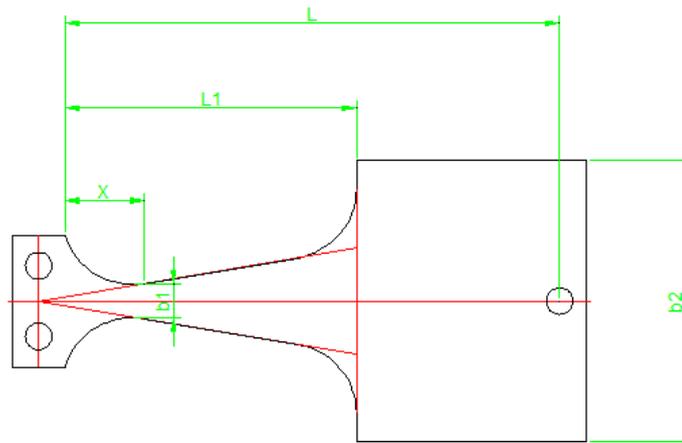


Figura 4-3 Probeta

Fuente: El autor

Como se explicó en el capítulo 2 los ensayos se realizaron empezando por un esfuerzo muy cercano a la resistencia del material que para el Nylon 310 (Schwartz Technical Plastics LAMIGAMID® 310 Cast Polyamide 6, Conditioned) utilizado para el estudio es 65 MPa (ver tabla 2.1) y para el Teflón (DuPont™ Teflón® FEP 5100 Fluoropolymer Resin) también utilizado en este estudio es de 21 MPa. (ver tabla 2.2), en los posteriores ensayos este esfuerzo se va disminuyendo hasta aproximadamente un 30 % de este valor o hasta que la probeta tenga un número de ciclos lo suficientemente alto, (límite de fatiga del material).

Debido a que en la máquina de ensayo lo que se puede regular es la amplitud de la deflexión, lo que se ha hecho es buscar una relación que permita determinar el esfuerzo en función de la deflexión fijada.

Para esta viga esquematizada en la figura 4.1 se tiene que la reacción y el momento en el apoyo vienen expresados como se muestra en la siguiente figura.

1 Cantilever—end load

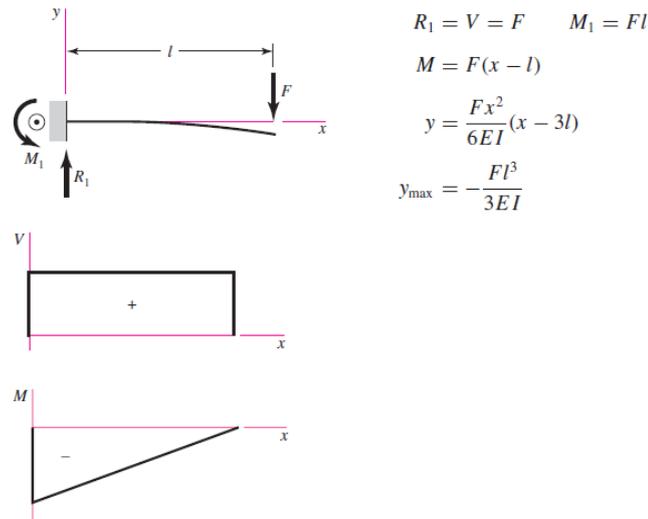


Figura 4-4 Diagrama de fuerza cortante y momento flector

Fuente: tomada de Shigley 8° edición

Debido al cambio de sección en la probeta, se debe analizar en los dos tramos, es decir en el tramo  $0 \leq X \leq L_1$  y luego en el tramo  $L_1 \leq X \leq L$ , para lo cual se utiliza el método de las secciones.

En el tramo  $0 \leq X \leq L_1$

El momento flector dado por la ecuación 4.2 es

$$Mx = -\left(1 - \frac{X}{L}\right)PL$$

Por lo tanto la ecuación 2.5 se convierte en:

$$EIY'' = PX - PL$$

Integrando sucesivamente se tiene

$$EI_1Y' = P\frac{X^2}{2} - PLX + C_1$$

$$EI_1Y = P\frac{X^3}{6} - PL\frac{X^2}{2} + C_1X + C_2$$

Donde  $C_1$  y  $C_2$  son constantes de integración que dependen de las condiciones de borde o frontera, es decir cuando  $X=0$ , la rotación de la viga  $Y'$  y el desplazamiento  $Y$  son cero.

$$Y' = 0$$

$$Y = 0$$

Reemplazando y desarrollando para  $C_1$  y  $C_2$  se tiene que

$$C_1 = 0$$

$$C_2 = 0$$

Por lo que las ecuaciones de la deformada para este tramo serán:

$$Y' = \frac{1}{EI_1} P \left( \frac{X^2}{2} - LX \right)$$

Ecuación 4-4

$$Y = \frac{1}{EI_1} P \left( \frac{X^3}{6} - L \frac{X^2}{2} \right)$$

Ecuación 4-5

Para analizar la deformación en el segundo tramo se requerirá tanto la rotación como la deflexión cuando  $X=L_1$ , en este punto.

Para  $X=L_1$

Se tiene

$$Y' = Y'_1$$

$$Y = Y_1$$

$$Y'_1 = \frac{1}{EI_1} P \left( \frac{L_1^2}{2} - L \cdot L_1 \right)$$

Ecuación 4-6

$$Y_1 = \frac{1}{EI_1} P \left( \frac{L_1^3}{6} - L \frac{L_1^2}{2} \right)$$

Ecuación 4-7

Luego en el tramo  $L_1 \leq X \leq L$  se tiene

$$EI_2 Y' = P \frac{X^2}{2} - PLX + C_3$$

$$EI_2 Y = P \frac{X^3}{6} - PL \frac{X^2}{2} + C_3 X + C_4$$

Nuevamente si  $X=L_1$

$$Y' = Y_1$$

$$Y = Y_1$$

Y reemplazando en las dos últimas ecuaciones y desarrollando para  $C_3$  y  $C_4$  se tiene:

$$C_3 = P \left( \frac{L_1^2}{2} - LL_1 \right) \left( \frac{I_2}{I_1} - 1 \right)$$

Ecuación 4-8

$$C_4 = P \left( \frac{L_1^3}{6} - \frac{LL_1^2}{2} \right) \left( \frac{I_2}{I_1} - 1 \right) - C_3 L_1$$

Ecuación 4-9

$$Y' = \frac{1}{EI_2} \left( P \frac{X^2}{2} - PLX + C_3 \right)$$

$$Y = \frac{1}{EI_2} \left( P \frac{X^3}{6} - \frac{PLX^2}{2} + C_3 \cdot X + C_4 \right)$$

Por lo que la rotación y deflexión en el extremo derecho es decir cuando  $X=L$  son:

$$Y' = Y_2$$

$$Y=Y_2$$

$$Y'_2 = \frac{1}{EI_2} \left( P \frac{L^2}{2} - PL \cdot L + C_3 \right)$$

Ecuación 4-10

$$Y_2 = \frac{1}{EI_2} \left( -P \frac{L^3}{3} + C_3 L + C_4 \right)$$

Ecuación 4-11

Con estas ecuaciones se determina tanto la rotación como la deflexión de la viga (Ecuación 4.10 y ecuación 4.11 respectivamente). En nuestro caso en la máquina de ensayos lo que se puede regular es la deflexión por lo tanto de la ecuación 4.11 se despeja P y se tiene:

$$P = \frac{3(C_3 L + C_4 - Y_2 EI_2)}{L^3}$$

Ecuación 4-12

Luego reemplazando en la Ecuación 4.3 se puede determinar el esfuerzo inducido en la viga para dicha deformación.

## 4.2 REGISTRO DE DATOS

### 4.2.1 DATOS DE DEFLEXIÓN

En la etapa de experimentación se obtiene toda la información necesaria mediante los ensayos de acuerdo a la norma ASTM D 671, para lo cual se realizaron ensayos con probetas Tipo B, 26 de Nylon y 26 de Teflón, el estudio se realiza con una viga en cantiléver a una frecuencia de 30 Hz y relación de esfuerzo  $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = -1$ , las características geométricas, deflexiones generadas, y cargas aplicadas se registra en las tablas 4.5 y 4.6, para el Nylon y el Teflón respectivamente.

Tabla 4-5 Datos de ensayo del Nylon

<b>Material</b>	Naylon	310
<b>Frecuencia</b>	30	Hz
<b>E</b>	2500	Mpa

Obs	t[m]	b1[m]	b2[m]	L1[m]	L[m]	X[m]	def2[m]	Carga P[N]	N
1	0.00660	0.0066	0.0507	0.0495	0.0850	0.0094	-0.0310	64.00	300
2	0.00700	0.0063	0.0497	0.0500	0.0860	0.0105	-0.0290	65.80	396
3	0.00700	0.0075	0.0505	0.0500	0.0852	0.0102	-0.0280	77.40	338
4	0.00610	0.0067	0.0501	0.0495	0.0850	0.0103	-0.0300	49.20	558
5	0.00700	0.0060	0.0492	0.0500	0.0875	0.0095	-0.0270	55.70	431
6	0.00700	0.0076	0.0503	0.0500	0.0852	0.0103	-0.0260	72.80	552
7	0.00700	0.0075	0.0507	0.0500	0.0860	0.0100	-0.0260	70.00	735
8	0.00610	0.0067	0.0505	0.0490	0.0845	0.0094	-0.0280	47.20	605
9	0.00610	0.0066	0.0505	0.0490	0.0850	0.0092	-0.0260	42.40	868
10	0.00700	0.0077	0.0506	0.0486	0.0873	0.0095	-0.0230	61.80	1235
11	0.00700	0.0063	0.0501	0.0500	0.0870	0.0104	-0.0230	50.60	1892
12	0.00635	0.0068	0.0505	0.0490	0.0850	0.0090	-0.0230	43.30	1242
13	0.00700	0.0064	0.0498	0.0500	0.0850	0.0092	-0.0210	50.00	4322
14	0.00700	0.0078	0.0503	0.0500	0.0850	0.0099	-0.0210	60.70	3896
15	0.00610	0.0067	0.0505	0.0490	0.0845	0.0087	-0.0230	38.70	4736
16	0.00610	0.0061	0.0500	0.0503	0.0846	0.0086	-0.0230	34.85	5786
17	0.00610	0.0067	0.0508	0.0493	0.0844	0.0100	-0.0220	37.10	21297
18	0.00700	0.0063	0.0503	0.0500	0.0870	0.0105	-0.0200	44.00	3589
19	0.00700	0.0077	0.0497	0.0500	0.0875	0.0100	-0.0200	52.80	19000
20	0.00700	0.0079	0.0507	0.0500	0.0860	0.0098	-0.0190	54.00	79050
21	0.00610	0.0065	0.0508	0.0495	0.0850	0.0081	-0.0200	31.80	16013
22	0.00610	0.0067	0.0508	0.0493	0.0844	0.0100	-0.0200	33.80	130000
23	0.00700	0.0063	0.0500	0.0510	0.0875	0.0107	-0.0185	39.80	15473
24	0.00610	0.0067	0.0506	0.0490	0.0840	0.0100	-0.0190	32.50	53222
25	0.00610	0.0067	0.0508	0.0490	0.0840	0.0100	-0.0190	32.50	99347
26	0.00610	0.0067	0.0508	0.0493	0.0844	0.0100	-0.0180	30.40	37013

Fuente: El autor

Tabla 4-6 Datos de ensayo del Teflón

<b>Material</b>	Teflón	
<b>Frecuencia</b>	30	Hz
<b>E</b>	634	MPa

Obs	t[m]	b1[m]	b2[m]	L1[m]	L[m]	X[m]	def2[m]	Carga	
								P[N]	N
1	0.0087	0.0058	0.0487	0.0500	0.0844	0.0082	-0.032	34.24	293
2	0.0088	0.0058	0.0494	0.0500	0.0850	0.0110	-0.032	34.80	328
3	0.0087	0.0059	0.0500	0.0494	0.0843	0.0106	-0.029	31.76	609
4	0.0085	0.0051	0.0416	0.0503	0.0863	0.0115	-0.030	24.78	422
5	0.0089	0.0059	0.0497	0.0494	0.0843	0.0110	-0.027	31.74	1665
6	0.0067	0.0058	0.0501	0.0500	0.0846	0.0100	-0.034	16.54	233
7	0.0088	0.0058	0.0492	0.0496	0.0840	0.0100	-0.025	28.10	2572
8	0.0068	0.0055	0.0492	0.0560	0.0851	0.0070	-0.032	14.76	450
9	0.0070	0.0064	0.0501	0.0497	0.0850	0.0050	-0.029	17.50	99
10	0.0084	0.0057	0.0495	0.0500	0.0860	0.0130	-0.027	23.70	1056
11	0.0070	0.0063	0.0050	0.0560	0.0846	0.0086	-0.031	17.34	339
12	0.0088	0.0059	0.0510	0.0510	0.0844	0.0100	-0.023	25.74	11550
13	0.0084	0.0057	0.0501	0.0500	0.0860	0.0130	-0.025	22.30	2312
14	0.0085	0.0056	0.0503	0.0520	0.0852	0.0103	-0.023	20.98	12293
15	0.0070	0.0063	0.0501	0.0500	0.0850	0.0095	-0.027	16.05	339
16	0.0084	0.0065	0.0353	0.0500	0.0880	0.0103	-0.023	22.10	25000
17	0.0082	0.0051	0.0418	0.0510	0.0864	0.0110	-0.023	16.88	3517
18	0.0068	0.0057	0.0504	0.0500	0.0860	0.0120	-0.027	12.80	600
19	0.0071	0.0058	0.0498	0.0506	0.0856	0.0070	-0.023	12.86	4203
20	0.0083	0.0047	0.0352	0.0500	0.0860	0.0130	-0.021	14.72	2870
21	0.0068	0.0057	0.0502	0.0500	0.0860	0.0130	-0.025	11.82	910
22	0.0083	0.0048	0.0356	0.0500	0.0870	0.0110	-0.020	14.14	13314
23	0.0069	0.0061	0.0501	0.0506	0.0850	0.0089	-0.022	12.10	4016
24	0.0068	0.0056	0.0501	0.0520	0.0852	0.0103	-0.023	10.95	5000
25	0.0069	0.0061	0.0499	0.0500	0.0844	0.0090	-0.020	11.22	160000
26	0.0069	0.0061	0.0501	0.0506	0.0850	0.0090	-0.018	9.90	150000

Fuente: El autor

La determinación del número de ciclos hasta la falla se realiza por medio de un circuito electrónico conectado a la máquina de fatiga de viga en cantiléver y un circuito de comando para el encendido y apagado del motor.

#### 4.2.2 DATOS DE TEMPERATURA VS NÚMERO DE CICLOS

Como se sabe la mayoría de propiedades mecánicas y en especial el módulo de elasticidad varían con la temperatura, se vio la necesidad de determinar dicha relación, para lo cual se realizaron lecturas de temperatura en la probeta versus número de ciclos, dichos datos se presentan en las tablas 4.7 y 4.8 para el Nylon y Teflón respectivamente.

Tabla 4-7 Registro de Temperatura Vs N para el Nylon

Ni ciclos	Temperatura	Ni ciclos	Temperatura
1	20	2000	76
30	39	2100	74
480	44	2200	70
600	45	2250	77
650	60	2500	74
690	60	2900	74
700	42	2900	80
750	56	2900	80
850	65	3000	75
1011	46	3100	80
1200	60	3600	80
1200	70	3900	79
1300	62	4700	90
1300	70	5100	85
1300	74	5700	90
1600	66	8400	94
1600	70	10000	90
1750	75	15000	90

Fuente: El autor

Tabla 4-8 Registro de Temperatura Vs N para el Teflón

Ni ciclos	Temperatura
1.00	18
390.06	54
990.00	90
1110.00	90
2538.00	100
2610.00	100
10590.00	107
5009.99	108
12360.00	112
17460.00	113
5400.00	115
12029.99	115
8190.00	116
14070.00	116
21600.00	122
25290.00	125
50160.00	130
60810.00	132

Fuente: El autor

### 4.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE LOS ENSAYOS CON PROBETAS DE NYLON

Con los datos registrados en la tabla 4.5 y mediante la utilización de las ecuaciones 4.11, 4.12 y 4.3, se determina la relación existente entre el esfuerzo  $S$  generado en la probeta y el número de ciclos  $N$ , los cuales se registraron en la tabla 4.9. Para la determinación del esfuerzo generado en la probeta se considera, como ya se indicó anteriormente únicamente el esfuerzo normal, debido a que en el punto donde se inicia la falla sólo actúan este tipo de esfuerzos.

Tabla 4-9 Relación Esfuerzo - Número de ciclos para el Nylon

Obs	N	Log N	S [MPa]	Log S
1	300	2.477	100.977	2.004
2	396	2.598	96.622	1.985
3	338	2.529	94.776	1.977
4	558	2.747	89.116	1.950
5	431	2.634	88.665	1.948
6	552	2.742	87.853	1.944
7	735	2.866	86.857	1.939
8	605	2.782	85.310	1.931
9	868	2.939	78.520	1.895
10	1235	3.092	76.411	1.883
11	1892	3.277	75.334	1.877
12	1242	3.094	72.544	1.861
13	4322	3.636	72.513	1.860
14	3896	3.591	71.563	1.855
15	4736	3.675	70.599	1.849
16	5786	3.762	70.013	1.845
17	21297	4.328	66.430	1.822
18	3589	3.555	65.423	1.816
19	19000	4.279	65.073	1.813
20	79050	4.898	63.779	1.805
21	16013	4.204	61.134	1.786
22	130000	5.114	60.521	1.782
23	15473	4.190	59.410	1.774
24	53222	4.726	57.880	1.763
25	99347	4.997	57.880	1.763
26	37013	4.568	54.433	1.736

Fuente: El autor

#### 4.3.1 RELACIÓN TEMPERATURA – NÚMERO DE CICLOS PARA EL NYLON

Con los datos registrados en la tabla 4.7 se obtiene la siguiente gráfica en la que se puede apreciar claramente una relación semi logarítmica entre las variables, por lo que se decide realizar una regresión lineal entre la temperatura y el logaritmo vulgar del número de ciclos.

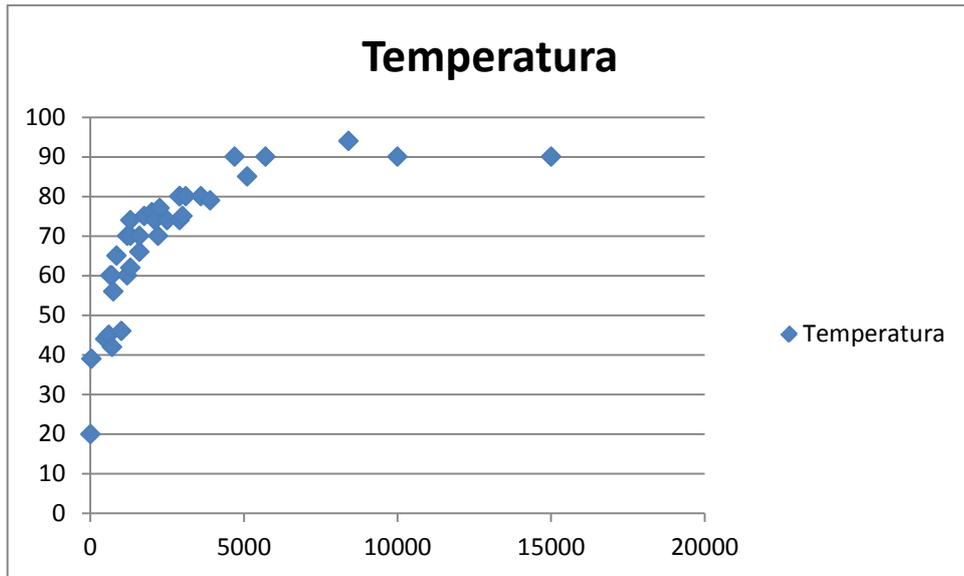


Figura 4-5 Relación de temperatura Vs número de ciclos para el Nylon

Fuente: El autor

La gráfica de distribución esfuerzo Vs logaritmo del número de ciclos para el Nylon se muestra en la siguiente figura.

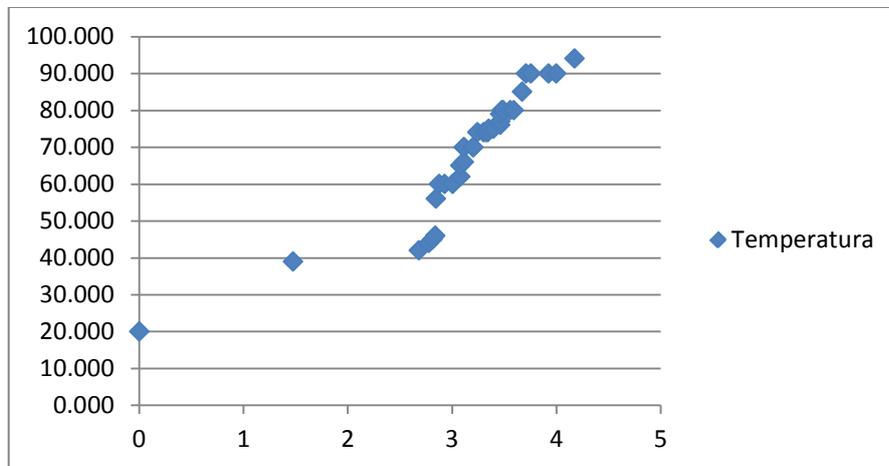


Figura 4-6 Relación de temperatura Vs log del número de ciclos para el Nylon

Fuente: El autor

La regresión lineal de los datos es:

$$T = A + b \text{ Log } N$$

Ecuación 4-13

En donde por facilidad remplazaremos:

$Y = T$

$X = \text{Log } N$

Entonces nuestra ecuación queda de la siguiente manera.

$$Y = A + b X$$

Ecuación 4-14

Que de acuerdo al trabajo realizado por Toasa C en 2009 las constantes de regresión vienen dadas por:

$$\hat{b} = \frac{k \sum_{i=1}^k X_i Y_i - \sum_{i=1}^k X_i \sum_{i=1}^k Y_i}{k \sum_{i=1}^k X_i^2 - (\sum_{i=1}^k X_i)^2}$$

Ecuación 4-15

$$\hat{A} = \bar{Y} - \hat{b} \bar{X}$$

Ecuación 4-16

En dónde  $\bar{Y}$  y  $\bar{X}$  son las medias de nuestros datos de prueba  $Y_i$  y  $X_i$ :

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n X_i$$

Ecuación 4-17

y

$$\bar{Y} = \sum_{i=1}^n Y_i$$

Ecuación 4-18

Los valores necesarios para la regresión se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 4-10 Tabla de regresión para la T Vs Log N para el Nylon

Relación Temperatura Vs Número de ciclos para el Nylon						
Ni ciclos	Temperatura	$X_i = \text{Log} N_i$	$y_i \text{ calc}$	$y_i - y_{i \text{ calc}}$	$x_i^2$	$x_i \cdot y_i$
1	20	0.000	4.178	250.335	0.000	0.000
30	39	1.477	34.429	20.894	2.182	57.608
700	42	2.845	62.445	417.990	8.095	119.494
480	44	2.681	59.089	227.680	7.189	117.975
600	45	2.778	61.074	258.366	7.718	125.017
1011	46	3.005	65.714	388.660	9.029	138.219
750	56	2.875	63.058	49.822	8.266	161.003
690	60	2.839	62.317	5.368	8.059	170.331
650	60	2.813	61.786	3.189	7.912	168.775
1200	60	3.079	67.239	52.400	9.481	184.751
1300	62	3.114	67.951	35.411	9.697	193.064
850	65	2.929	64.172	0.686	8.581	190.412
1600	66	3.204	69.797	14.421	10.266	211.472
1600	70	3.204	69.797	0.041	10.266	224.288
1300	70	3.114	67.951	4.200	9.697	217.976
2200	70	3.342	72.630	6.916	11.172	233.970
1200	70	3.079	67.239	7.624	9.481	215.543
1300	74	3.114	67.951	36.594	9.697	230.432
2100	74	3.322	72.216	3.182	11.037	245.844
2500	74	3.398	73.767	0.054	11.546	251.448
2900	74	3.462	75.087	1.181	11.988	256.217
3000	75	3.477	75.388	0.151	12.090	260.784
1750	75	3.243	70.595	19.408	10.517	243.228
2000	76	3.301	71.782	17.790	10.897	250.878
2250	77	3.352	72.830	17.391	11.237	258.118
3900	79	3.591	77.722	1.633	12.896	283.694
3100	80	3.491	75.680	18.661	12.190	279.309
2900	80	3.462	75.087	24.138	11.988	276.992
2900	80	3.462	75.087	24.138	11.988	276.992
3600	80	3.556	77.010	8.940	12.647	284.504
5100	85	3.708	80.108	23.932	13.746	315.143
4700	90	3.672	79.382	112.752	13.484	330.489
5700	90	3.756	81.097	79.259	14.107	338.029
10000	90	4.000	86.097	15.234	16.000	360.000
15000	90	4.176	89.703	0.088	17.440	375.848
8400	94	3.924	84.546	89.376	15.400	368.882
Sumatoria	2482	113.849		2237.906	377.987	8216.729

Fuente: El autor

Con dichos datos se realizó una regresión semi logarítmica para lo cual nos da los valores de las constantes representados en la tabla siguiente.

Tabla 4-11 Constantes de regresión para el Nylon

	Temp Ti	Log Ni
Medias	68.944	3.162
K=# datos	36	
Constantes		
b=	20.480	
A=	4.178	
Desvesta de x	0.716	
Desvesta de y	16.702	

Fuente: El autor

Siendo la ecuación de regresión la siguiente.

$$T = 20.48 * \log N + 4.178$$

Ecuación 4-19

Los cálculos registrados en la tabla 4.9 se deben corregir de acuerdo con el cambio del módulo de elasticidad E con la temperatura T.

En la figura 2.11 se puede ver que el módulo de elasticidad de la Poliamida 6 varía linealmente dentro del rango de temperaturas que alcanzaron las probetas ensayadas que fue desde la temperatura ambiente hasta aproximadamente los 80 grados centígrados que registraron la mayoría de ensayos. Por lo tanto la ecuación que relacionan dichos parámetros se obtiene de la ecuación de la recta dado dos, la misma que es:

$$Y = \frac{Y2 - Y1}{X2 - X1} (X - X1) + Y1$$

Ecuación 4-20

En donde la variable Y representa el módulo de elasticidad E en KPsi y la variable X representa la temperatura T en grados centígrados.

$$Y = \frac{468 - 208}{0 - 80}(X - 80) + 208$$

$$Y = -3.25X + 468$$

Entonces nuestra ecuación sería

$$E^* = -3.25T + 468$$

Ecuación 4-21

En donde  $E^*$  es el módulo de elasticidad a la temperatura de ensayo.

T es la temperatura en ° centígrados.

Siendo  $E=468$  KPsi la relación entre E y  $E^*$  es

$$\frac{E^*}{E} = \frac{-3.25T + 468}{468}$$

Considerando la relación de módulos como un factor de corrección k se tiene:

$$k = \frac{-3.25T + 468}{468}$$

Ecuación 4-22

Dichos factores para diferentes temperaturas se muestran en la tabla 4.12, el módulo de elasticidad se determina con la siguiente relación

$$E^* = k.E$$

Ecuación 4-23

Tabla 4-12 Factor de corrección de E por temperatura

Temperatura	Factor k
0	1.000
5	0.965
10	0.931
15	0.896
20	0.861
25	0.826
30	0.792
35	0.757
40	0.722
45	0.688
50	0.653
55	0.618
60	0.583
65	0.549
70	0.514
75	0.479
80	0.444
85	0.410
90	0.375

Fuente: El autor

#### **4.3.2 CORRECCIÓN DEL ESFUERZO CON LA TEMPERATURA**

De acuerdo al análisis anterior los esfuerzos generados en la probeta considerando la temperatura son los mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 4-13 Corrección del esfuerzo con la temperatura

Obs	Temp	Factor K	def2[m]	Carga	N	Log N	S [MPa]	Log S
				P[N]				
1	54.91	0.62	31	39.6	300	2.477	62.479	1.796
2	57.38	0.60	29	39.6	396	2.598	58.149	1.765
3	55.97	0.61	28	47.3	338	2.529	57.918	1.763
4	60.43	0.58	30	28.52	558	2.747	51.658	1.713
5	58.13	0.60	27	33.2	431	2.634	52.849	1.723
6	60.33	0.58	26	42.4	552	2.742	51.167	1.709
7	62.88	0.56	26	39.56	735	2.866	49.087	1.691
8	61.15	0.58	28	27.1	605	2.782	48.981	1.690
9	64.36	0.55	26	23.5	868	2.939	43.520	1.639
10	67.50	0.53	23	32.8	1235	3.092	40.554	1.608
11	71.29	0.50	23	25.5	1892	3.277	37.965	1.579
12	67.55	0.53	23	23	1242	3.094	38.534	1.586
13	78.64	0.45	21	22.7	4322	3.636	32.921	1.517
14	77.71	0.46	21	28	3896	3.591	33.011	1.519
15	79.45	0.45	23	17.34	4736	3.675	31.633	1.500
16	81.23	0.44	23	15.2	5786	3.762	30.536	1.485
17	92.82	0.36	22	13.2	21297	4.328	23.635	1.374
18	76.98	0.47	20	20.5	3589	3.555	30.481	1.484
19	91.81	0.36	20	19.1	19000	4.279	23.540	1.372
20	104.49	0.27	19	14.8	79050	4.898	17.480	1.243
21	90.29	0.37	20	11.9	16013	4.204	22.877	1.359
22	108.91	0.24	20	8.22	1E+05	5.114	14.718	1.168
23	89.98	0.38	18.5	14.9	15473	4.190	22.241	1.347
24	100.97	0.30	19	9.7	53222	4.726	17.275	1.237
25	106.52	0.26	19	8.46	99347	4.997	15.067	1.178
26	97.74	0.32	18	9.74	37013	4.568	17.440	1.242

Fuente: El autor

Para determinar la relación existente entre estos parámetros graficamos primero el esfuerzo en función del número de ciclos, luego el esfuerzo en función del logaritmo vulgar del número de ciclos y por último una relación log - log entre las dos variables, las mismas que se puede apreciar en las siguientes gráficas.

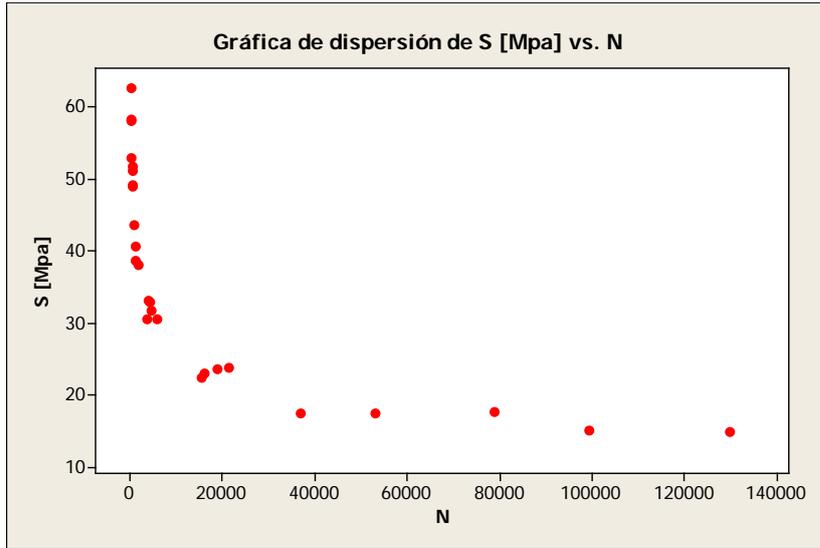


Figura 4-7 Relación S Vs N para el Nylon

Fuente: El autor

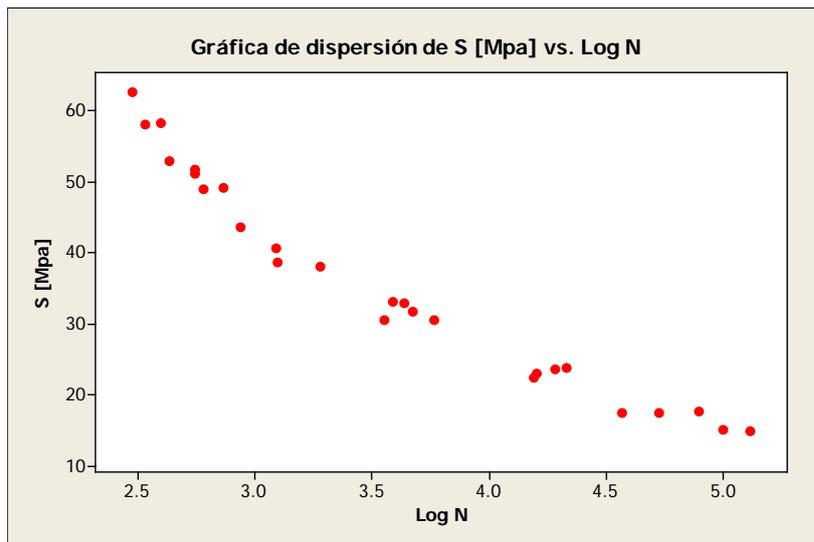


Figura 4-8 Relación S Vs Log N para el Nylon

Fuente: El autor

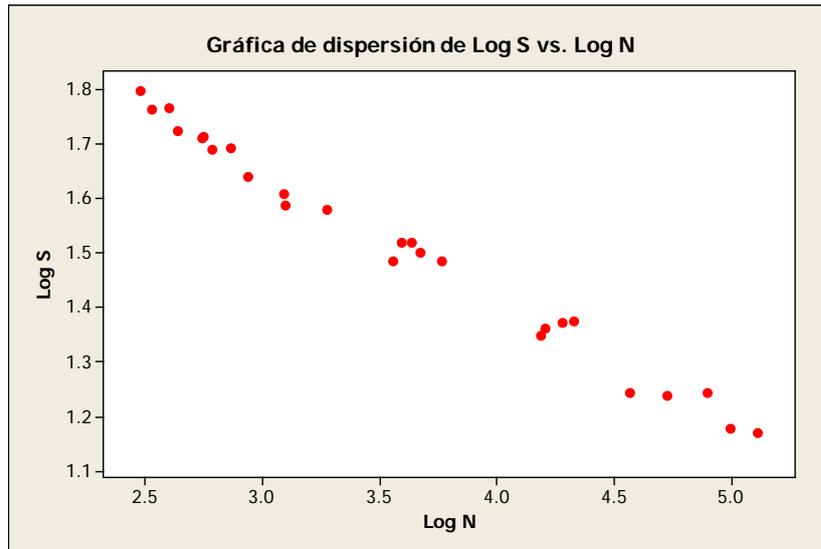


Figura 4-9 Relación Log S Vs Log N para el Nylon

Fuente: El autor

Según las figuras podemos decir que existe una clara relación doble logarítmica, por lo que se realizará un análisis más a fondo de esta relación.

### 4.3.3 REGRESIÓN S-N PARA EL NYLON

Como se determinó anteriormente la relación es doble logarítmica y se presenta mediante la ecuación que expresa el esfuerzo en la probeta como función del número de ciclos.

$$S = aN^b$$

Ecuación 4-24

En donde

S: amplitud de esfuerzo en Mega Pascales MPa

N: número de ciclos de carga hasta la falla

Tomando logaritmo decimal en la Ecuación 4-24 tenemos:

$$\text{Log } S = \text{Log } a + b \text{ Log } N$$

Ecuación 4-25

En la que haremos:

$$Y = \text{Log } S$$

$$A = \text{Log } a$$

$$X = \text{Log } N$$

Con lo que nuestra ecuación queda como:

$$Y = A + b X$$

Ecuación 4-26

Que de acuerdo a las ecuaciones 4.15 y 4.16 las constantes de regresión son las representadas en la siguiente tabla.

Tabla 4-14 Valores de regresión Nylon

Ni	Si	Xi=LogNi	yi=logSi	yi calc	(yi-yicalc)^2	xi^2	xi.yi
300	62.479	2.477	1.796	1.768	0.00076	6.136	4.448
396	58.149	2.598	1.765	1.740	0.00059	6.748	4.584
338	57.918	2.529	1.763	1.756	0.00004	6.395	4.458
558	51.658	2.747	1.713	1.706	0.00005	7.544	4.705
431	52.849	2.634	1.723	1.732	0.00008	6.940	4.539
552	51.167	2.742	1.709	1.707	0.00000	7.518	4.686
735	49.087	2.866	1.691	1.678	0.00017	8.216	4.847
605	48.981	2.782	1.690	1.698	0.00006	7.738	4.701
868	43.520	2.939	1.639	1.661	0.00051	8.635	4.815
1235	40.554	3.092	1.608	1.626	0.00032	9.558	4.972
1892	37.965	3.277	1.579	1.583	0.00001	10.738	5.176
1242	38.534	3.094	1.586	1.625	0.00156	9.574	4.907
4322	32.921	3.636	1.517	1.500	0.00030	13.218	5.517
3896	33.011	3.591	1.519	1.510	0.00007	12.893	5.453
4736	31.633	3.675	1.500	1.491	0.00009	13.509	5.514
5786	30.536	3.762	1.485	1.471	0.00020	14.155	5.586
21297	23.635	4.328	1.374	1.340	0.00114	18.734	5.945
3589	30.481	3.555	1.484	1.519	0.00120	12.638	5.276
19000	23.540	4.279	1.372	1.351	0.00042	18.308	5.870
79050	17.480	4.898	1.243	1.208	0.00119	23.989	6.086
16013	22.877	4.204	1.359	1.368	0.00008	17.678	5.716
130000	14.718	5.114	1.168	1.158	0.00010	26.152	5.972
15473	22.241	4.190	1.347	1.372	0.00061	17.553	5.644
53222	17.275	4.726	1.237	1.248	0.00011	22.336	5.848
99347	15.067	4.997	1.178	1.185	0.00005	24.972	5.887
37013	17.440	4.568	1.242	1.284	0.00183	20.870	5.672
<b>sumatoria</b>	<b>925.718</b>	<b>93.300</b>	<b>39.286</b>		1543.36138	<b>352.745</b>	<b>136.823</b>
<b>medias</b>	35.605	3.588	1.511				
<b>K=# datos</b>	26						
<b>constantes</b>							
<b>b=</b>	-0.2314						
<b>A=</b>	2.3412						
<b>desv de x</b>	0.3891						
<b>desv de y</b>	0.0817						

Fuente: El autor

Por lo que nuestra ecuación queda como:

$$Y = 2.3412 - 0.2314X$$

Ecuación 4-27

Y la ecuación logarítmica es:

$$\text{Log } S = 2.3412 - 0.2314 \text{ Log } N$$

Ecuación 4-28

Como  $A = \text{Log } a$ , entonces:

$$a = 10^{2.3412} = 219.381499$$

Finalmente la ecuación exponencial de la cual partimos es:

$$S = 219.381499N^{-0.2314}$$

Ecuación 4-29

La gráfica correspondiente a la ecuación 4.29 es la siguiente, que representa el comportamiento del Nylon 310 a fatiga por flexión.

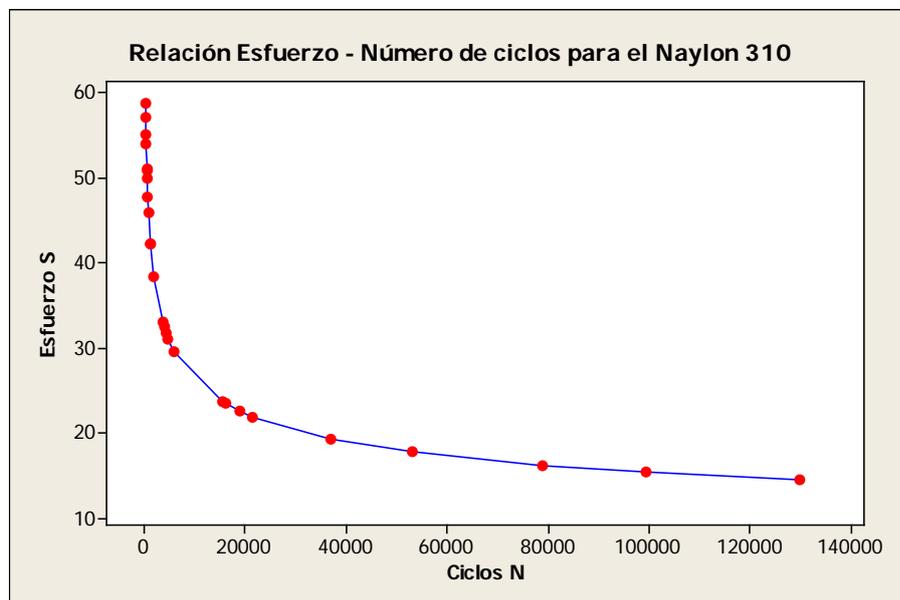


Figura 4-10 Relación Esfuerzo – Número de ciclos para el Nylon

Fuente: El autor

Y los mismos datos representando S Vs Log N se tiene en la siguiente gráfica

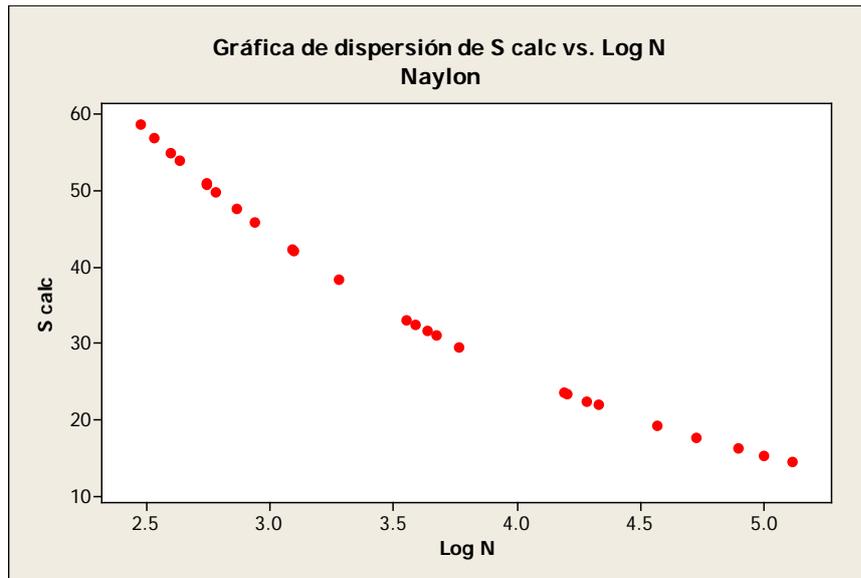


Figura 4-11 Relación Esfuerzo – Log número de ciclos para el Nylon

Fuente: El autor

Del análisis de regresión se puede también realizar un análisis estadístico descriptivo, para determinar la tendencia central de los datos, y su dispersión, mediante el uso de una hoja electrónica de cálculo podemos determinar dichas medidas, siendo para nuestro caso los representados en la tabla 4.15.

La regresión representadas por las ecuaciones 4.13, 4.14, 4.15, y 4.16 sólo muestra una relación estimada entre las dos variables X e Y, y su ecuación depende exclusivamente de los datos experimentales. Por tanto es lógico suponer que los resultados serían poco confiables si los datos fueron obtenidos de forma incorrecta, sea por error humano o técnico. Por lo que es necesario realizar un análisis de confianza de modo que podamos saber que tan confiables son nuestros datos experimentales.

Tabla 4-15 Resumen de regresión

Resumen Para el Nylon

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.994041013
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.988117535
R <sup>2</sup> ajustado	0.987622432
Error típico	0.021938138
Observaciones	26

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	0.96053415	0.96053415	1995.782892	1.28406E-24
Residuos	24	0.011550765	0.000481282		
Total	25	0.972084916			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	2.341224706	0.019075827	122.732542	4.23483E-35	2.301854135	2.380595278
Variable X 1	-0.231364161	0.005178923	-44.67418597	1.28406E-24	-0.242052933	-0.22067539

Fuente: El autor

#### 4.3.4 INTERVALOS DE CONFIANZA PARA EL NYLON

Ahora se pretende determinar un intervalo en el cual con cierta probabilidad se encuentre un parámetro desconocido, en este caso es el número de ciclos hasta la falla, dado cierto valor del esfuerzo aplicado.

Dado que tenemos una muestra aleatoria de  $k$  datos experimentales con una distribución normal de media  $\mu$  y varianza  $\sigma^2$ , notada por  $N(\mu, \sigma^2)$ , dado que  $\bar{Y}$  representa la media y sigue una distribución normal dada por la función  $N(\mu, \sigma^2/k)$ , y además.

$$Z = \frac{\bar{Y} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{k}}}$$

Ecuación 4-30

Que sigue una distribución estándar cuya función es  $N(0,1)$

Sin embargo, en estos casos se asume que se conoce la varianza de la población  $\sigma^2$ , en la realidad  $\sigma^2$  es desconocida y se la estima por medio de la varianza  $s^2$  de la muestra, de modo que tenemos una nueva variable notada por:

$$T = \sqrt{k} \left( \frac{\bar{Y} - \mu}{s} \right)$$

Ecuación 4-31

que sigue una distribución t-student con  $k-1$  grados de libertad. Esta distribución es la base para el desarrollo de la estimación respecto al parámetro  $\mu$ , que como se sabe esta distribución es adecuada para muestras pequeñas que no tengan más de 30 datos.

La determinación del intervalo de confianza se realiza mediante la utilización de la ecuación de probabilidad dada por la siguiente ecuación

$$1 - \alpha = P\left(\bar{Y} - \frac{t_{\alpha/2}S}{\sqrt{k}} \leq \mu \leq \bar{Y} + \frac{t_{\alpha/2}S}{\sqrt{k}}\right)$$

Ecuación 4-32

Ahora recordemos que  $\mu$  puede ser estimada por  $Y = A + bX$  en el modelo de regresión, entonces si reemplazamos  $Y$  en la desigualdad de la ecuación 4.31 tenemos

$$1 - \alpha = P\left(\frac{\bar{Y} - \frac{t_{\alpha/2}S}{\sqrt{k}} - A}{b} \leq X \leq \frac{\bar{Y} + \frac{t_{\alpha/2}S}{\sqrt{k}} - A}{b}\right)$$

Ecuación 4-33

En nuestro caso si se quiere considerar un intervalo de confianza del 95 %, se toma  $\alpha = 0.05$  y  $k-1$  grados de libertad igual a 25, de los anexos se tiene

$$t_{0.025} = 2.0595$$

Además si  $\bar{Y} = 1.51$ ,

$s = 0.0817$ ,

$b = -0.2314$  y

$A = 2.3412$ , entonces se tiene que:

$$0.95 = P(3.445 \leq X \leq 3.73)$$

Luego como  $X = \log N$

Se tiene:

$$0.95 = P(2786.12 \leq X \leq 5370.31)$$

Y además  $Y = \log S$

Entonces  $S=32.43$  MPa

Lo que se interpreta que cuando se aplica un esfuerzo de 32.43 MPa. puede tener una vida de 2768.12 a 5370.31 ciclos de esfuerzo con una probabilidad del 95 %.

#### **4.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE LOS ENSAYOS CON PROBETAS DE TEFLÓN**

Con los datos registrados en la tabla 4.6 y mediante la utilización de las ecuaciones 4.11, 4.12 y 4.3, se determina la relación existente entre el esfuerzo generado  $S$  en la probeta y el número de ciclos  $N$ , los cuales se registran en la tabla 4.16. Para la determinación del esfuerzo generado en la probeta se considera, como ya se indicó anteriormente únicamente el esfuerzo normal, debido a que en el punto donde se inicia la falla sólo actúan este tipo de esfuerzos.

Tabla 4-16 Relación Esfuerzo - Número de ciclos para el Teflón

Obs	N	Log N	S	log S
1	293	2.46687	35.659	1.55217348
2	328	2.51587	34.401	1.53656888
3	609	2.78462	31.449	1.49760872
4	422	2.62531	30.182	1.47974612
5	1665	3.22141	29.870	1.47523012
6	233	2.36736	28.435	1.45384798
7	2572	3.41027	27.778	1.44369595
8	450	2.65321	27.196	1.43450813
9	99	1.99564	26.786	1.42790323
10	1056	3.02366	26.351	1.42080106
11	339	2.5302	25.614	1.40847731
12	11550	4.06258	25.149	1.40051537
13	2312	3.36399	24.500	1.38917195
14	12293	4.08966	23.580	1.37253711
15	339	2.5302	23.552	1.37203661
16	25000	4.39794	22.464	1.35149261
17	3517	3.54617	22.269	1.34769716
18	600	2.77815	21.753	1.33752667
19	4203	3.62356	20.743	1.31687007
20	2870	3.45788	20.155	1.30437617
21	910	2.95904	19.816	1.29702531
22	13314	4.12431	19.499	1.29001683
23	4016	3.60379	19.024	1.27929326
24	5000	3.69897	19.004	1.27884133
25	160000	5.20412	17.478	1.24248744
26	150000	5.17609	15.544	1.19157202

Fuente: El autor

#### 4.4.1 RELACIÓN TEMPERATURA – NÚMERO DE CICLOS PARA EL TEFLÓN

De igual manera que en el caso del Nylon, para el teflón con los datos registrados en la tabla 4.8 se obtiene la gráfica de temperatura en función del número de ciclos en la que nuevamente se puede apreciar claramente una relación semi logarítmica entre las variables, por lo que se decide realizar una regresión lineal entre la temperatura y el logaritmo vulgar del número de ciclos.

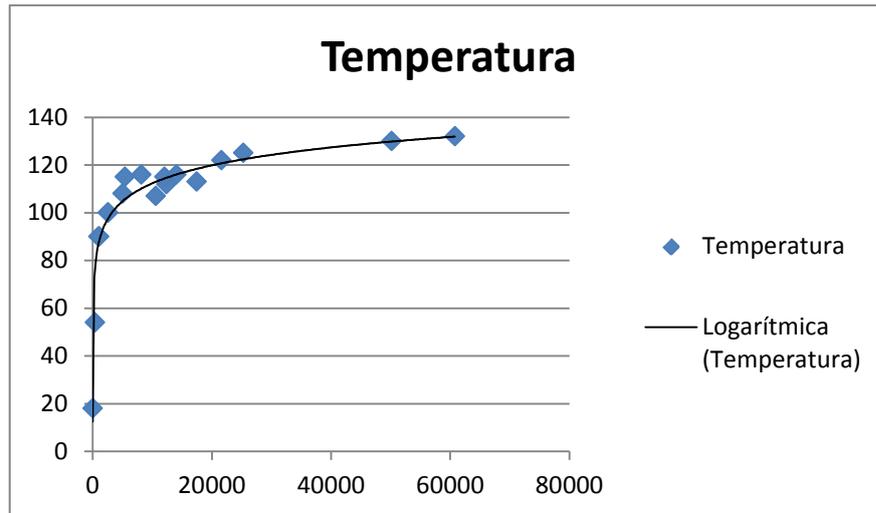


Figura 4-12 Relación de temperatura Vs número de ciclos para el Teflón

Fuente: El autor

La gráfica de distribución esfuerzo Vs logaritmo del número de ciclos para el Teflón se muestra en la siguiente figura.

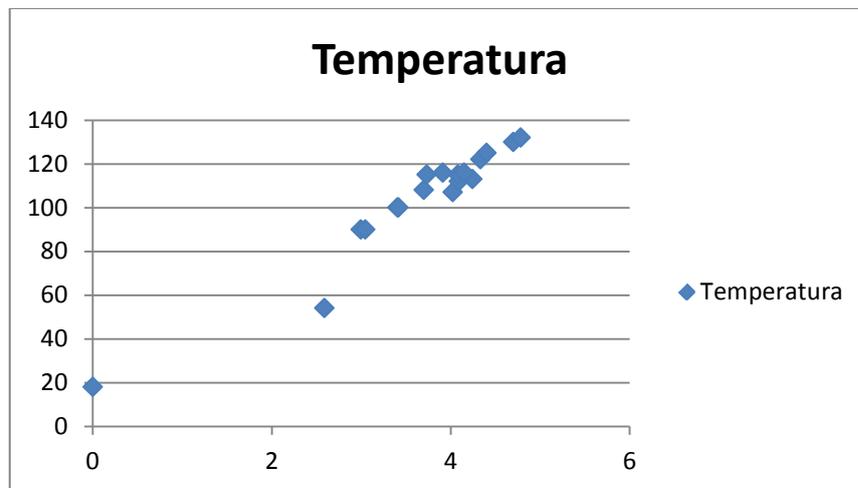


Figura 4-13 Relación de temperatura Vs log del número de ciclos para el Teflón

Fuente: El autor

Trabajando nuevamente con las ecuaciones de regresión 4.13, 4.14, para las cuales se obtienen las constantes de regresión A y b mediante las ecuaciones 4.16 y 4.15 respectivamente. Los cálculos correspondientes se muestran en la tabla 4.17 y los valores necesarios para la regresión se representan en la tabla 4.18.

Tabla 4-17 Tabla de regresión para la T Vs Log N para el Teflón

<b>Relación Temperatura Vs Número de ciclos para el Teflón</b>						
<b>Ni ciclos</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Xi=LogNi</b>	<b>yi calc</b>	<b>yi-yicalc</b>	<b>xi^2</b>	<b>xi.yi</b>
1	18	0.000	12.537	29.847	0.000	0.000
390	54	2.591	77.202	538.335	6.714	139.921
990	90	2.996	87.297	7.306	8.974	269.607
1110	90	3.045	88.537	2.140	9.274	274.079
2538	100	3.404	97.501	6.247	11.591	340.449
2610	100	3.417	97.804	4.823	11.673	341.664
10590	107	4.025	112.984	35.804	16.200	430.664
5010	108	3.700	104.871	9.789	13.689	399.582
12360	112	4.092	114.659	7.069	16.745	458.306
17460	113	4.242	118.403	29.191	17.995	479.351
5400	115	3.732	105.684	86.791	13.931	429.225
12030	115	4.080	114.365	0.403	16.649	469.231
8190	116	3.913	110.198	33.661	15.314	453.941
14070	116	4.148	116.063	0.004	17.208	481.202
21600	122	4.334	120.709	1.667	18.787	528.803
25290	125	4.403	122.418	6.664	19.386	550.369
50160	130	4.700	129.841	0.025	22.093	611.046
60810	132	4.784	131.927	0.005	22.886	631.485
<b>Sumatoria</b>	<b>1863</b>	<b>65.608</b>		<b>799.771</b>	<b>259.109</b>	<b>7288.926</b>

Fuente: El autor

Tabla 4-18 Constantes de regresión para el Teflón

	<b>Temperatura Ti [°C]</b>	<b>Log Ni</b>
<b>Medias</b>	<b>103.5</b>	<b>3.645</b>
<b>K=# datos</b>	<b>18</b>	
<b>Constantes</b>		
<b>b=</b>	24.956	
<b>A=</b>	12.537	
<b>Desvesta de x</b>	1.084	
<b>Desvesta de y</b>	27.908	

Fuente: El autor

Siendo la ecuación de regresión la siguiente.

$$T = 24.956 * \log N + 12.537$$

Ecuación 4-34

Los cálculos registrados en la tabla 4.16 se deben corregir de acuerdo con el cambio del módulo de elasticidad E en función de la temperatura T.

En la figura 2.12 se puede ver que el módulo de elasticidad del Teflón varía cuadráticamente dentro del rango de temperaturas que alcanzaron las probetas ensayadas que fue desde la temperatura ambiente hasta aproximadamente los 132 grados centígrados que registraron la mayoría de ensayos. Por lo tanto la ecuación que relacionan dichos parámetros es:

$$E^* = 0.00002T^2 - 0.0073T + 0.7351$$

Ecuación 4-35

En donde E\* es el módulo de elasticidad a la temperatura de ensayo.

T es la temperatura en ° centígrados.

Siendo E=0.7351 GPa para T=0 °C la relación entre E y E\* es

$$\frac{E^*}{E} = \frac{0.00002T^2 - 0.0073T + 0.7351}{0.7351}$$

Considerando la relación de módulos como un factor de corrección k se tiene:

$$k = \frac{0.00002T^2 - 0.0073T + 0.7351}{0.7351}$$

Dichos factores para diferentes temperaturas se muestran en la tabla 4.19, el módulo de elasticidad se determina con la siguiente relación

$$E^* = k.E$$

Tabla 4-19 Factor de corrección de E por temperatura para el Teflón

Temp T	k
0	1.0000
10	0.9061
20	0.8177
30	0.7347
40	0.6572
50	0.5851
60	0.5184
70	0.4572
80	0.4014
90	0.3511
100	0.3062
110	0.2668
120	0.2328
130	0.2042
140	0.1811
150	0.1634

Fuente: El autor

#### **4.4.2 CORRECCIÓN DEL ESFUERZO CON LA TEMPERATURA PARA EL TEFLÓN**

De acuerdo al análisis anterior los esfuerzos generados en las probetas de Teflón son los mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 4-20 Corrección del esfuerzo con la temperatura para el Teflón

Obs	Temp	Factor		Carga P[N]	N	Log N	S	log S
		k	def2[m]					
1	74.1001	0.41475	0.032	14.2	293	2.467	14.789	1.170
2	75.3231	0.40758	0.032	14.2	328	2.516	14.037	1.147
3	82.0299	0.36969	0.029	11.75	609	2.785	11.635	1.066
4	78.0543	0.39186	0.030	9.7	422	2.625	11.815	1.072
5	92.9306	0.31333	0.027	9.92	1665	3.221	9.335	0.970
6	71.6167	0.42957	0.034	7.1	233	2.367	12.206	1.087
7	97.6437	0.29096	0.025	8.2	2572	3.410	8.106	0.909
8	78.7506	0.38791	0.032	5.72	450	2.653	10.539	1.023
9	62.3401	0.48788	0.029	8.56	99	1.996	13.102	1.117
10	87.9956	0.33804	0.027	8	1056	3.024	8.895	0.949
11	75.6807	0.4055	0.031	7.26	339	2.530	10.724	1.030
12	113.923	0.22301	0.023	5.74	11550	4.063	5.608	0.749
13	96.4887	0.29633	0.025	6.6	2312	3.364	7.251	0.860
14	114.599	0.2205	0.023	4.63	12293	4.090	5.204	0.716
15	75.6807	0.4055	0.027	6.5	339	2.530	9.538	0.979
16	122.292	0.19368	0.023	4.27	25000	4.398	4.340	0.638
17	101.035	0.27562	0.023	4.66	3517	3.546	6.148	0.789
18	81.8685	0.37057	0.027	4.73	600	2.778	8.039	0.905
19	102.967	0.26716	0.023	3.43	4203	3.624	5.533	0.743
20	98.8319	0.28551	0.021	4.22	2870	3.458	5.778	0.762
21	86.3828	0.34641	0.025	4.1	910	2.959	6.874	0.837
22	115.463	0.21732	0.020	3.08	13314	4.124	4.247	0.628
23	102.473	0.2693	0.022	3.26	4016	3.604	5.125	0.710
24	104.848	0.25911	0.023	2.84	5000	3.699	4.929	0.693
25	142.411	0.13878	0.020	1.56	160000	5.204	2.430	0.386
26	141.712	0.14032	0.018	1.39	150000	5.176	2.182	0.339

Fuente: El autor

Para determinar la relación existente entre estos parámetros graficamos primero el esfuerzo en función del número de ciclos, luego el esfuerzo en función del logaritmo vulgar del número de ciclos y por último una relación log - log entre las dos variables, las mismas que se puede apreciar en las siguientes gráficas.

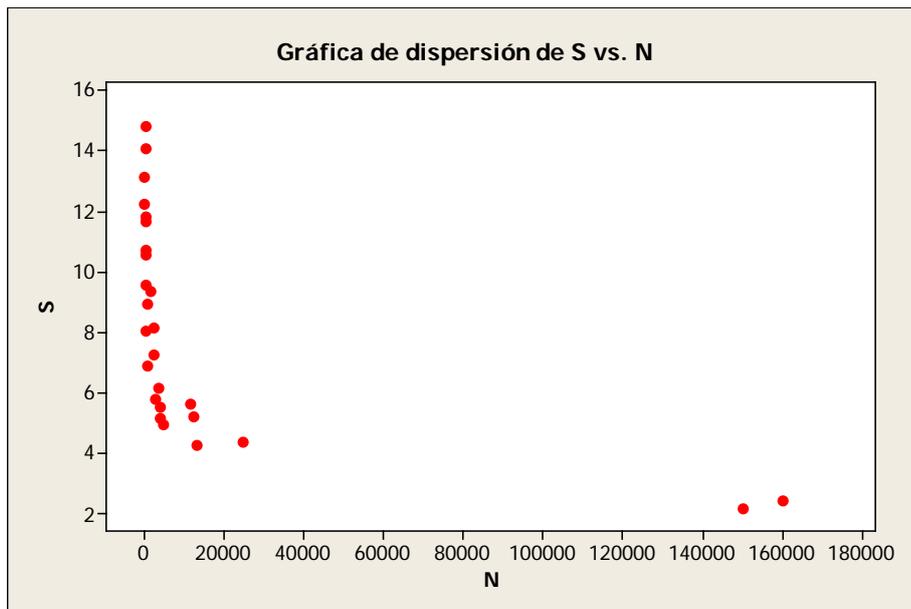


Figura 4-14 Relación S Vs N para el Teflón

Fuente: El autor

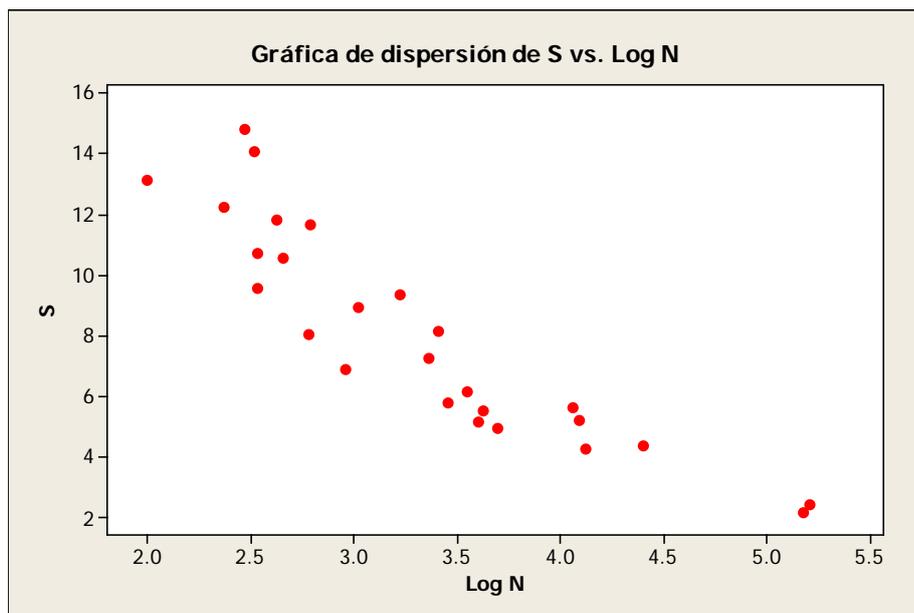


Figura 4-15 Relación S Vs Log N para el Teflón

Fuente: El autor

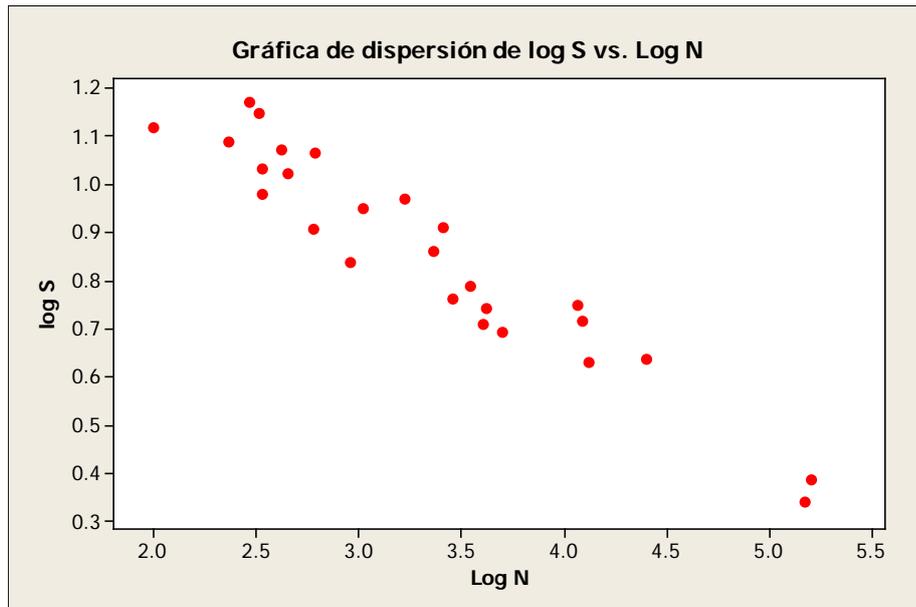


Figura 4-16 Relación Log S Vs Log N para el Teflón

Fuente: El autor

Según las figuras podemos decir que existe una clara relación doble logarítmica, por lo que se realizará un análisis más a fondo de esta relación.

#### 4.4.3 REGRESIÓN PARA EL TEFLÓN

Como se determinó anteriormente la relación es doble logarítmica y se presenta mediante la ecuación 4.24 que expresa el esfuerzo en la probeta como función del número de ciclos.

$$S = aN^b$$

En donde

S: amplitud de esfuerzo en Mega Pascales MPa.

N: número de ciclos de carga hasta la falla

Tomando logaritmo decimal en la ecuación de esfuerzo se tiene:

$$\text{Log } S = \text{Log } a + b \text{ Log } N$$

En la que nuevamente por facilidad en el desarrollo haremos:

$$Y = \text{Log } S$$

$$A = \text{Log } a$$

$$X = \text{Log } N$$

Con lo que nuestra ecuación queda como:

$$Y = A + b X$$

Que de acuerdo al trabajo realizado por Toasa C en 2009 las constantes de regresión vienen dadas por:

$$\hat{b} = \frac{k \sum_{i=1}^k X_i Y_i - \sum_{i=1}^k X_i \sum_{i=1}^k Y_i}{k \sum_{i=1}^k X_i^2 - (\sum_{i=1}^k X_i)^2}$$

Ecuación 4-36

$$\hat{A} = \bar{Y} - \hat{b} \bar{X}$$

Ecuación 4-37

Luego mediante la Ecuación 4.16 se determina la constante A, mediante la Ecuación 4.15 se determina la constante b, valores que se representan en la tabla 4.21; los valores representados en la tabla 4.21 se determinan con las Ecuaciones 4.17 y 4.18.

Tabla 4-21 Valores de regresión para el Teflón

Ni	Si	Xi=LogNi	yi=logSi	yi calc	(yi-yicalc)^2	xi^2	xi.yi
293	14.789	2.467	1.170	1.069	0.010	6.085	2.886
328	14.037	2.516	1.147	1.057	0.008	6.330	2.886
609	11.635	2.785	1.066	0.990	0.006	7.754	2.968
422	11.815	2.625	1.072	1.030	0.002	6.892	2.815
1665	9.335	3.221	0.970	0.880	0.008	10.378	3.125
233	12.206	2.367	1.087	1.094	0.000	5.604	2.572
2572	8.106	3.410	0.909	0.833	0.006	11.630	3.099
450	10.539	2.653	1.023	1.023	0.000	7.040	2.714
99	13.102	1.996	1.117	1.187	0.005	3.983	2.230
1056	8.895	3.024	0.949	0.930	0.000	9.143	2.870
339	10.724	2.530	1.030	1.053	0.001	6.402	2.607
11550	5.608	4.063	0.749	0.670	0.006	16.505	3.042
2312	7.251	3.364	0.860	0.845	0.000	11.316	2.894
12293	5.204	4.090	0.716	0.663	0.003	16.725	2.929
339	9.538	2.530	0.979	1.053	0.005	6.402	2.478
25000	4.340	4.398	0.638	0.586	0.003	19.342	2.804
3517	6.148	3.546	0.789	0.799	0.000	12.575	2.797
600	8.039	2.778	0.905	0.991	0.007	7.718	2.515
4203	5.533	3.624	0.743	0.780	0.001	13.130	2.692
2870	5.778	3.458	0.762	0.821	0.004	11.957	2.634
910	6.874	2.959	0.837	0.946	0.012	8.756	2.477
13314	4.247	4.124	0.628	0.654	0.001	17.010	2.591
4016	5.125	3.604	0.710	0.785	0.006	12.987	2.558
5000	4.929	3.699	0.693	0.761	0.005	13.682	2.562
160000	2.430	5.204	0.386	0.384	0.000	27.083	2.007
150000	2.182	5.176	0.339	0.391	0.003	26.792	1.754
<b>sumatoria</b>	<b>208.410</b>	<b>86.211</b>	<b>22.274</b>		<b>0.101</b>	<b>303.221</b>	<b>69.508</b>
<b>medias</b>	8.016	3.316	0.857				
<b>K=# datos</b>	26						
<b>constantes</b>							
<b>b=</b>	-0.2504						
<b>A=</b>	1.6871						
<b>desv de x</b>	0.9035						
<b>desv de y</b>	0.1959						

Fuente: El autor

Por lo que nuestra ecuación queda como:

$$Y = 1.6875 - 0.2504 X$$

Ecuación 4-38

Y la ecuación logarítmica es:

$$\text{Log } S = 1.6875 - 0.2504 \text{ Log } N$$

Ecuación 4-39

Como  $A = \text{Log } a$ , entonces:

$$a = 10^{1.6875} = 48.6967$$

Finalmente la ecuación exponencial de la cual partimos es:

$$S = 48.6967N^{-0.2504}$$

Ecuación 4-40

La gráfica correspondiente a la Ecuación 4.40 es la siguiente, que representa el comportamiento del Teflón a fatiga por flexión.

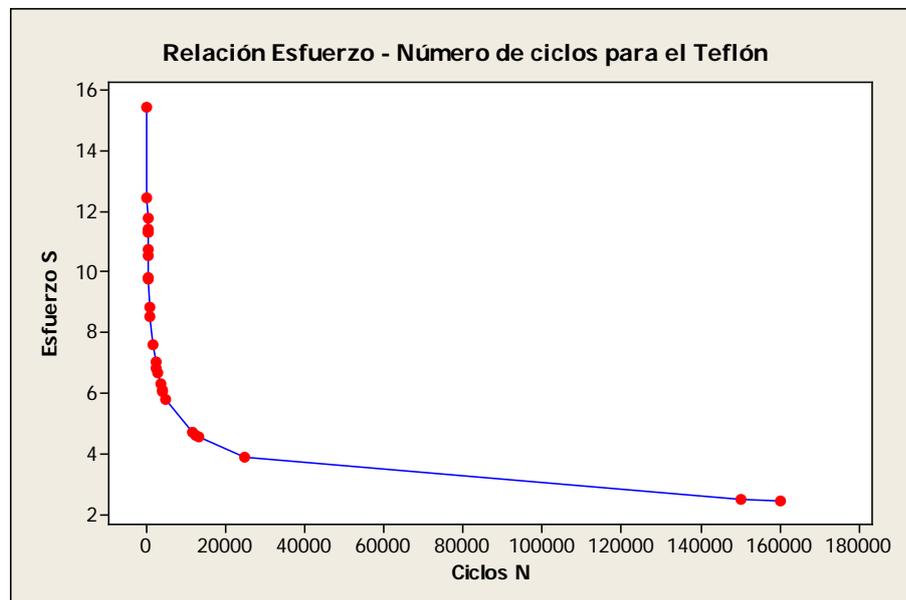


Figura 4-17 Relación Esfuerzo – Número de ciclos para el teflón

Fuente: El autor

Y los mismos datos representando S en función de Log N se tiene en la siguiente gráfica.

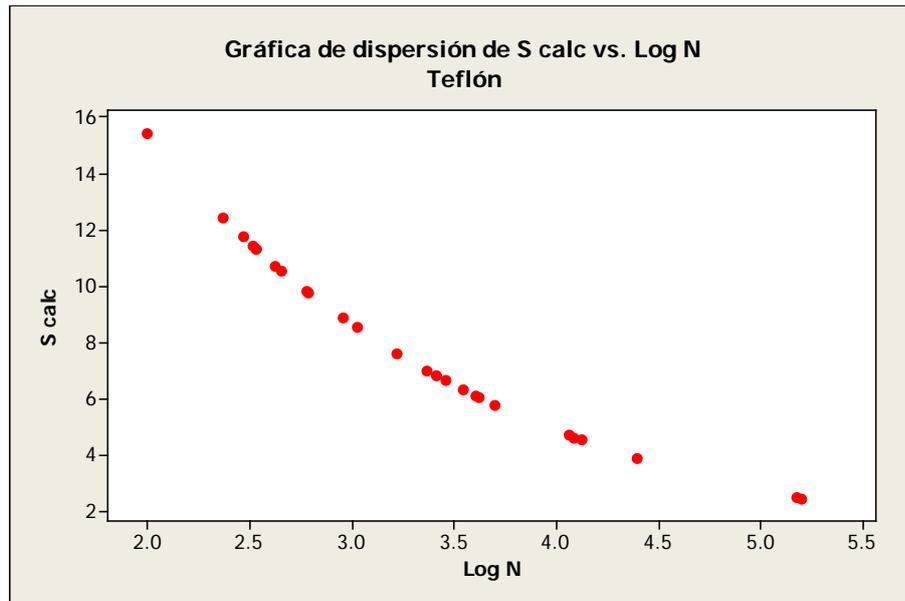


Figura 4-18 Relación Esfuerzo – log número de ciclos para el Teflón

Fuente: El autor

Luego del análisis de regresión se puede también realizar un análisis estadístico descriptivo, para determinar la tendencia central de los datos, y su dispersión, mediante el uso de una hoja electrónica de cálculo podemos determinar dichas medidas, siendo para nuestro caso los representados en la tabla 4.22.

La regresión representadas por las ecuaciones 4.13, 4.14, 4.15, y 4.16 sólo muestra una relación estimada entre las dos variables X e Y, y su ecuación depende exclusivamente de los datos experimentales. Por tanto es lógico suponer que los resultados serían poco confiables si los datos fueron obtenidos de forma incorrecta, sea por error humano o técnico. Por lo que es necesario realizar un análisis de confianza de modo que podamos saber que tan confiables son nuestros datos experimentales.

Tabla 4-22 Resumen de regresión

Resumen para el Teflón

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.9566557
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.915190128
R <sup>2</sup> ajustado	0.911656384
Error típico	0.064845456
Observaciones	26

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	1.089018503	1.089018503	258.9859249	2.32476E-14
Residuos	24	0.100918396	0.004204933		
Total	25	1.189936899			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	1.687118964	0.05314547	31.7453017	4.08879E-21	1.577432106	1.796805822
Variable X 1	-0.250444503	0.015562287	-16.09303964	2.32476E-14	-0.282563485	0.218325521

Fuente: El autor

#### 4.4.4 INTERVALOS DE CONFIANZA

Ahora se pretende determinar un intervalo en el cual con cierta probabilidad se encuentre un parámetro desconocido, en este caso es el número de ciclos hasta la falla, dado cierto valor del esfuerzo aplicado.

Dado que tenemos una muestra aleatoria de  $k$  datos experimentales con una distribución normal de media  $\mu$  y varianza  $\sigma^2$ , notada por  $N(\mu, \sigma^2)$ , dado que  $\bar{Y}$  representa la media y sigue una distribución normal dada por la función  $N(\mu, \sigma^2/k)$ , y además mediante la Ecuación 4.30 se tiene que:

$$Z = \frac{\bar{Y} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{k}}}$$

Que sigue una distribución estándar cuya función es  $N(0,1)$

Sin embargo, en estos casos se asume que se conoce la varianza de la población  $\sigma^2$ , en la realidad  $\sigma^2$  es desconocida y se la estima por medio de la varianza  $s^2$  de la muestra, de modo que tenemos una nueva variable notada por la Ecuación 4.31:

$$T = \sqrt{k} \left( \frac{\bar{Y} - \mu}{s} \right)$$

que sigue una distribución t-student con  $k-1$  grados de libertad. Esta distribución es la base para el desarrollo de la estimación respecto al parámetro  $\mu$ , que como se sabe esta distribución es adecuada para muestras pequeñas que no tengan más de 30 datos.

La determinación del intervalo de confianza se realiza mediante la utilización de la ecuación 4.32.

$$1 - \alpha = P \left( \bar{Y} - \frac{t_{\alpha/2} S}{\sqrt{k}} \leq \mu \leq \bar{Y} + \frac{t_{\alpha/2} S}{\sqrt{k}} \right)$$

Ahora recordemos que  $\mu$  puede ser estimada por  $Y = A + bX$  en el modelo de regresión, entonces si reemplazamos  $Y$  en la desigualdad de la ecuación 4.32 tenemos

$$1 - \alpha = P \left( \frac{\bar{Y} - \frac{t_{\alpha/2} S}{\sqrt{k}} - A}{b} \leq X \leq \frac{\bar{Y} + \frac{t_{\alpha/2} S}{\sqrt{k}} - A}{b} \right)$$

Ecuación 4-41

En nuestro caso si se quiere considerar un intervalo de confianza del 95 %, se toma  $\alpha = 0.05$  y  $k-1$  grados de libertad igual a 25, de los anexos se tiene

$$t_{0.025} = 2.0595$$

Y para el caso del Teflón

$$\bar{Y}=0.857$$

$$s.=0.1959$$

$$A=1.6871$$

$$b.=-0.2504$$

$$0.95 = P(2.999 \leq X \leq 3.63)$$

Luego como  $X=\log N$

Se tiene:

$$0.95 = P(997.7 \leq X \leq 4265.795)$$

Y además  $Y=\log S$

Entonces  $S=7.1945$  MPa

Lo que se interpreta que cuando se aplica un esfuerzo de 7.1945 MPa puede tener una vida de 997.7 a 4265.795 ciclos de esfuerzo con una probabilidad del 95 %.

#### 4.5 DEMOSTRACIÓN DE LA HIPÓTESIS

##### 4.5.1 DEMOSTRACIÓN DE LA HIPÓTESIS PARA EL NYLON

Para determinar la prueba de Hipótesis se analizaron los resultados obtenidos versus los esperados según muestra la curva de la fig. 2.10 tomada de M. N. Riddell, "A Guide to Better Testing of Plastics", los mismos que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4-23 Esfuerzos esperados y calculados

N	S esperado	S calculado
300	29.745	58.613
396	29.112	54.966
338	29.473	57.018
558	28.330	50.773
431	28.919	53.899
552	28.355	50.900
735	27.702	47.637
605	28.146	49.831
868	27.323	45.838
1235	26.519	42.246
1892	25.546	38.275
1242	26.506	42.191
4322	23.663	31.616
3896	23.899	32.384
4736	23.454	30.953
5786	22.998	29.552
21297	20.026	21.859
3589	24.086	33.005
19000	20.287	22.444
79050	17.036	16.137
16013	20.677	23.350
130000	15.902	14.382
15473	20.755	23.536
53222	17.938	17.684
99347	16.515	15.306
37013	18.766	19.235

Fuente: El autor

En donde N es el número de ciclos hasta la falla,  $S_{\text{esperado}}$  es el esfuerzo obtenido de la curva en MPa y  $S_{\text{calculado}}$  es el esfuerzo obtenido en los ensayos, también en MPa.

Para cada par de valores se mide la diferencia y se eleva al cuadrado como se muestra en la siguiente tabla

Tabla 4-24 Cálculo de los valores relacionados

N	S esperado	S calculado	di	(di-d med)^2
300	29.745	58.613	-28.868	297.712
396	29.112	54.966	-25.854	668.419
338	29.473	57.018	-27.544	758.693
558	28.330	50.773	-22.442	503.660
431	28.919	53.899	-24.980	624.008
552	28.355	50.900	-22.545	508.272
735	27.702	47.637	-19.935	397.390
605	28.146	49.831	-21.685	470.260
868	27.323	45.838	-18.515	342.817
1235	26.519	42.246	-15.728	247.355
1892	25.546	38.275	-12.729	162.035
1242	26.506	42.191	-15.685	246.025
4322	23.663	31.616	-7.953	63.251
3896	23.899	32.384	-8.485	71.991
4736	23.454	30.953	-7.499	56.241
5786	22.998	29.552	-6.554	42.960
21297	20.026	21.859	-1.833	3.358
3589	24.086	33.005	-8.919	79.541
19000	20.287	22.444	-2.157	4.654
79050	17.036	16.137	0.899	0.808
16013	20.677	23.350	-2.673	7.147
130000	15.902	14.382	1.519	2.308
15473	20.755	23.536	-2.781	7.735
53222	17.938	17.684	0.254	0.064
99347	16.515	15.306	1.209	1.462
37013	18.766	19.235	-0.468	0.219

Fuente: El autor

Suponiendo que las diferencias tienen distribución normal de probabilidad, la prueba de hipótesis es como sigue.

$$H_0: \mu_D > 0$$

$H_a: \mu_D < 0$

En otras palabras si se aprueba la hipótesis nula querrá decir que existe suficiente evidencia para establecer que la diferencia entre los datos obtenidos en los ensayos tiene mucha diferencia con los esperados, por lo tanto no se los podrá utilizar en diseño mecánico.

En donde  $\mu_1 - \mu_2 = \mu_D$

Para un nivel de significancia  $\alpha$  de 0.05, por tratarse de muestras relacionadas y pequeñas menores de 30, el estadístico de prueba está dada por la siguiente figura.

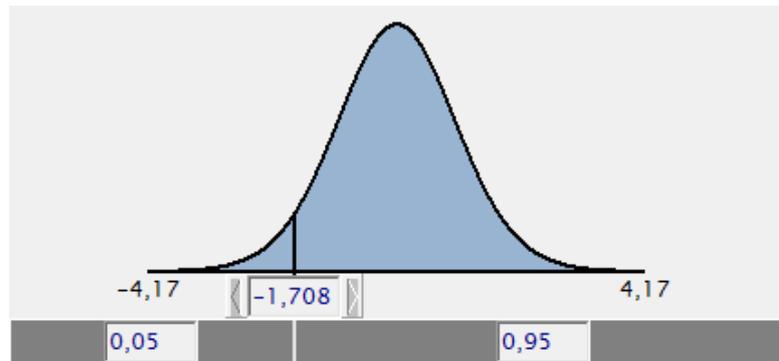


Figura 4-19 Curva de probabilidad a una cola

Fuente: El autor

Entonces rechaza  $H_0$  si el valor del estadístico  $T < -1.708$ , en caso contrario no se rechaza  $H_0$ .

Para el cálculo del estadístico  $T$ , en primer lugar se calcula el promedio de las diferencias muestrales.

$$\bar{d} = \frac{\sum d_i}{n}$$

Luego la cuasi varianza es

$$S_d^2 = \frac{\sum (d_i - \bar{d})^2}{n - 1}$$

La desviación estandar muestral de las diferencias muestrales es  $S_d$ .

Y por último el estadístico es

$$T = \frac{\bar{d}}{S_d/\sqrt{n}}$$

Los valores se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla 4-25 Valores del estadístico

N	S esperado	S calculado	di	(di-d med)^2
300	29.745	58.613	-28.868	297.712
396	29.112	54.966	-25.854	668.419
338	29.473	57.018	-27.544	758.693
558	28.330	50.773	-22.442	503.660
431	28.919	53.899	-24.980	624.008
552	28.355	50.900	-22.545	508.272
735	27.702	47.637	-19.935	397.390
605	28.146	49.831	-21.685	470.260
868	27.323	45.838	-18.515	342.817
1235	26.519	42.246	-15.728	247.355
1892	25.546	38.275	-12.729	162.035
1242	26.506	42.191	-15.685	246.025
4322	23.663	31.616	-7.953	63.251
3896	23.899	32.384	-8.485	71.991
4736	23.454	30.953	-7.499	56.241
5786	22.998	29.552	-6.554	42.960
21297	20.026	21.859	-1.833	3.358
3589	24.086	33.005	-8.919	79.541
19000	20.287	22.444	-2.157	4.654
79050	17.036	16.137	0.899	0.808
16013	20.677	23.350	-2.673	7.147
130000	15.902	14.382	1.519	2.308
15473	20.755	23.536	-2.781	7.735
53222	17.938	17.684	0.254	0.064
99347	16.515	15.306	1.209	1.462
37013	18.766	19.235	-0.468	0.219
Datos n	26			
d media	-11.614			
Sd^2	222.735			
Sd	14.924324			
T	-3.967871555			

Fuente: El autor

Como  $T < t$ , es decir  $-3.9678 < -1708$ , se rechaza la hipótesis nula, por lo tanto para un nivel de significancia del 0.05 no existen datos suficientes para decir que las diferencias son significativa por lo tanto los datos obtenidos pueden ser utilizados en diseño mecánico.

#### **4.5.2 DEMOSTRACIÓN DE LA HIPÓTESIS PARA EL TEFLÓN**

Para determinar la prueba de Hipótesis para el Teflón se sigue la misma metodología que para el Nylon, cuyos cálculos se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 4-26 Cálculos para la demostración de la hipótesis para el Teflón

N	S esperado	S calculado	di	(di-d med)^2
293	3.931	11.743	-7.812	10.979
328	3.903	11.416	-7.513	56.442
609	3.751	9.778	-6.026	36.318
422	3.841	10.718	-6.877	47.290
1665	3.503	7.601	-4.097	16.788
233	3.988	12.437	-8.449	71.390
2572	3.396	6.817	-3.420	11.698
450	3.826	10.547	-6.722	45.179
99	4.198	15.410	-11.211	125.690
1056	3.616	8.519	-4.903	24.041
339	3.895	11.322	-7.427	55.160
11550	3.027	4.680	-1.653	2.733
2312	3.423	7.001	-3.578	12.804
12293	3.011	4.607	-1.596	2.548
339	3.895	11.322	-7.427	55.160
25000	2.836	3.857	-1.021	1.042
3517	3.319	6.303	-2.984	8.902
600	3.755	9.814	-6.059	36.715
4203	3.275	6.028	-2.752	7.576
2870	3.369	6.632	-3.263	10.645
910	3.652	8.842	-5.190	26.935
13314	2.992	4.516	-1.525	2.325
4016	3.287	6.097	-2.810	7.898
5000	3.233	5.771	-2.539	6.445
160000	2.379	2.423	-0.044	0.002
150000	2.395	2.463	-0.068	0.005
Datos n	26			
d media	-4.499			
Sd^2	27.308			
Sd	5.226			
T	-4.390			

Fuente: El autor

Suponiendo que las diferencias tienen distribución normal de probabilidad, la prueba de hipótesis es como sigue.

$$H_0: \mu_D > 0$$

$$H_a: \mu_D < 0$$

En otras palabras si se aprueba la hipótesis nula querrá decir que existe suficiente evidencia para establecer que la diferencia entre los datos obtenidos en los ensayos tienen mucha diferencia con los esperados, por lo tanto no se los podrá utilizar en diseño mecánico.

En donde  $\mu_1 - \mu_2 = \mu_D$

Para un nivel de significancia  $\alpha$  de 0.05, por tratarse de muestras relacionadas y pequeñas menores de 30, el estadístico de prueba está dada por la siguiente figura.

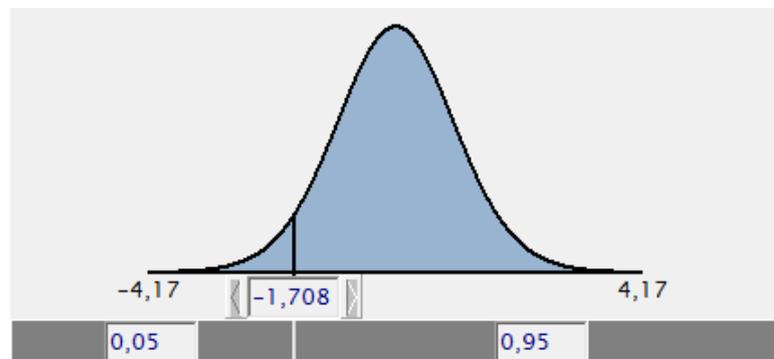


Figura 4-20 Curva de probabilidad a una cola

Fuente: El autor

Entonces como  $T < t$ , es decir  $-4.390 < -1708$ , se rechaza la hipótesis nula, por lo tanto para un nivel de significancia del 0.05 no existen datos suficientes par decir que las diferencias son significativa por lo tanto los datos obtenidos pueden ser utilizados en diseño mecánico.

## **CAPÍTULO V**

### **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1 CONCLUSIONES**

Del análisis realizado en el capítulo anterior se concluye que:

- 1.-** Existe una relación entre el esfuerzo a fatiga por flexión y el número de ciclos tanto para el Nylon como el Teflón, como lo demuestran las ecuaciones 4.29 y 4.40 respectivamente.
- 2.-** El Nylon se puede utilizar como elementos de máquinas.
- 3.-** Los valores del esfuerzo que puede soportar el Teflón son demasiado bajos por lo que no es adecuado para utilizarlo como elemento de máquina.
- 4.-** La temperatura influye directamente en la resistencia a la fatiga por flexión, esto se debe a la baja conductividad térmica de los plásticos y por lo tanto la dificultad para disipar el calor generado.
- 5.-** Resultan necesarios mayores estudios sobre fatiga de materiales poliméricos, para la comprensión del efecto de la elevación de temperatura sobre la vida en fatiga por flexión y su degradación.
- 6.-** Luego de observar las gráficas 4.10 y 4.17 se puede determinar también que dichos materiales parecen tener un límite de fatiga que se encuentra en un punto alrededor de  $1 \times 10^5$  a  $1 \times 10^6$  ciclos, lo cual es bajo comparado con aproximadamente  $1 \times 10^7$  de los aceros.
- 7.-** En el caso del Nylon 310 se puede ver claramente en la figura siguiente que la falla es por una combinación de esfuerzo mecánico y térmico.



Figura 5-1 Tipo de falla en probeta de Nylon

Fuente: El autor

**8.-** En cambio para el caso del Teflón la falla es puramente térmica ya que no presenta fractura y por el contrario, sólo presenta una fuerte deformación del material debido a un aumento de temperatura localizado como se muestra en la figura 5.2



Figura 5-2 Tipo de falla en probeta de Teflón

Fuente: El autor

**9.-** Existe una fuerte influencia del aumento de temperatura en el tipo de fractura ya que no presenta una cara liza y pulida como es característica de la falla por fatiga mecánica.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

De las conclusiones anotadas se recomienda:

**1.-** Realizar y profundizar más el estudio sobre fatiga de los polímeros

**2.-** Determinar la influencia de: la temperatura de transición vítrea, temperatura durante el ensayo, la frecuencia de aplicación de carga, amplitud de esfuerzo, relación de esfuerzo, humedad y otros parámetros no mencionados en este trabajo.

**3.-** Que se construya una máquina de ensayo a fatiga por flexión para polímeros, con el objeto de seguir realizando estudios al respecto.

**4.-** Ensayar con otros polímeros de uso industrial para determinar la posibilidad de utilizarse como elementos de máquinas.

## **CAPÍTULO VI**

### **6. PROPUESTA**

#### **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA DE ENSAYOS A FATIGA POR FLEXIÓN PARA POLÍMEROS DE ACUERDO A LA NORMA ASTM D 671**

##### **6.1 DATOS INFORMATIVOS**

De acuerdo a la norma ASTM D 671 esta máquina sirve para realizar ensayos de fatiga de polímeros, según dicha norma, la probeta debe trabajar a flexión bajo los siguientes parámetros.

La frecuencia de aplicación de las cargas debe ser  $f = 30$  Hz, con una relación de esfuerzo  $R = -1$ , es decir con esfuerzos totalmente invertidos, en donde el esfuerzo a compresión es de igual magnitud que el esfuerzo a tracción y el esfuerzo medio es igual a cero.

El procedimiento de ensayo para polímeros según la Norma ASTM D 671 consiste en ensayar probetas usando máquinas para vigas en cantiléver capaz de producir esfuerzos de amplitud constante en cada ciclo, una máquina mundialmente conocida es la máquina de ensayos SATEC SF – 2U, representada en la figura 2.15 y reproducida en esta parte para mayor facilidad de comprensión, la característica principal de esta máquina es un rotor excéntrico montado sobre el eje de un motor que gira a velocidad constante (aprox. 1800 rpm) este movimiento desbalanceado de la excéntrica produce una fuerza alternante, el número de revoluciones es contado mediante un circuito electrónico que se para cuando la probeta falla, la forma de las probetas son igualmente estandarizadas por la norma cuya configuración está representada en las figuras 2.13 y 2.14, y

reproducidas en esta sección cuyo espesor varía entre 3 y 8 mm aproximadamente.



Figura 6-1 Máquina para ensayo a fatiga de polímeros

Fuente: Tomado de CEAST U.S.A. Inc

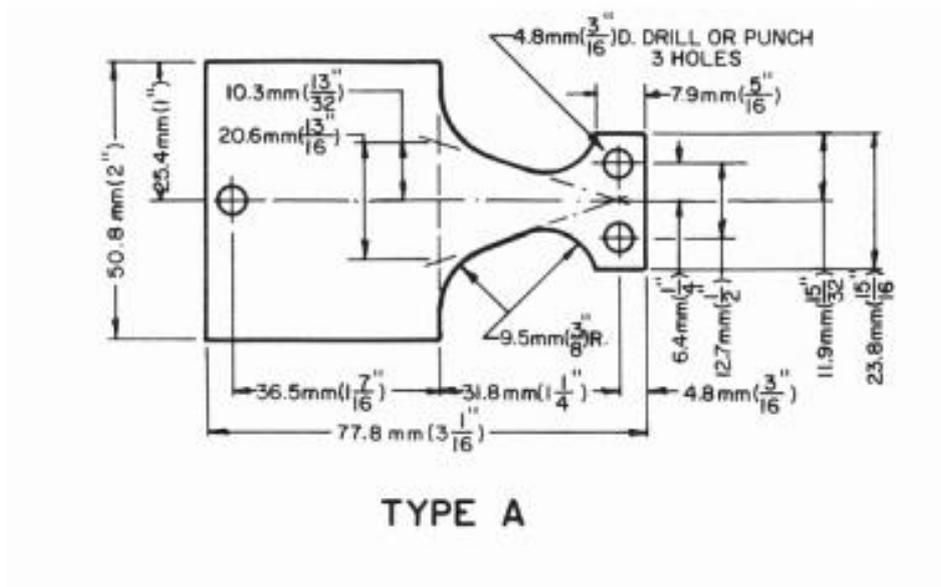


Figura 6-2 Probeta Tipo A para ensayo a fatiga de polímeros

Fuente: Tomado de Handbook of Plastics Testing and Failure Analysis, John Wiley & Sons, (2007)

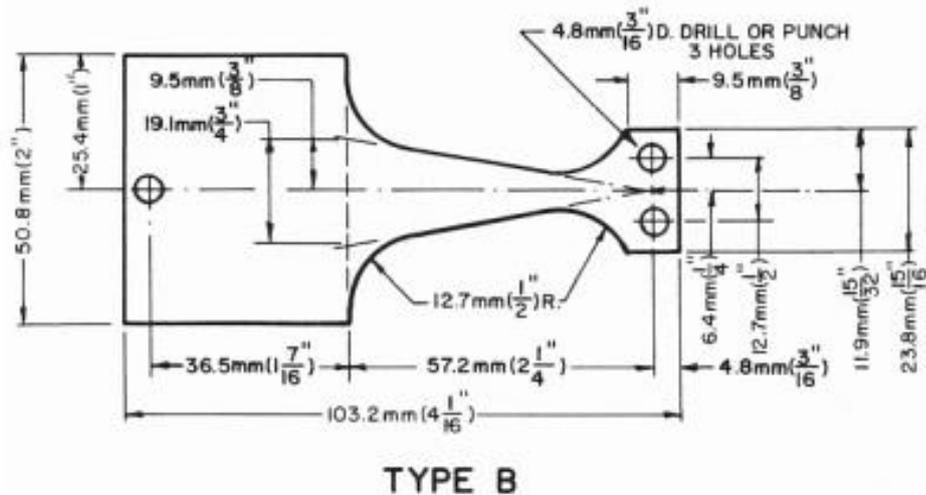


Figura 6-3 Probeta Tipo B para ensayo a fatiga de polímeros

Fuente: tomado de Handbook of Plastics Testing and Failure Analysis, John Wiley & Sons, (2007)

## 6.2 ANTECEDENTES DE LA PROPUESTA

Hoy en día existe una tendencia a nivel mundial sobre la utilización de los plásticos tanto como elementos de máquinas como partes constitutivas de la estructura y cubiertas, con el fin de disminuir costos, peso o mejorar el diseño, tal es así que los Nylon han encontrado campos de aplicación en aquellos sectores o usos particulares donde se requiere más de una de las propiedades siguientes: alta tenacidad, rigidez, buena resistencia a la abrasión, buena resistencia al calor. Hoy en día encontramos elementos de máquinas como tornillos de sujeción, ruedas dentadas, rodamientos, chumaceras y muchos otros, contruidos de materiales poliméricos.

En nuestro medio ha sido un gran problema diseñar elementos de máquinas utilizando diferentes polímeros, debido a la poca información que se tiene en cuanto a resistencia y límite de fatiga se refiere, por lo que se ha creído conveniente construir una máquina que nos ayude a determinar el comportamiento a fatiga de este tipo de materiales, además que por otro lado no se conoce la existencia o utilización de este tipo de equipos de ensayo en nuestro país.

### **6.3 JUSTIFICACIÓN**

El diseño y construcción de una máquina para ensayos a fatiga de polímeros es importante ya que de esta manera la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica podrá disponer del equipo para ensayar nuevos materiales; considerando el aspecto tecnológico es posible construir máquinas más eficientes, silenciosas y livianas. En cuanto a la innovación si bien es cierto ya existen estas máquinas para ensayar materiales ferrosos, ahora ya podemos disponer en la facultad de una máquina para el ensayo de polímeros. Otro aspecto fue la factibilidad tanto técnica como económica, ya que la máquina no es muy costosa ni tiene elementos complicados en su construcción.

Siendo la Visión del CEPOS - UTA consolidar su calidad, diversidad y respuesta a los requerimientos de la Educación Superior y de los sectores productivos, social y gubernamental y la misión satisfacer las demandas científico-tecnológicas de la sociedad ecuatoriana en interacción dinámica con sus actores; formar profesionales líderes con pensamiento crítico, reflexivo, creativo, con conciencia social que contribuyan al desarrollo científico, técnico, cultural y axiológico del país; con este tipo de equipo se logrará desarrollar la investigación científica y tecnológica como un aporte en la solución de los problemas.

En la Universidad Técnica de Ambato y especialmente en la carrera de Ingeniería Mecánica, existe la necesidad de implementar su laboratorio de materiales y ensayo de materiales con equipos modernos, es por ello que se ha creído conveniente completar el presente trabajo de investigación con el diseño y construcción de una máquina de ensayos a fatiga mecánica para polímeros.

## **6.4 OBJETIVOS**

### **6.4.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar y construir una máquina de ensayos a fatiga para polímeros de acuerdo a la norma ASTM D 671.

### **6.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Como objetivos específicos se pueden mencionar los siguientes:

- ✓ Determinar los parámetros necesarios para el diseño de la máquina para ensayos a fatiga de polímeros.
- ✓ Determinar la forma constitutiva y de funcionamiento para que la máquina a construir cumpla con dichas funciones, de acuerdo a la norma ASTM D 671.
- ✓ Diseñar cada uno de los elementos componentes de la máquina de ensayo a fatiga de polímeros.
- ✓ Determinar los parámetros necesarios para seleccionar un motor adecuado de acuerdo a los requerimientos exigidos por la norma ASTM D 671.
- ✓ Seleccionar un sistema para determinar el número de ciclos hasta la falla de las probetas y un sistema adecuado de arranque y parada de la máquina.
- ✓ Elaborar los planos necesarios.
- ✓ Construir la máquina de ensayo a fatiga de polímeros.

Nota: la certificación de la máquina de ensayos a fatiga queda fuera del alcance de este trabajo, pues no forma parte de los objetivos específicos del presente proyecto.

## **6.5 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD**

El diseño y construcción de la máquina de ensayos a fatiga para polímero de acuerdo a la norma ASTM D 671 es totalmente factible, ya que su construcción es por demás sencilla, los materiales existen en el mercado

y el costo que no es elevado es sustentado por el autor de este trabajo de investigación.

El motor requerido que cumpla con el requisito de frecuencia  $f = 30$  Hz se puede conseguir en nuestro medio, el circuito electrónico para el conteo de ciclos es de fácil adquisición y los perfiles necesarios para la estructura se encuentran disponibles en el mercado.

## **6.6 FUNDAMENTACIÓN**

### **6.6.1 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO**

De acuerdo a la norma ASTM D 671 se debe tener muy en cuenta los siguientes parámetros:

#### **a) Frecuencia de aplicación de cargas**

De acuerdo a la norma la frecuencia debe ser de 30 Hz, esto se logra mediante la utilización de un motor eléctrico de cuatro polos que nos da 1800 rpm,

$$f = 1800 \frac{rev}{min} \cdot \frac{1min}{60S} = 30 \text{ ciclos}/_S$$

#### **b) Amplitud de carga**

La amplitud de carga se logra mediante un disco con ranura como la mostrada en la figura, mediante la cual podemos lograr un desbalance,

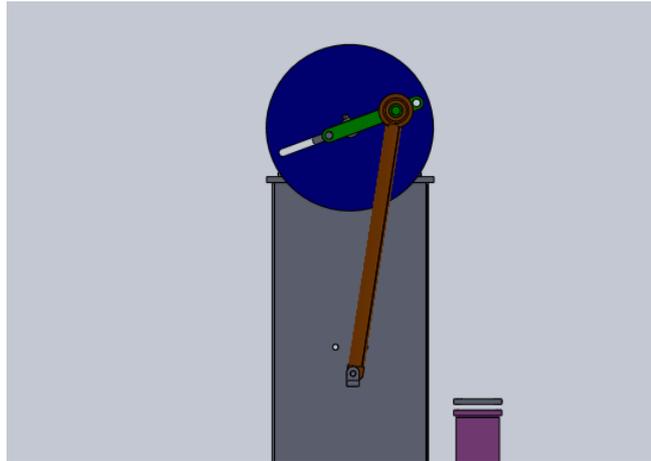


Figura 6-4 Mecanismo de la máquina de ensayos

Fuente: El autor

El balancín acoplado a este disco se puede regular mediante unos tornillos de fijación y establecer la flecha aplicada a la probeta y provocar el esfuerzo de prueba requerido.

### c) Relación de esfuerzo

Según como especifica la norma la relación de esfuerzo debe ser  $R = -1$  es decir:

$$R = -\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

Ecuación 6-1

Esto se logra a medida que la probeta se flexiona hacia arriba y hacia abajo como se esquematiza en la siguiente figura.

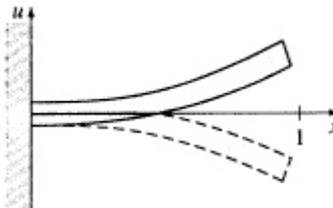


Figura 6-5 Deformación de la probeta

Fuente: El autor

De tal manera que la cara superior o la inferior pasa de tracción a compresión alternativamente, provocando una variación de esfuerzo como se muestra en la siguiente figura.

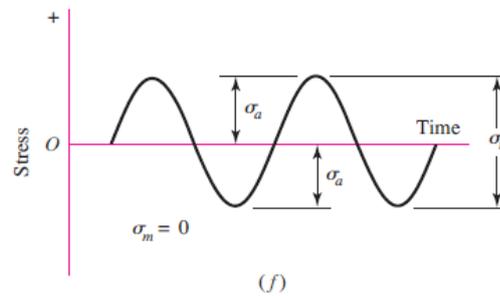


Figura 6-6 Esfuerzo aplicado a la probeta

Fuente: (Shigley's, 2008)

### 6.6.2 FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA

Para que la máquina funcione cumpliendo los requisitos de la norma ASTM D 671 debe tener una estructura similar a la esquematizada en la siguiente figura.

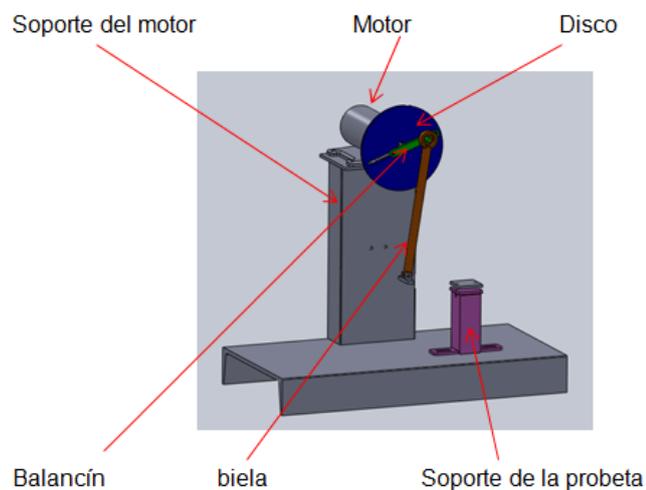


Figura 6-7 Estructura de la máquina

Fuente: El autor

La probeta es colocada en el soporte de probeta, como una viga en cantiléver, el extremo libre es sujeto mediante unos tornillos al extremo libre de la biela, la misma que está acoplada al balancín, el mismo que es regulable pudiéndose deslizar a lo largo de las ranura del disco, el cual va montado directamente sobre el eje del motor, una vez montada la probeta se enciende la máquina mediante una botonera como la de la figura.



Figura 6-8 Arrancador de motor

Fuente: Catálogo de arrancadores WEG/www.weg.net

En este instante empieza a funcionar el contador automático de ciclos, el mismo que puede registrar tanto el número de vueltas del motor como el tiempo hasta la falla de la probeta, mediante un opto acoplador ubicado en el cubo del disco, en el momento que la probeta falle o se rompa, el circuito apaga tanto el contador como el motor y se encuentra listo para un nuevo ensayo.



Figura 6-9 Circuito electrónico para contar el número de vueltas

Fuente: El autor

La amplitud del esfuerzo se logra mediante la amplitud de deformación de la probeta, la cual se regula como se indicó anteriormente moviendo el balancín a lo largo de la ranura del disco montado en el eje del motor lo cual produce un desbalance.

### 6.6.3 DISEÑO Y SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS

#### 6.6.3.1 Dimensionamiento de disco

El dimensionamiento depende exclusivamente de la funcionalidad, ya que las cargas aplicadas son muy pequeñas en comparación con el tamaño del mismo. La forma es como se muestra en la figura 6.10, en la que se puede observar que se requiere de unos canales o ranuras, la longitud de las ranuras depende de los elementos de acople del mecanismo biela manivela y debe garantizar una amplitud máxima de 48 mm necesaria para generar el esfuerzo necesario en la probeta.

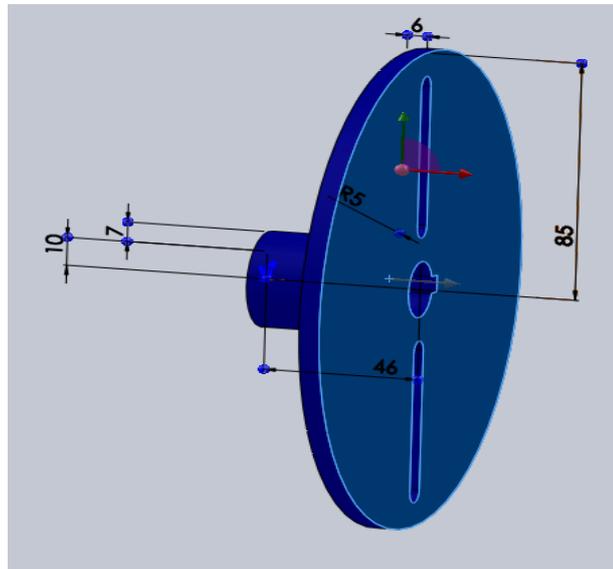


Figura 6-10 Disco

Fuente: El autor

Ahora es necesario determinar la inercia del disco para poder determinar la potencia en el arranque, dicha inercia se puede calcular haciendo referencia a la gráfica siguiente.

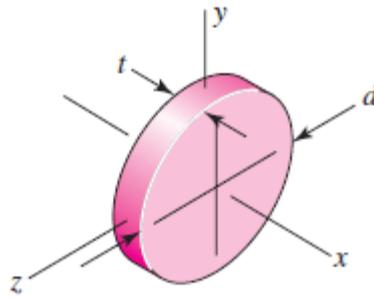


Figura 6-11 Parámetros para calcular la inercia de un disco

Fuente: El autor

De:

$$V = \pi \frac{D^2 - d^2}{4} L$$

Ecuación 6-2

Se tiene que el volumen del cubo es:

$$V = 2.375 * 10^{-5} m^3$$

Y la masa

$$m = \delta \cdot V = 0.186 Kg$$

Ecuación 6-3

Luego la inercia de cubo está representada por la siguiente relación

$$I_x = \frac{m(D^2 - d^2)}{8}$$

Ecuación 6-4

$$I_x = 1.7577 * 10^{-5} Kg \cdot m^2$$

y el momento angular es

$$\tau = I \cdot \alpha$$

Ecuación 6-5

En donde la aceleración angular para el motor considerando que la velocidad de régimen alcanza en 17 segundos según el catalogo correspondiente del motor:

$$\alpha = 11.088 \text{ rad/s}^2$$

Utilizando las mismas ecuaciones se tiene para el disco

$$V = 1.362 * 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$m = 1.069 \text{ Kg}$$

$$I_x = 3 * 10^{-3} \text{ Kg.m}^2$$

Por lo tanto la inercia total será:

$$I_x = 3.024 * 10^{-3} \text{ Kg.m}^2$$

Luego el torque debido a la inercia calculamos con:

$$\tau = I. \alpha$$

$$\tau = 0.0154 \text{ Nm}$$

De la ecuación

$$\tau = I. \alpha$$

En donde:

$\tau$  es el torque debido a la inercia,

$I$  es el momento de inercia de la masa en este caso del disco, y

$\alpha$  es la aceleración durante el arranque.

Reemplazando dichos valores se tiene:

$$\tau = 0.0154 \frac{\text{Kg.m}^2}{\text{s}^2}$$

Luego la potencia en el arranque para vencer la inercia del disco es:

$$P = T\omega$$

Ecuación 6-6

Si la velocidad angular es

$$\omega = 1800rpm = 188.5 \text{ rad/s}$$

Se tiene

$$P = 2.161 \text{ W}$$

### 6.6.3.2 Potencia del motor

La potencia del motor o de accionamiento se determina en función de la carga aplicada durante el ensayo determinada mediante la siguiente ecuación.

$$P_m = T \cdot \omega$$

En donde:

$P_m$  es la potencia requerida en Watios.

T es el torque en Nm, y

$\omega$  es la velocidad angular del motor en rad/s.

El torque se determina en función de la carga requerida para deformar la probeta y obviamente la deformación de la probeta será el brazo de aplicación de la carga

$$T = F \cdot d$$

Ecuación 6-7

$F=77.4 \text{ N}$  (por un factor de seguridad de 1.5)

$d=28\text{mm}$

$\omega=1800$  rpm

Con estos datos la potencia es de 611 Watios, más la potencia para vencer la inercia del disco de 2.161 Watios es 613.161.

Considerando una eficiencia  $\eta$  del motor de 85 %, la potencia es de 721.366 Watios.

Ahora como 1 Hp es igual a 746 Watios, la potencia es de 0.967 Hp, por lo que se requiere un motor de 1 Hp.

Para que el mecanismo de biela manivela tenga una frecuencia de 30 Hz, se requiere un motor de 1800 rpm como ya se analizó anteriormente.

Características del motor eléctrico:

Potencia 1 Hp

Numero de polos 4

Voltaje 330 V

Velocidad 1800 rpm

Amperaje 1.69 A

Código del motor:

HGA90SA

Que corresponde a un motor WEG trifásico, tipo jaula de ardilla, abierto autoventilado, carcasa 90S y perforaciones en los pies.

Para este tipo de motor se requiere un arrancador del tipo que se describe a continuación.

Código del arrancador

DLW-7 R07

Contactora

CW07

Relé

RW17-1D3-U004

En la selección de cable para la instalación del motor se debe seguir las recomendaciones de AWG, que para nuestro caso siendo el motor de 1 Hp de acuerdo a la tabla del apéndice se tiene que se debe usar un cable con calibre 18.

### 6.6.3.3 Dimensionamiento del balancín

Nuevamente las dimensiones dependen de la funcionalidad y su forma es como se muestra en la figura siguiente.

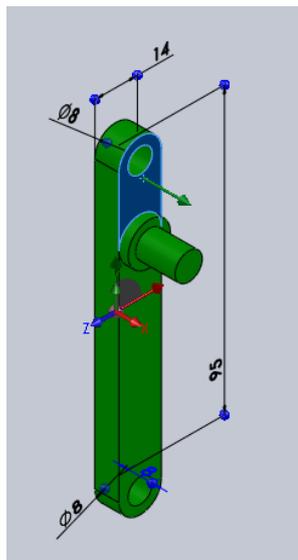


Figura 6-12 Balancín

Fuente: El autor

El diámetro del eje se determina considerando que la carga aplicada es cíclica y genera esfuerzos cortantes no alternante es decir no existe torque y esfuerzo flexionante alternante.

En donde el esfuerzo normal es

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

Ecuación 6-8

$$\sigma = \frac{32F \cdot l}{\pi \cdot d^3}$$

$$\sigma = \frac{32 * 47.3 \text{ N} * 0.006 \text{ m}}{\pi \cdot 0.010^3 \text{ m}^3} = 2.89 \text{ MPa}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma}{2} = 1.445 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m = 0$$

El esfuerzo tangencial es

$$\tau = \frac{F}{A}$$

Ecuación 6-9

$$\tau = \frac{4 * F}{\pi * d^2}$$

$$\tau_m = \frac{4 * 47.3 \text{ N}}{\pi * 0.010^2 \text{ m}^2} = 0.602 \text{ MPa}$$

Según Von Misses el esfuerzo medio es:

$$\sigma_m = \sqrt{3\tau_m^2}$$

Ecuación 6-10

$$\sigma_m' = 1.043 \text{ MPa}$$

Y el esfuerzo alternante es:

$$\sigma_a' = \sqrt{\sigma_a^2 + 3\tau_a^2}$$

Ecuación 6-11

$$\sigma_a' = 1.445 \text{ MPa}$$

Utilizando la teoría de Gerber se tiene:

$$\frac{\sigma_a'}{Se} + \left(\frac{\sigma_m'}{Sut}\right)^2 = \frac{1}{n}$$

Ecuación 6-12

En donde:

n es el factor de seguridad.

Se es límite de fatiga del elemento

Sut es la resistencia última del material.

Sut=380 MPa para un acero AISI 1020.

Por lo que el límite de fatiga del elemento será:

$$Se = ka.kb.kc.kd.ke.kf.Se'$$

Ecuación 6-13

El límite de fatiga de una probeta de viga rotatoria es:

$$Se' = 0.5Sut$$

Ecuación 6-14

$$Se' = 190 MPa$$

En la ecuación los términos ki son los factores de Marin.

Factor de acabado superficial

$$ka = a.Sut^b$$

Ecuación 6-15

Para maquinado el coeficiente a es 4.51 y el exponente b es -0.265, por lo que:

$$ka = 1.121$$

Factor de tamaño

$$k_b = \left( \frac{d}{7.62} \right)^{-0.107}$$

Ecuación 6-16

$$k_b = 0.971$$

Factor de carga

Para flexión

$$k_c = 1$$

Factor de temperatura

Para temperatura ambiente, aproximadamente de 20°C

$$k_d = 1$$

Factor de confiabilidad

Considerando una confiabilidad del 50%, es decir  $R=0.50$

$$k_e = 1$$

Factor de efectos diversos

Para considerar los efectos diversos, en nuestro caso supondremos que se deben al criterio de falla ( $k_{f1}$ ) y a la concentración de esfuerzos debido a la sensibilidad a los entalles ( $k_{f2}$ ), por lo que el factor es:

$$k_f = k_{f1} \cdot k_{f2}$$

Ecuación 6-17

En donde para la teoría de Gerber

$$k_{f1} = 1.66$$

Luego

$$k_{f2} = \frac{1}{K_{f2}} = \frac{1}{1 + q(Kt - 1)}$$

Ecuación 6-18

De la tabla 6.20 del libro de Shigley con un radio de entalle de 0.5 mm la sensibilidad a la muesca  $q$  es igual a 0.68.

De la gráfica A-15.9 del libro de shigley para una relación de  $r/d$  igual 0.05 y  $D/d$  igual a 1.3 se tiene que  $Kt$  es igual a 1.82, por lo tanto:

$$k_{f2} = 0.642$$

Luego

$$k_f = 1.065$$

Considerando estos factores el límite de fatiga es:

$$S_e = 220.26 \text{ MPa}$$

Por lo que el factor de seguridad  $n$  es de 152.3

El factor de seguridad es alto por lo que se realiza un chequeo a deflexión, que para una viga en voladizo es:

$$\delta = \frac{PL^3}{3EI}$$

Ecuación 6-19

En donde:

$E$  es el módulo de elasticidad que para el acero de la tabla A-5 de Shigley es 207 GPa.

$I$  es el momento de inercia.

Aplicando un factor de seguridad de 4 a la carga aplicada de 47.6 N se tiene:

$$\delta = 4.5534 * 10^{-7} \text{ m}$$

O

$$\delta = 4.5534 * 10^{-4}mm$$

Obviamente menor a una milésima que se considera razonable, ya que se requiere que la deformación sea mínima para evitar errores en la generación del esfuerzo en la probeta a ensayar.

#### 6.6.3.4 Dimensionamiento de la biela

Para el dimensionamiento de la biela primero se tomará en cuenta los requerimientos para que cumpla su función, por lo tanto de acuerdo a la figura siguiente, la longitud de centro a centro de la biela debe ser de 293 mm y diámetro de 16 mm, el diámetro interno del alojamiento será de acuerdo al rodamiento que posteriormente se seleccionará.

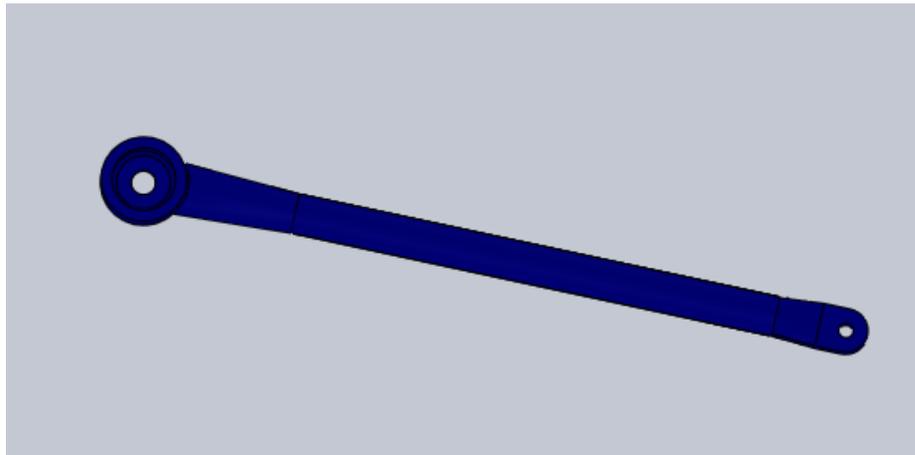


Figura 6-13 Biela

Fuente: El autor

Lo que se tiene que verificar en el diseño mecánico es el espesor de pared del tubo con el cual es construido y el diámetro del orificio para la articulación con la mordaza de la probeta.

a) Determinación del espesor de pared del tubo.

Para ello se debe tomar en cuenta la resistencia y la deformación.

Considerando la resistencia, la biela está sometida a una carga axial totalmente invertida, por lo que sólo se genera esfuerzos normales.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

En donde:

$$A = \frac{\pi(de^2 - di^2)}{4}$$

La carga aplicada se determina en función de la potencia de la siguiente ecuación:

$$H = \frac{W^t \cdot V}{33000}$$

Ecuación 6-20

Desarrollando para  $W^t$  se tiene:

$$W^t = \frac{33000H}{V}$$

En donde:

H es la potencia en Hp.

V es la velocidad en la línea de paso.

$W^t$  es la carga tangencial.

$$V = \frac{\pi dn}{12}$$

Ecuación 6-21

En este caso d es el diámetro de la circunferencia descrita por el eje al cual va montado el rodamiento, que a su vez sería el doble de la amplitud máxima, que de acuerdo a los ensayos fue de 32 mm. Es decir 2.52 pulgadas.

Por lo que:

$$V = 1187.37 \text{ Pies}/\text{min}$$

y

$$W^t = 27.79 \text{ lib} = 123.8 \text{ N}$$

Ahora considerando la deformación, de acuerdo a la recomendación dado en el libro de Mc.Cormac, la relación de esbeltez para elementos principales y evitar vibraciones no debe ser superior a 90, entonces, en este caso tomaremos un valor igual a 40.

$$\frac{kL}{r} = 40$$

Ecuación 6-22

Desarrollando par r se tiene:

$$r = \frac{k \cdot L}{40}$$

En donde k es un factor o condición de apoyo, para elementos articulados en ambos extremos es igual a 1 y L=293 mm, por lo tanto el radio de giro mínimo debe ser de:

$$r = 7.325 \text{ mm}$$

Del catálogo tomamos un tubo de diámetro externo de 16 mm y de 1 mm de pared, para el cual el área es de 47.12 mm<sup>2</sup>, considerando un factor de seguridad de 3 se tiene que el esfuerzo es de:

$$\sigma = 1.4 \frac{N}{\text{mm}^2} = 7.88 \text{ MPa}$$

Como el esfuerzo es completamente invertido se debe calcular el límite de fatiga.

$$Se = ka \cdot kb \cdot kc \cdot kd \cdot ke \cdot kf \cdot Se'$$

El límite de fatiga de una probeta de viga rotatoria es:

$$Se' = 0.5Sut$$

Si el tubo es de acero estructural ASTM A36 la resistencia última a la tracción es de 58 KPsi, es decir 399.89 MPa, por lo tanto:

$$Se' = 199.95 \text{ MPa}$$

En la ecuación los términos  $k_i$  son los factores de Marin.

Factor de acabado superficial

$$ka = a.Sut^b$$

Para laminado en caliente el coeficiente  $a$  es 57.7 y el exponente  $b$  es - 0.718, por lo que:

$$ka = 1.2856$$

Factor de tamaño

$$kb = \left( \frac{d}{7.62} \right)^{-0.107}$$

$$kb = 0.923$$

Factor de carga

Para carga axial

$$kc = 0.85$$

Factor de temperatura

Para temperatura ambiente, aproximadamente de 20°C

$$kd = 1$$

Factor de confiabilidad

Considerando una confiabilidad del 50%, es decir  $R=0.50$

$$k_e = 1$$

Factor de efectos diversos

Para considerar los efectos diversos, en nuestro caso supondremos que se deben al criterio de falla ( $k_{f1}$ ) y a la concentración de esfuerzos debido a la sensibilidad a los entalles ( $k_{f2}$ ), por lo que el factor es:

$$k_f = k_{f1} \cdot k_{f2}$$

En donde para la teoría de Gerber

$$k_{f1} = 1.66$$

Luego

$$k_{f2} = \frac{1}{K_{f2}} = \frac{1}{1 + q(K_t - 1)}$$

Como no existen entalles, el factor  $q$  es igual a uno.

De la gráfica A-15.1 para una relación entre el diámetro del agujero que es de 6 mm y el ancho de placa que es de 16 mm se tiene que  $K_t$  es igual a 2.32, por lo tanto:

$$k_{f2} = 0.431$$

Luego

$$k_f = 0.7155$$

Considerando estos factores el límite de fatiga es:

$$S_e = 169.76 \text{ MPa}$$

Por lo que el factor de seguridad  $n$  es de 21.543, que en este caso es demasiado alto, por lo que se tiene que comprobar la inercia para evitar vibraciones en este elemento.

El radio de giro  $r$  está expresado mediante la siguiente relación:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

Ecuación 6-23

Por lo tanto:

$$r = \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot (de^4 - di^4)}{64}}{\frac{\pi \cdot (de^2 - di^2)}{4}}} = \sqrt{\frac{(de^4 - di^4)}{4 \cdot (de^2 - di^2)}}$$

$$r = 10.63$$

Como el radio de giro requerido es 7.325 no muy inferior al calculado podemos aceptar esta selección.

#### 6.6.3.5 Selección del rodamiento

Para la selección del rodamiento se debe tener en cuenta los parámetros de funcionamiento tales como la carga aplicada y la velocidad de funcionamiento entre otros que se verán más adelante.

De la tabla 4.13 se puede deducir que la carga máxima aplicada es de 123.8 N y como se sabe la velocidad de rotación del disco es de 1800 rpm.

Para la selección del rodamiento se parte de que la carga es puramente radial, por lo que se decide seleccionar un rodamiento rígido de bolas. Se pretende que la confiabilidad sea de 95%, la temperatura de funcionamiento sea no muy superior a la ambiental y el grado de limpieza del lubricante normal.

Con estos datos de entrada se calcula en primer lugar la capacidad básica dinámica con la siguiente fórmula.

$$C = P \sqrt[p]{\frac{Lh * n * 60}{1000000 * a_1 * a_{2-3}}}$$

Ecuación 6-24

En donde:

Lh es la durabilidad en horas.

n es la velocidad en rpm

a1 es el factor de confiabilidad.

a23 es un factor de condición de uso y servicio.

p es el exponente de vida del rodamiento.

P es la carga dinámica equivalente, y

C es la capacidad básica dinámica.

Lh se obtiene de la siguiente ecuación.

$$fl = \sqrt[p]{\frac{L_{h10}}{500}}$$

Ecuación 6-25

Como fl tiene valores entre 3 y 5 para máquinas herramientas según tablas del apéndice, tomamos fl=3.5 y el exponente de vida para rodamientos rígidos de bolas es de 3, determinamos el valor de Lh10=21437.5 horas.

Para una confiabilidad del 95% se tiene que a1 es 0.62

Considerando un factor de seguridad de 2.5 para la carga se tiene que P=309.5 N

Inicialmente nos imponemos el factor a23=2

Por lo tanto  $C=3.811$  KN

Tomamos un rodamiento FAG S6000, para el cual:

$d=10$  mm

$D=26$  mm

$B=8$  mm

Por lo tanto el diámetro medio  $d_m=13$  mm

Del diagrama se requiere una viscosidad relativa aproximadamente de 35 cSt.

Para una temperatura de servicio de  $50$  °C se tiene que se requiere una viscosidad de por lo menos 68 cSt es decir un aceite ISO VG 68, el cual tiene dicha viscosidad a la temperatura estándar de  $40$  °C.

La relación de viscosidad  $k$  es de 1.2 se tiene un factor  $a_{23}$  de 1.9 aproximadamente.

Ahora la capacidad básica dinámica es de:

$$C = 3.876 \text{ KN}$$

Con este dato se selecciona nuevamente el rodamiento S6000.

#### **6.6.3.6 Dimensionamiento del soporte de probeta**

Las dimensiones del soporte dependen de los requerimientos de soporte de la probeta, sin embargo se realiza un análisis de deflexión con el fin de garantizar una gran exactitud de los datos obtenidos en el ensayo.

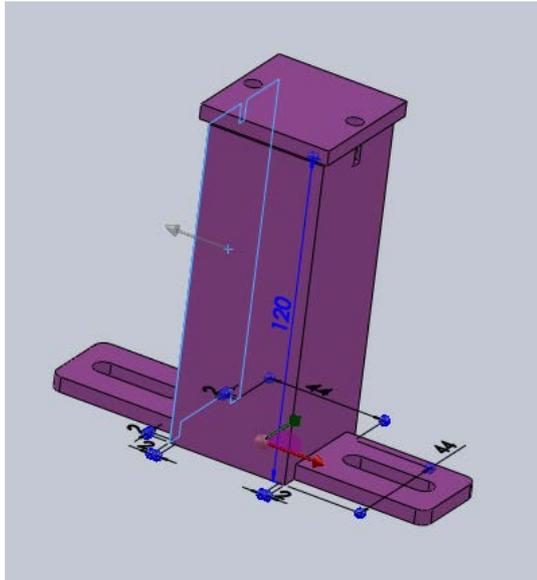


Figura 6-14 Soporte de la probeta

Fuente: El autor

Considerando el elemento como una viga en cantiléver y aplicando la ecuación.

$$Y = \frac{M \cdot X^2}{2 \cdot E \cdot I}$$

Ecuación 6-26

En donde M es el momento aplicado al deformar la probeta, el mismo que resulta del producto de la carga de deformación (77.4 N) por el brazo de aplicación que es la distancia entre centros de los orificios de la probeta (93.7 mm), utilizando un factor de diseño de 3, el momento es:

$$M = 21.757 \text{ Nm}$$

I es el momento de inercia, de

$$I = \frac{(ae^4 - ai^4)}{12}$$

Ecuación 6-27

En donde ae es el lado externo del tubo cuadrado (44 mm) y ai es el lado interno del mismo tubo (40 mm), por lo que:

$$I = 9.9 \times 10^{-8}$$

E es el módulo de elasticidad del acero (207 GPa)

Por lo que:

$$Y = 7.64 \times 10^{-6} \text{ m} = 0.0076 \text{ mm}$$

Por lo tanto el soporte sufre una deformación de 7.6 milésimas de milímetro que es adecuado.

### 6.6.3.7 Bancada

Para el dimensionamiento de la bancada se consideró solamente la altura de trabajo, para ello se tomó en cuenta la recomendación dada por José Luis Melo en su obra titulada Guía Práctica de Ergonomía, en la que sugiere para el 95 percentil para hombres y el 5 percentil para mujeres, las dimensiones dadas en la figura 6.15, por lo que nosotros tomaremos una altura de 100 cm, para lo cual se requiere una bancada de 79 cm. de alto.

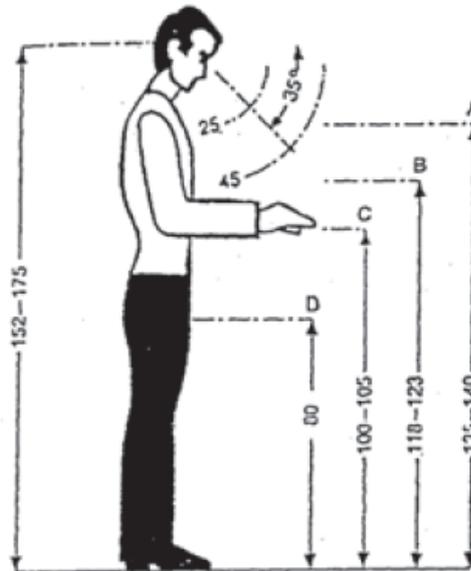


Figura 6-15 Recomendaciones de alturas de trabajo.

Fuente: Melo José Luis Guía Práctica de Ergonomía 2009

## 6.7 METODOLOGÍA, MODELO OPERATIVO

Luego de haber realizado el diseño de la máquina se procede a la construcción de la misma, para esta etapa se debe tener en cuenta que la disposición y forma de cada uno de los elementos de la máquina sean lo más cuidadosamente realizadas, de tal manera que cumpla la función para la cual fueron diseñados.

A continuación se detalla el proceso de construcción utilizado para cada uno de los elementos.

### 6.7.1 Disco

Este elemento es construido con acero de transmisión AISI 1020, en primer lugar se construye el cubo que va montado sobre el eje del motor, mediante taladrado, cilindrado y refrentado para posteriormente fresar el chavetero y el orificio roscado para el prisionero, las dimensiones del mismo son como las diseñadas es decir de diámetro interno de 20 mm, diámetro externo de 34 mm, longitud de 40 mm, chavetero de 6X3 mm y roscado M6 para el prisionero.

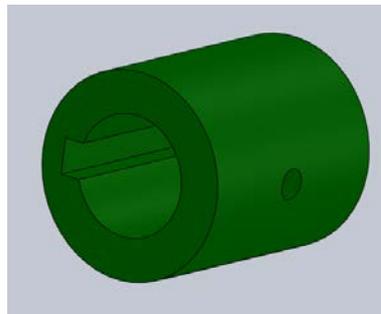


Figura 6-16 Cubo del disco

Fuente: El autor

Posteriormente se construye el disco mediante corte de una plancha de 6 mm de espesor como se muestra en la siguiente figura

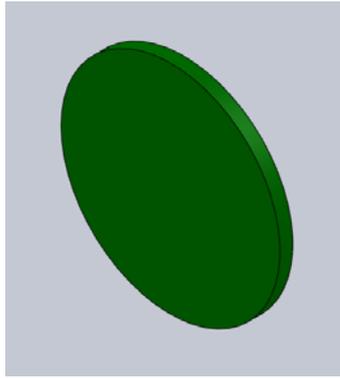


Figura 6-17 Disco

Fuente: El autor

Luego estos dos elementos son soldados con electrodos E 6011al rededor del cubo, para posteriormente ser mecanizada es decir cilindrado y refrentado del disco mediante un torno, y por último son frezadas las dos ranuras con un ancho de 8 mm y largo 48 mm de centro a centro del ojal y a 4.5 mm desde la periferia del disco, para finalmente obtener la pieza completa como se muestra en la figura siguiente.

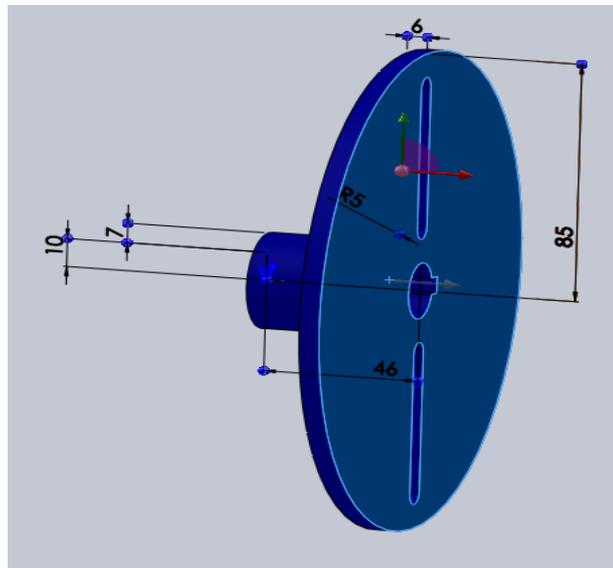


Figura 6-18 Disco completo

Fuente: El autor

### 6.7.2 EJE

Este elemento es construido con una barra rectangular de acero ASTM A36 de 8X14 mm y 95 mm de largo de centro a centro de los agujeros roscados M8 mm practicados para la sujeción contra el disco.

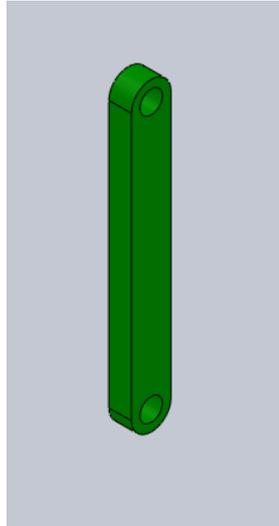


Figura 6-19 Balancín

Fuente: El autor

Luego se suelda a la barra un eje sobre el cual va montado el rodamiento.

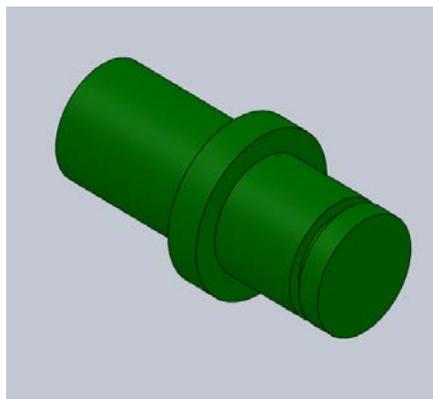


Figura 6-20 Eje

Fuente: El autor

Este eje es soldado a la barra por la parte posterior con electrodo E 6011, para finalmente quedar la pieza como se muestra a continuación.

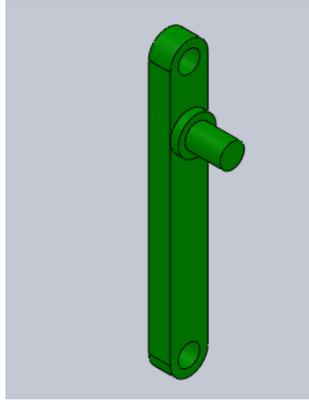


Figura 6-21 Eje completo

Fuente: El autor

### 6.7.3 BIELA

Este elemento es construido en tres partes, el alojamiento del rodamiento, al cual se suelda un tubo de 16 mm de diámetro externo y 1 mm de espesor, y un ojal en el otro extremo del tubo.

El alojamiento del rodamiento es construido con acero AISI 1020 mediante torneado y con dimensiones tales que se pueda colocar un rodamiento de diámetro externo de 26 mm y ancho de 8 mm, el diámetro externo es de 35 mm, en la parte interna del alojamiento se practica una ranura de 1 mm de espesor y una profundidad de 1 mm, y a 2 mm desde la cara frontal del mismo con objeto de colocar un seguro o vincha para asegurar que no se salga el rodamiento.

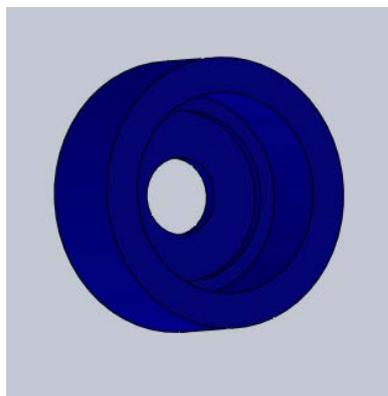


Figura 6-22 Alojamiento del rodamiento

Fuente: El autor

En el extremo contrario de suelda una pletina de 8 mm de espesor con un orificio de 6 mm como se muestra en la siguiente figura.

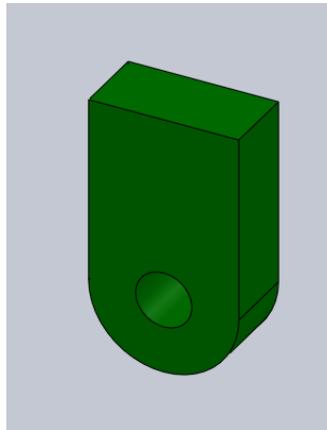


Figura 6-23 Ojal de la biela

Fuente: El autor

Luego se sueldan con electrodo E6011 las tres partes para quedar como se muestra en la figura siguiente.

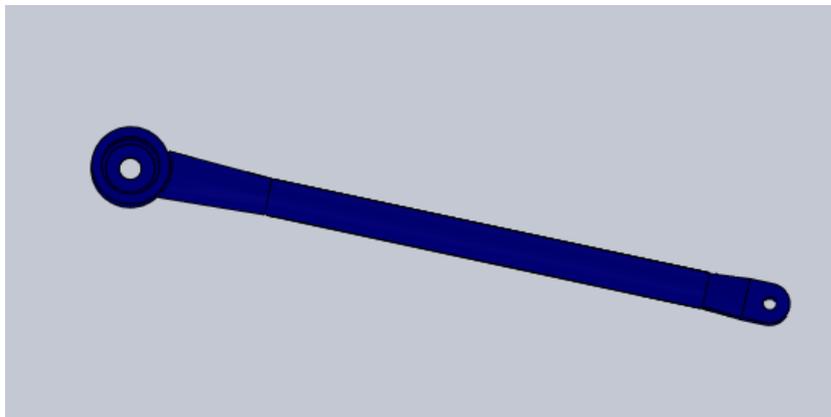


Figura 6-24 Biela

Fuente: El autor

#### **6.7.4 MORDAZA**

En el extremo inferior de la biela se acopla una mordaza, que por cuestión de peso se construyó en Nylon, las dimensiones externas son de 12.5X50.8 mm que es el ancho de la probeta a ser ensayada, en la parte inferior se practicaron dos orificios para rosca M6

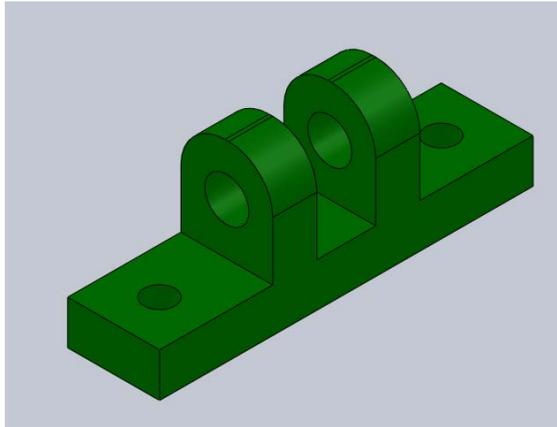


Figura 6-25 Mordaza

Fuente: El autor

### 6.7.5 SOPORTE DE LA PROBETA

El soporte está construido con tubo cuadrado de 44X44 mm y 2 mm de espesor y una longitud de 120 mm, que es la requerida para que la probeta tenga la relación de posición adecuada y se generen esfuerzos totalmente invertidos en la misma; en el extremo superior se suelda con electrodo E 6011 una placa cuadrada de 4 mm de espesor para generar la base para la probeta, como se muestra a continuación

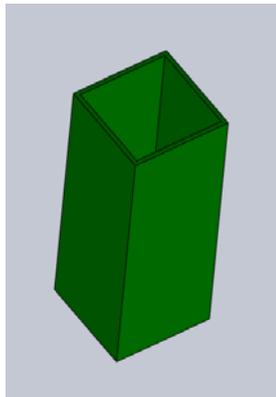


Figura 6-26 Cuerpo del soporte

Fuente: El autor

Luego en la base se sueldan placas ranuradas por medio de cual se fija a la bancada de la máquina, las ranuras tipo ojal son de 8 mm y 26 mm de centro a centro de los ojales con una separación de 11 mm desde el

extremo al centro del radio del mismo, el soporte finalmente queda como se muestra a continuación.

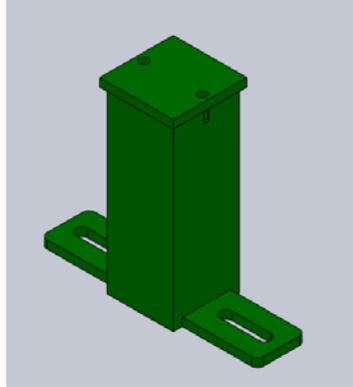


Figura 6-27 Soporte

Fuente: El autor

#### **6.7.6 BASE DEL MOTOR**

La base del motor es una placa rectangular de 130X170 mm y 4 mm de espesor, la cual se suelda a la bancada de la maquina como se mostrará más adelante.

#### **6.7.7 BANCADA**

La forma y dimensiones de la bancada obedecen a condiciones de funcionalidad, y están contruidos con un canal en posición vertical de 158X64 mm, espesores de 6 mm para el alma y 12 mm para el patín, y una altura de 358 mm, este canal va soldado a un canal en posición horizontal de 305X74 con espesores de 8 mm para el alma y 18 mm para los patines, y una longitud de 600 mm, finalmente la forma queda como se muestra en la siguiente figura.

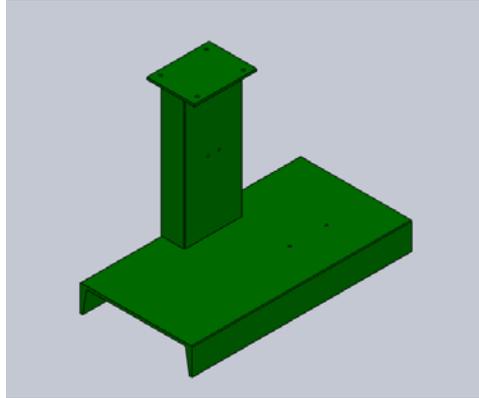


Figura 6-28 Bancada

Fuente: El autor

Luego de ensamblado todos los elementos la máquina queda como se muestra en la figura.

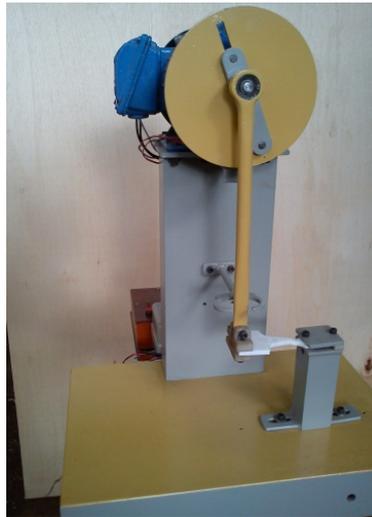


Figura 6-29 Máquina

Fuente: El autor

### 6.7.8 MAQUINARIA Y EQUIPO UTILIZADO

La maquinaria utilizada para la construcción es:

- ✓ Torno.
- ✓ Fresadora.
- ✓ Taladro de columna.
- ✓ Soldadora autógena.

- ✓ Soldadora de arco eléctrico.
- ✓ Compresor.

Dentro de las herramientas se utilizó:

- ✓ Taladro.
- ✓ Amoladora.
- ✓ Esmeril.
- ✓ Sierra.
- ✓ Limas.
- ✓ Machuelos.
- ✓ Entenalla.
- ✓ Equipo de pintura.

Los instrumentos de medición y trazado utilizados fueron:

- ✓ Flexómetro.
- ✓ Calibrador.
- ✓ Escuadras.

## **6.8 ADMINISTRACIÓN**

En la parte administrativa se tiene que realizar un análisis de costo, tanto para construir la máquina como para la realización de las pruebas.

### **6.8.1 COSTOS DIRECTOS**

Los costos directos comprenden los rubros detallados en la siguiente tabla.

Tabla 6-1 Costos directos

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	TOTAL (Dólares)
1	N/A	1	Motor trifásico de 1 Hp HGA90SA	144	144
2	N/A	1	Arrancador DLW-7 R07	56	56
3	N/A	1	Contador, circuito electrónico	90	90
4	1	1	Canal de 158X64	30	30
5	1	1	Canal de 305X74	45	45
6	N/A	1	Disco	20	20
7	N/A	1	Biela	35	35
8	N/A	1	Soporte de probeta	10	10
9	N/A	1	Bancada	110	110
10	Litro	1	Pintura	8	8
11	Litro	1	Fondo	7	7
12	Galón	1	Tinner	6	6
13	N/A	6	Lijas	0.4	2.4
14	N/A	1	Pernos y tuercas		0
15	m	10	Cable calibre 18	0.46	4.6
16	Libras	2	Electrodos E 6011	2.6	5.2
<b>TOTAL</b>					<b>568</b>

Fuente: el autor

Los costos por mano de obra se detallan a continuación.

Tabla 6-2 Costos por mano de obra

CARGO	H TRABAJADAS	COSTO/HORA	TOTAL
Maestro	60	2.8	168
Ayudante	40	1.35	54
<b>TOTAL</b>			<b>222</b>

Fuente: el autor

Los costos relacionados con el material utilizado para los ensayos son:

Tabla 6-3 Costos de material para ensayos

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	TOTAL
1	Kg	16	Naylon 310	10	160
2	Kg	30	Teflón	20	600
3	unidades	60	Corte de probetas	5	300
<b>TOTAL</b>					<b>1060</b>

Fuente: el autor

Por lo que los costos totales fueron los siguientes.

Tabla 6-4 Costos totales

DETALLE	COSTO
Máquina	568
Mano de obra	222
Material	1060
SUBTOTAL	1850
Imprevistos	10%
TOTAL	2035

Fuente: el autor

## 6.9 PREVISIÓN DE LA EVALUACIÓN

La presente propuesta debe estar sujeta a un plan de evaluación, con el fin de mejorar los resultados que se obtengan. La máquina construida formará parte de los equipos del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, de tal manera que su funcionamiento debe ser muy confiable, uno de los parámetros que se debe controlar es la frecuencia de funcionamiento del motor, de tal manera que siempre gire a 1800 rpm, parámetro que establece la norma ASTM D 671, otro aspecto a tomar en cuenta es la facilidad de calibrar el desbalance que debe tener el motor para que genere la flecha adecuada en la probeta, de tal manera que la relación de esfuerzos sea siempre igual a menos uno y el esfuerzo aplicado sea el calculado para el ensayo.

Se espera que en el futuro se siga utilizando este equipo para el proceso enseñanza aprendizaje en la facultad, por lo que se recomienda que como primera actividad sea la de certificar el equipo, posteriormente se realicen estudios con otro tipo de polímeros, para obtener información sobre el comportamiento a fatiga del mismo, esperando que durante este proceso se pueda ir verificando dichos datos con otros trabajos realizados sobre el tema, con el fin de ir mejorando tanto en el procedimiento como en la toma de datos y posteriormente análisis de los mismos para llegar a conclusiones que beneficien tanto en el aspecto académico como en el desarrollo industrial del sector.

Se recomienda además que mediante trabajos de investigación futuros se automatice su funcionamiento con el objeto de obtener resultados mucho más rápidos y precisos mediante la implementación de un programa de computación adecuado, utilización de sensores electrónicos, monitoreo de temperatura y otros parámetros que puedan influir en el resultado final.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Argon, A., Hannoosh, J., & Salama, M. (1977). *Fracture* (Vol. 1). Waterloo, Canada.
2. Ashby M. J., J. D. (1999). *Engineering materials* (Vol. 1 y 2). Oxford : Pergamon Press.
3. Brown, R. (2002). *Handbook of Polimer Testing* (First ed.). (R. Brown, Ed.) Rapra Technology.
4. Callister, W. D. (1995). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales* (Vol. 2). Barcelona, España: Reveté.
5. Casado del Prado, J. A. (s.f.). *Tesis Doctoral Comportamiento en Fatiga de Poliamidas Reforzadas con Fibra de Vidrio Corta*.
6. De, S. K., & White, J. R. (1996). *Short fibre-polymer composites*. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited.
7. Donald, A., Kramer, E., & Bubeck R., R. (1982). *Polymer Phys. Journal of Polymers and Science*, 1129.
8. DuPont. (s.f.). *Products and Properties Handbook, Teflón FEP of Do Pont*.
9. Fuchs, H. O., & Stephens, R. I. (1980). *Metal Fatigue in Engineering*. Wiley.
10. Grellmann, W., & Seidle, S. (2007). *Polymer Testing*. Munich.
11. Herman, W., Hertzberg, R., & Manson, J. (1990). *The influence of loading history on fatigue in engineering plastics. Journal of Materials Science* (Vol. 25).
12. Hertzberg, R., Manson, J., & Skibo, M. ., (1975). *Polymer Engineering and Science*.

13. James, M. G. (s.f.). *Resistencia de Materiales* (5° ed.). Thomson.
14. Jones, F. D., Horton, H. L., Ryffel, H. H., & Oberg, E. (2000). *Machinery's Handbook* (26th ed.). New York: Industrial Press Inc.
15. M.M, P. P. (1996). *Fundamentos de ciencia de polímeros*. Technomic.
16. Martínez, E. A. (s.f.). *Optimización de la tenacidad a fractura de matrices epoxi con termoplásticos I.*
17. Melo, J. L. (2009). *Guía Práctica de Ergonomía* (Primera ed.). Buenos Aires, Argentina: Contartese Gráfica S.R.L.
18. Moya, J., & Otros. (s.f.). *Materiales para engranajes plásticos, Características y propiedades*. De la Universidad Veracruzana, Xalapa.
19. Newman, J. C., & Piascik, R. S. (s.f.). *Fatigue Crack Growth Thresholds, Endurance Limits, and Design*. (W. Conshohocken, Ed.) USA.
20. Pétrault, D., Bertin, Y., & Ranganathan, N. &. (s.f.). *A study in fatigue on polyamide-polymer. Fatigue 93* (5 th ed., Vol. 3).
21. R., H., & Manson J. and Skibo, M. (1975). *Polymer Engineering and Science*.
22. Sauer, J. A. (1980). *International Journal of Fracture* (Vol. 16).
23. Shigley's, B. (2008). *Shigley's Mechanical Engineering Design* (Eighth ed.). Madrid: McGraw-Hill Primis.
24. Sih, G. C. (2008). *SOLID MECHANICS AND ITS APPLICATIONS* (Vol. 52). (Springer, Ed.) Shanghai, China: G.M.L. GLADWELL.
25. Sperling, L. H. (1993). *An introduction to physical polymer science*. NY: Wiley.

26. Toasa C, P. D. (2009). *Curvas de Wohler y análisis estadístico de pruebas de fatiga*. (Amarum, Ed.)
27. Walpole, R. E. (1999). *Probabilidad y estadística para ingenieros* (Sexta ed.). México: Prentice-Hall Hispanoamerica S.A.
28. Ward I.M, H. D. (1993). *Mechanical properties of solid polymers*. Wiley.
29. Wyzgoski, M., Novak, G., & Simon, D. (1990). *Fatigue fracture of nylon polymers*.
30. Zhurkov, S. N., Zakrevskii, V. A., & Korsukov, V. E. (1972). *Journal of Polymers Science.*, (pág. 1509).

## **ANEXOS**

### **1. ANEXO A**

## **FORMATOS**

## UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



### FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CENTRO DE ESTUDIOS DE POSGRADO MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO

**Tema:** "ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A FATIGA MECÁNICA DEL TEFLÓN Y NYLON PARA DETERMINAR LA RELACIÓN ESFUERZO - NÚMERO DE CICLOS BAJO LA APLICACIÓN DE CARGAS VARIABLES"

Norma	ASTM D 671	
Material	TEFLÓN	
Dimensiones	Probeta tipo B	
Tipo de carga aplicada	Flexión en cantiléver cíclica	
Módulo de elasticidad		(MPa)
Deflexión		(mm)
Frecuencia		(ciclos por segundo)
Número de ciclos hasta la falla		(ciclos)
Distancia a la falla desde el extremo derecho de la probeta		(mm)
Espesor de la probeta		(mm)
Fecha		
Responsable		

Fuente: El autor

## UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



### FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CENTRO DE ESTUDIOS DE POSGRADO MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO

**Tema:** "ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A FATIGA MECÁNICA DEL TEFLÓN Y NYLON PARA DETERMINAR LA RELACIÓN ESFUERZO - NÚMERO DE CICLOS BAJO LA APLICACIÓN DE CARGAS VARIABLES"

Norma	ASTM D790	
Material	TEFLÓN	
Dimensiones	Probeta tipo B	
Tipo de carga aplicada	Estática de flexión	
Deflexión generada		(mm)
Temperatura		° C
Número de ciclos		Ad
Fecha		
Responsable		

Fuente: El autor

## 2. ANEXOS B

### PROBETAS

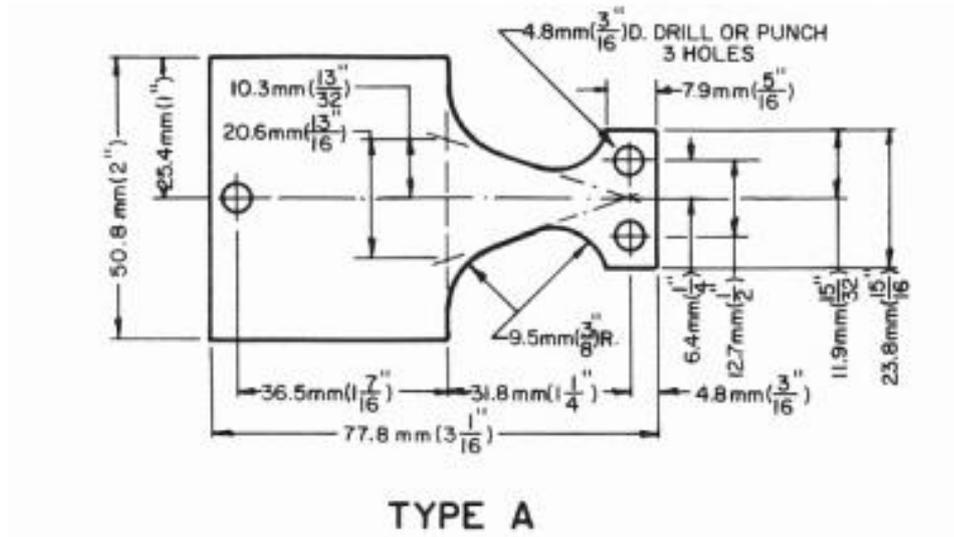


Figura 2-1 Probeta Tipo A para ensayo a fatiga por flexión de polímeros

Fuente: Tomado de Handbook of Plastics Testing and Failure Analysis, John Wiley & Sons, (2007)

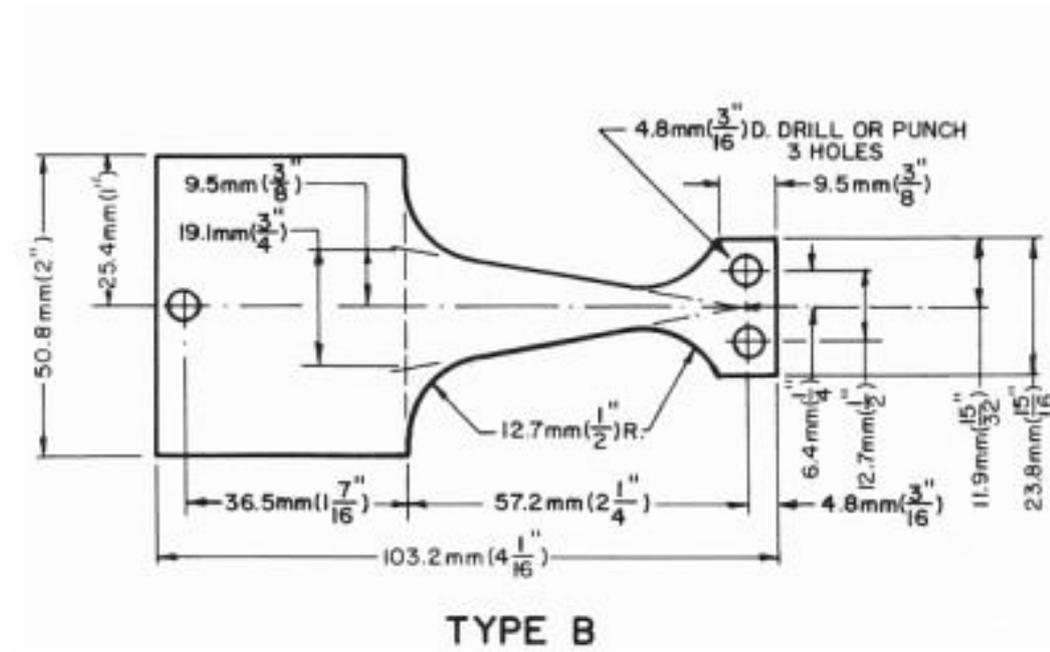


Figura 2-2 Probeta Tipo B para ensayo a fatiga por flexión de polímeros

Fuente: Tomado de Handbook of Plastics Testing and Failure Analysis, John Wiley & Sons, (2007)

### 3. ANEXO C

#### PROPIEDADES DE LOS POLÍMEROS

Tabla 3-1 Propiedades de Polímeros comunes

Material	Densidad gr/cm <sup>3</sup>	Punto de fusión °C	Temperatura máxima utilización continua °C	Temperatura mínima utilización continua °C	Alargamiento a rotura %	Resistencia a rotura Kg/cm <sup>2</sup>
NYLON PA-6	1,14	213	90	-40	>50	650
POLIAMIDA PA-66	1,15	250	110	-30	25	700
POLIAMIDA PA-6G	1,15	220	105	-40	25	--
POLIAMIDA PA-6+MoS <sub>2</sub>	1,16	255	105	-30	25	--
POLIAMIDA PA-6 PLAC	1,13	220	100	-20	>10	--
POLIAMIDA PA-66+6F30	1,29	255	120	-20	7	--
DELTRIN POM	1,41	165	100	-50	400	600
ARNITE PETP	1,38	250	100	-20	15	750
TEFLON PTFE	2,20	327	260	-250	250 a 400	200 a 300
PVC	1,40	110	60	-10	150	550
POLIPROPILENO PP	0,91	160	100	-10	650	300
POLIETILENO PE-300	0,95	135	80	--	>800	--
POLIETILENO PE-500	0,96	135	80	-100	>600	300
POLIETILENO PE-1000	0,94	135	80	-250	>450	250
COPOLIESTER PETG	1,27	--	65	--	--	--
METACRILATO PMMA	1,18	--	70	-100	10	--
POLICARBONATO PC	1,20	150	120	-100	>100	650
POLIURETANO PU	1,25	--	--	-20	530	--

Fuente: Tomado de Plásticos Técnicos-Características Técnicas

<http://www.electrocome.com/ptecnicos1.htm>

Tabla 3-2 Propiedades de Polímeros comunes (continuación)

Material	Resistencia al choque Kj/cm <sup>2</sup>	Modulo elastico tracción N/mm <sup>2</sup>	Absorción agua 100% Hr 23 %	Resistencia superficial ohm	Conductividad térmica W/Km	Dureza Shore D.A. Rockwell M. Brinell H.
NYLON PA-6	3,80	2800	9	5.10 <sup>12</sup>	0,28	D.75
POLIAMIDA PA-66	5	3000	8	1.10 <sup>13</sup>	0,25	D.75
POLIAMIDA PA-6G	4	3300	6,5	1.10 <sup>13</sup>	0,29	M.88
POLIAMIDA PA-6+MoS <sub>2</sub>	4	3400	6,1	1.10 <sup>12</sup>	0,29	M.90
POLIAMIDA PA-6 PLAC	4	2800	6,5	--	--	M.80
POLIAMIDA PA-66+6F30	--	5200	5,5	1.10 <sup>13</sup>	0,30	M.98
DELFIN POM	7	2900	0,8	1.10 <sup>13</sup>	0,31	M.90
ARNITE PETP	4	3400	0,6	6.10 <sup>12+2</sup>	0,29	M.95
TEFLON PTFE	16	750	0	1.10 <sup>13+3+2</sup>	0,25	D.50 D.65
PVC	12	3000	0,1	1.10 <sup>13</sup>	0,20	D.65-85
POLIPROPILENO PP	NO ROMPE	1300	0,01	1.10 <sup>13</sup>	0,22	D.73
POLIETILENO PE-300	NO ROMPE	1000	0,01	1.10 <sup>13</sup>	0,43	D.65
POLIETILENO PE-500	NO ROMPE	900	0,01	1.10 <sup>13</sup>	0,42	D.65
POLIETILENO PE-1000	NO ROMPE	700	0,01	1.10 <sup>13</sup>	0,42	D.65
COPOLIESTER PETG	--	2200	0,2	--	--	R.155
METACRILATO PMMA	18	3300	0,3	10 <sup>13+2</sup>	0,19	H.190
POLICARBONATO PC	>30	2300	0,35	1.10 <sup>13+3</sup>	0,21	M.75
POLIURETANO PU	--	--	--	--	--	D.90

Fuente: Tomado de Plásticos Técnicos-Características Técnicas

<http://www.electrocome.com/ptecnicos1.htm>

Tabla 3-3 Propiedades Mecánicas de la Poliamida

<b>POLIAMIDA 6 CON MoS2 (HUMEDAD 2,5%)</b>				<b>PA+MOS2</b>
				<b>(H - 2,5%)</b>
<b>PROPIEDADES MECANICAS A 23°C</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>ASTM</b>	<b>DIN</b>	<b>VALORES</b>
PESO ESPECIFICO	gr/cm3	D-792	53479	1.14
RESIST. A LA TRACC.(FLUENCIA / ROTURA)	Kg/cm <sup>2</sup>	D-638	53455	450 / --
RES. A LA COMPRESION ( 1 Y 2 % DEF)	Kg/cm <sup>2</sup>	D-695	53454	150 / 280
RESISTENCIA A LA FLEXION	Kg/cm <sup>2</sup>	D-790	53452	400
RES. AL CHOQUE SIN ENTALLA	Kg.cm/cm <sup>2</sup>	D-256	53453	NO ROMPE
ALARGAMIENTO A LA ROTURA	%	D-638	53455	200
MODULO DE ELASTICIDAD (TRACCION)	Kg/cm <sup>2</sup>	D-638	53457	14000
DUREZA	Shore D	D-2240	53505	72 - 76
COEF. DE ROCE ESTATICO S/ACERO		D-1894		0.30 a 0.50
COEF. DE ROCE DINAMICO S/ACERO		D-1894		0.25 a 0.40
RES. AL DESGASTE POR ROCE				BUENA

Fuente: Tomado de Industrias JQ Plásticos de ingeniería

<http://www.jq.com.ar/Imagenes/Productos/Poliamida6/Fbasicas/planchas.htm>

Tabla 3-4 Propiedades mecánicas del Teflón

<b>POLITETRAFLUORETILENO VIRGEN (TEFLON)</b>				<b>PTFE</b>
<b>PROPIEDADES MECANICAS A 23°C</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>ASTM</b>	<b>DIN</b>	<b>VALORES</b>
PORCENTAJE EN PESO DE CARGA	%			0
PESO ESPECIFICO	Grs/cm3	D-792	53479	2.13 A 2.21
RES. TRACCION (DEF. 3% Y A ROTURA)	Kg/cm <sup>2</sup>	D-638	53455	70 - 210
RES. A COMPRESION ( DEF. 1% y 5%)	Kg/cm <sup>2</sup>	D-695	53454	44 - 100
APLASTAMIENTO A 140 Kg/cm <sup>2</sup> DURANTE 24 Hs.	%	D-621		14,3
ALARGAMIENTO A LA ROTURA (MINIMA)	%	D-638	53453	200
RES. AL CHOQUE SIN ENTALLA	Kg.cm/cm <sup>2</sup>	D-256	53455	NO ROMPE
DUREZA	Shore D	D-2240	53505	50 A 55
COEF. DE ROCE ESTATICO S/ACERO		D-1894		0.06 A 0.09
COEF. DE ROCE DINAMICO S/ACERO		D-1894		0,13
RES. AL DESGASTE POR ROCE				MUY BAJA

Fuente: Tomado de Industrias JQ Plásticos de ingeniería

<http://www.jq.com.ar/Imagenes/Productos/Poliamida6/Fbasicas/planchas.htm>

Tabla 3-5 Datos de algunas Poliamidas

DESCRIPCION	METRICAS	INGLESAS	NYLACERO -6	NYLACERO M	NYLALLOY	NYLACERO 2000
RESISTENCIA A LA TENSION	KG/CM2	PSI	842 - 12,000	706 - 12,400	872 - 12,400	892- 9800
ELONGACION	%	%	26 - 26	27 - 27	10 - 10	55 - 55
MODULO DE TENSION	KG/CM2	PSI	32,600 - 464,200	27,900 - 397,400	32,300 - 459,100	28,082 - 400,000
MODULO DE FLEXION	KG/CM2	PSI	30,600 - 435,200	27,900 - 396,000	30,600 - 435,200	26,773 - 380,000
RESISTENCIA A FLEXION	KG/CM2	PSI	1,022 - 14,530	1,176 - 16,728	1,230 - 17,500	949 - 13,500
RESISTENCIA AL IMPACTO	CM-KG/CM2	FT-LB/IN2	7.85 - 109	16.7 - 230	8 - 110	NYLACERO 2000
RESISTENCIA AL IMPACTO IZOD	CM-KG/CM	FT-LB/IN2	10.3 - 142	20.6 - 284	10.5 - 145	- 395
RESISTENCIA A LA COMPRESION	KG/CM2	PSI	1,070 - 15,200	850 - 12,100	1,070 - 15,200	NYLACERO 2000
DUREZA	SHORE-D	ROCKWELL-R	82.5 - 111	81	85	83

Fuente: Brunssen.com.mx

<http://www.comercioindustrial.net/productos.php>

Tabla 3-6 Propiedades del Teflón

PROPIEDADES	Unidad	Virgen	Fivi25%	Carb25%	Fivi/Mos%	Bce60%	Grafi15%
GRAVEDAD ESPECIFICA	-	2.16	2.24	2.12	2.26	3.93	2.16
DUREZA SHORE D	-	55	58	63	59	64	56
RESISTENCIA TENSIL	Kg/cm2	250-300	175-185	160-200	174-225	170-190	150-230
ELONGACION A LA RUPTURA	%	250-300	230-250	80-100	230-240	130-150	195-240
DEFORMACION BAJO PRESION (140 KGS/cm <sup>2</sup> 24 horas a 23 °C)	%	9.5-11	10 - 11.5	5 - 6	4.8 - 5	5 - 5.5	9 - 10
DEFORMACION PERMANENTE (después de 24 horas a 23 °C)	%	5-5.5	4.5 - 6	1.8 - 2.2	2.6 - 2.8	1.7 - 1.9	4.5 - 5
COEFICIENTE DE DILATACION TERMICA a 25-100 °C	10 <sup>-7</sup> /°C	12-13	8-12	7 - 12	6.4 - 20.8	8 - 8.5	8 - 13.5
COEFICIENTE DE FRICCION ESTATICA (velocidad 150mm/min presión: 5 grs./cm <sup>2</sup> , temp. 23 °C)	-	.08	.17	.15	.06	.19	.13
COEFICIENTE DE FRICCION DINAMICA (velocidad 150mm/min, presión: 5 grs. /cm <sup>2</sup> , temp. 23 °C)	-	.06	.14	.11	.09	.17	.10
COEFICIENTE DE DESGASTE pv= 100 (kg m/cm <sup>2</sup> min) (cm <sup>3</sup> min/kg m h) 10 <sup>-8</sup> velocidad: 30 m/mi	-	20 - 25	10 - 20	30 - 40	6	10-15	1,750
VOLUMEN DE RESISTIVIDAD	OHM. CM	10 <sup>18</sup>	10 <sup>15</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>15</sup>	(10 <sup>7</sup> )	10 <sup>7</sup>
TEMPERATURA DE FUSION	°C	327	327	327	327	327	327
TEMPERATURA DE SERVICIO	°C	260	260	260	260	260	260

Fuente: Brunssen.com.mx

<http://www.comercioindustrial.net/productos.php>

Tabla 3-7 Propiedades mecánicas del Nylon 310 (Schwartz Technical Plastics LAMIGAMID® 310 Cast Polyamide 6, Conditioned)

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	1.15 g/cc	0.0415 lb/in <sup>3</sup>	ISO R 1183
Moisture Absorption at Equilibrium	2.20 %	2.20 %	DIN 53473
Water Absorption at Saturation	7.00 % @Temperature 20.0 °C	7.00 % @Temperature 68.0 °F	ISO R 62
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Ball Indentation Hardness	125 MPa	18100 psi	Hc 30; ISO 2039; partially
Tensile Strength, Yield	65.0 MPa	9430 psi	ISO-DIS 527
Creep Strength	>= 12.0 MPa	>= 1740 psi	1% elongation, 1000 h; DIN 53444
	>= 16.0 MPa	>= 2320 psi	2% elongation, 1000 h; DIN 53444
Tensile Modulus	2.80 GPa	406 ksi	DIN 53457
Flexural Modulus	2.50 GPa	363 ksi	DIN 53457
Flexural Strength	60.0 MPa	8700 psi	DIN 53452
Compressive Strength	39.0 MPa	5660 psi	5% pressing; EN ISO 604
	63.0 MPa	9140 psi	10% pressing; EN ISO 604
	90.0 MPa	13100 psi	20% pressing; EN ISO 604
Coefficient of Friction	0.0800	0.0800	With lubrication
Coefficient of Friction, Dynamic	0.420	0.420	no lube; Steel 2162, Rvst=2E-6m, p=0.05 Mpa, v=0.6 m/s, t=40°C
Tear Strength Test	>= 0.250	>= 0.250	ISO-DIS 527
K Factor (Wear Factor)	9.00e-11	9.00e-11	
Izod Impact Resistance	NB	NB	swinging hammer 0,1 DIN 51222; DIN 53453
Izod Impact, Notched (ISO)	>= 15.0 kJ/m <sup>2</sup>	>= 7.14 ft-lb/in <sup>2</sup>	ISO 180-1A

Fuente: MatWeb Datos Técnicos de Materiales

<http://www.matweb.com/search/GetMatIsByTradename.aspx?navletter=L&tn=LAMIGAMID%C2%AE>

Tabla 3-8 DuPont™ Teflon® FEP 5100 Fluoropolymer Resin

Physical Properties	Metric	English	Comments
Specific Gravity	2.15 g/cc	2.15 g/cc	ASTM D792
Water Absorption	<= 0.0100 %	<= 0.0100 %	24 hours; ASTM D570
Melt Flow	22.0 g/10 min	22.0 g/10 min	ASTM D2116
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Shore D	56	56	ASTM D2240
Tensile Strength, Ultimate	21.0 MPa	3050 psi	ASTM D1457
Elongation at Break	310 %	310 %	ASTM D1457
Flexural Modulus	0.634 GPa	92.0 ksi	ASTM D790
Coefficient of Friction	0.0800 - 0.300	0.0800 - 0.300	ASTM D1894
Izod Impact, Notched	NB	NB	ASTM D256

Fuente: MatWeb Datos Técnicos de Materiales

<http://www.matweb.com/search/GetMatlsByTradename.aspx?navletter=L&tn=LAMIGAMID%C2%AE>

## 4. ANEXO D

### TABLAS Y GRÁFICAS

Tabla 4-1 Tabla t-Student

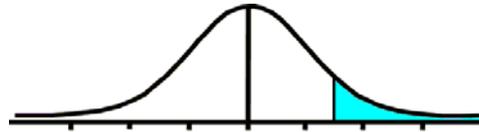


Tabla t-Student

$t_0$

Grados de libertad	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005
1	1.0000	3.0777	6.3137	12.7062	31.8210	63.6559
2	0.8165	1.8856	2.9200	4.3027	6.9645	9.9250
3	0.7649	1.6377	2.3534	3.1824	4.5407	5.8408
4	0.7407	1.5332	2.1318	2.7765	3.7469	4.6041
5	0.7267	1.4759	2.0150	2.5706	3.3649	4.0321
6	0.7176	1.4398	1.9432	2.4469	3.1427	3.7074
7	0.7111	1.4149	1.8946	2.3646	2.9979	3.4995
8	0.7064	1.3968	1.8595	2.3060	2.8965	3.3554
9	0.7027	1.3830	1.8331	2.2622	2.8214	3.2498
10	0.6998	1.3722	1.8125	2.2281	2.7638	3.1693
11	0.6974	1.3634	1.7959	2.2010	2.7181	3.1058
12	0.6955	1.3562	1.7823	2.1788	2.6810	3.0545
13	0.6938	1.3502	1.7709	2.1604	2.6503	3.0123
14	0.6924	1.3450	1.7613	2.1448	2.6245	2.9768
15	0.6912	1.3406	1.7531	2.1315	2.6025	2.9467
16	0.6901	1.3368	1.7459	2.1199	2.5835	2.9208
17	0.6892	1.3334	1.7396	2.1098	2.5669	2.8982
18	0.6884	1.3304	1.7341	2.1009	2.5524	2.8784
19	0.6876	1.3277	1.7291	2.0930	2.5395	2.8609
20	0.6870	1.3253	1.7247	2.0860	2.5280	2.8453
21	0.6864	1.3232	1.7207	2.0796	2.5176	2.8314
22	0.6858	1.3212	1.7171	2.0739	2.5083	2.8188
23	0.6853	1.3195	1.7139	2.0687	2.4999	2.8073
24	0.6848	1.3178	1.7109	2.0639	2.4922	2.7970
25	0.6844	1.3163	1.7081	2.0595	2.4851	2.7874
26	0.6840	1.3150	1.7056	2.0555	2.4786	2.7787
27	0.6837	1.3137	1.7033	2.0518	2.4727	2.7707
28	0.6834	1.3125	1.7011	2.0484	2.4671	2.7633
29	0.6830	1.3114	1.6991	2.0452	2.4620	2.7564
30	0.6828	1.3104	1.6973	2.0423	2.4573	2.7500
31	0.6825	1.3095	1.6955	2.0395	2.4528	2.7440
32	0.6822	1.3086	1.6939	2.0369	2.4487	2.7385

Fuente:

[http://www.emp.uva.es/inf\\_acad/hermer/estad2/material/e2t\\_tabla\\_t\\_de\\_student.pdf](http://www.emp.uva.es/inf_acad/hermer/estad2/material/e2t_tabla_t_de_student.pdf)

## 5. ANEXO E

Tabla 5-1 Arranque de motores

### Arranque Directo Trifásico - DLW - 60 Hz

Potencia del motor trifásico 1)						Rango de ajuste del relé de sobrecarga (A)	Máxima corriente nominal I <sub>n</sub> (A)	Referencia	Contactor	Relé de sobrecarga
220V 230V	380V	400V 415V	440V	500V	660V 690V					
60 Hz kW / hp	60 Hz kW / hp	60 Hz kW / hp	60 Hz kW / hp	60 Hz kW / hp	60 Hz kW / hp					
<b>Arrancador tamaño 2</b>										
	0,12/0,16	0,12/0,16				0,4...0,63	0,63	DLW-7 ■■■■ ◆ -R02	CW07	RW17-1D3-C063
		0,18/0,25				0,4...0,63	0,63	DLW-7 ■■■■ ◆ -R02	CW07	RW17-1D3-C063
	0,18/0,25					0,56...0,8	0,8	DLW-7 ■■■■ ◆ -R03	CW07	RW17-1D3-D008
						0,56...0,8	0,8	DLW-7 ■■■■ ◆ -R03	CW07	RW17-1D3-D008
0,12/0,16	0,25/0,33	0,25/0,33				0,8...1,2	1,2	DLW-7 ■■■■ ◆ -R04	CW07	RW17-1D3-D012
0,18/0,25						0,8...1,2	1,2	DLW-7 ■■■■ ◆ -R04	CW07	RW17-1D3-D012
0,25/0,33	0,37/0,5	0,37/0,5				1,2...1,8	1,8	DLW-7 ■■■■ ◆ -R05	CW07	RW17-1D3-D018
	0,55/0,75	0,55/0,75				1,2...1,8	1,8	DLW-7 ■■■■ ◆ -R05	CW07	RW17-1D3-D018
	0,75/1,0	0,75/1,0				1,2...1,8	1,8	DLW-7 ■■■■ ◆ -R05	CW07	RW17-1D3-D018
<del>0,37/0,5</del>	<del>1,1/1,5</del>	<del>1,1/1,5</del>				<del>1,8...2,8</del>	<del>2,8</del>	<del>DLW-7 ■■■■ ◆ -R06</del>	<del>CW07</del>	<del>RW17-1D3-D028</del>
						1,8...2,8	2,8	DLW-7 ■■■■ ◆ -R06	CW07	RW17-1D3-D028
0,55/0,75	1,5/2,0	1,5/2,0				2,8...4	4	DLW-7 ■■■■ ◆ -R07	CW07	RW17-1D3-U004
0,75/1,0						2,8...4	4	DLW-7 ■■■■ ◆ -R07	CW07	RW17-1D3-U004
1,1/1,5	2,2/3,0	2,2/3,0				4,0...6,3	6,3	DLW-7 ■■■■ ◆ -R08	CW07	RW17-1D3-D063
		3,0/4,0				4,0...6,3	6,3	DLW-7 ■■■■ ◆ -R08	CW07	RW17-1D3-D063
1,5/2,0	3,0/4,0					5,6...8	7	DLW-7 ■■■■ ◆ -R09	CW07	RW17-1D3-U008
<b>Arrancador tamaño 4</b>										
	0,12/0,16	0,12/0,16	0,12/0,16		0,25/0,33	0,4...0,63	0,63	DLW-9 ■■■■ ◆ -R21	CWM9	RW27-1D3-C063
		0,18/0,25		0,18/0,25		0,4...0,63	0,63	DLW-9 ■■■■ ◆ -R21	CWM9	RW27-1D3-C063
	0,18/0,25		0,18/0,25		0,37/0,5	0,56...0,8	0,8	DLW-9 ■■■■ ◆ -R22	CWM9	RW27-1D3-D008
			0,25/0,33	0,25/0,33		0,56...0,8	0,8	DLW-9 ■■■■ ◆ -R22	CWM9	RW27-1D3-D008
0,12/0,16	0,25/0,33	0,25/0,33	0,37/0,5	0,37/0,5	0,55/0,75	0,8...1,2	1,2	DLW-9 ■■■■ ◆ -R23	CWM9	RW27-1D3-D012
0,18/0,25					0,75/1,0	0,8...1,2	1,2	DLW-9 ■■■■ ◆ -R23	CWM9	RW27-1D3-D012
0,25/0,33	0,37/0,5	0,37/0,5			1,1/1,5	1,2...1,8	1,8	DLW-9 ■■■■ ◆ -R24	CWM9	RW27-1D3-D018
	0,55/0,75	0,55/0,75	0,55/0,75	0,55/0,75		1,2...1,8	1,8	DLW-9 ■■■■ ◆ -R24	CWM9	RW27-1D3-D018
	0,75/1,0	0,75/1,0	0,75/1,0	0,75/1,0		1,2...1,8	1,8	DLW-9 ■■■■ ◆ -R24	CWM9	RW27-1D3-D018

Fuente: Tomado de catálogo de arrancadores para motores WEG

Tabla 5-2 tabla para la selección de motores eléctricos trifásicos

Esforços radiais máximos – 60 Hz – Fr en (kN) 25.000 horas						
Carcasa	4 polos		6 polos		8 polos	
	L	L/2	L	L/2	L	L/2
160	3,7	6,0	3,6	5,9	3,7	6,0
180	5,8	10,5	5,7	10,4	5,6	10,4
200	7,9	12,7	7,8	13,4	8,0	13,5
225S/M	6,7	14,5	7,0	15,1	7,0	15,2
250S/M	8,5	14,3	8,3	14,2	8,1	14,1
280S/M	12,7	21,0	13,2	21,0	13,7	21,5
315S/M	12,6	26,9	11,9	25,4	12,8	27,4
315L	7,2	15,3	9,2	19,7	10,8	23,1
355M/L	16,8	35,4	15,5	32,7	15,8	33,4
355A/B	8,9	18,8	9,8	20,7	13,4	28,2

Tabla 9.2 - Esfuerzos radiales máximos para rodamientos de rodillos en 60 Hz

Fuente: Catálogo de motores trifásicos WEG/www.weg.net

Tabla 5-3 Selección de cables para motores

Apéndice



Tablas técnicas

T5: Selección de cables VFD

■ Tabla de selección del calibre de cable (AWG) para uso en motores variadores de velocidad (VFD)

Drive HP	230V 3Ø AWG	460V 3Ø AWG	575V 3Ø AWG	Drive HP	230V 3Ø AWG	460V 3Ø AWG	575V 3Ø AWG
1/4 - 3	18	18	18	60	2/0	3	4
5	14	18	18	75	4/0	2	3
7 1/2	12	18	18	100	300 MCM	1/0	2
10	10	16	18	125	500 MCM	2/0	1/0
15	8	12	14	150	-	3/0	2/0
20	6	10	12	200	-	300 MCM	4/0
25	4	8	10	250	-	400MCM	300 MCM
30	3	8	10	300	-	-	400 MCM
40	2	6	8	350	-	-	500 MCM
50	1/0	4	6	400 - 500	-	-	-

Nota: esta tabla sugiere el calibre AWG a usarse en base a los caballos de fuerza (HP) y la carga completa de corriente (FLC) 125% de las veces de acuerdo a NEC art. 430-22 (A). Los amperes (FLC) están determinados por NEC art. 430-150:

Fuente: Tabla de selección de cables del catálogo LAPP GROUP

## 6. ANEXO F

Tabla 6-1 Factores a y b para determinar el factor de acabado

Surface Finish	Factor a		Exponent b
	$S_{ut}$ , kpsi	$S_{ut}$ , MPa	
Ground	1.34	1.58	-0.085
Machined or cold-drawn	2.70	4.51	-0.265
Hot-rolled	14.4	57.7	-0.718
As-forged	39.9	272.	-0.995

From C.J. Noll and C. Lipson, "Allowable Working Stresses," *Society for Experimental Stress Analysis*, vol. 3, no. 2, 1946 p. 29. Reproduced by O.J. Horger (ed.) *Metals Engineering Design ASME Handbook*, McGraw-Hill, New York. Copyright © 1953 by The McGraw-Hill Companies, Inc. Reprinted by permission.

Fuente: Shigley 2008

Tabla 6-2 Factor  $k_b$

### Size Factor $k_b$

The size factor has been evaluated using 133 sets of data points.<sup>15</sup> The results for bending and torsion may be expressed as

$$k_b = \begin{cases} (d/0.3)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ in} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \leq 10 \text{ in} \\ (d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases} \quad (6-20)$$

Fuente: Shigley 2008

Tabla 6-3 Factor de temperatura

**Table 6-4**

	Temperature, °C	$S_T/S_{RT}$	Temperature, °F	$S_T/S_{RT}$
Effect of Operating	20	1.000	70	1.000
Temperature on the	50	1.010	100	1.008
Tensile Strength of	100	1.020	200	1.020
Steel. * ( $S_T$ = tensile	150	1.025	300	1.024
strength at operating	200	1.020	400	1.018
temperature;	250	1.000	500	0.995
$S_{RT}$ = tensile strength	300	0.975	600	0.963
at room temperature;	350	0.943	700	0.927
$0.099 \leq \hat{\sigma} \leq 0.110$ )	400	0.900	800	0.872
	450	0.843	900	0.797
	500	0.768	1000	0.698
	550	0.672	1100	0.567
	600	0.549		

\*Data source: Fig. 2-9.

Fuente: Shigley 2008

Tabla 6-4 Factor de confiabilidad

**Table 6-5**

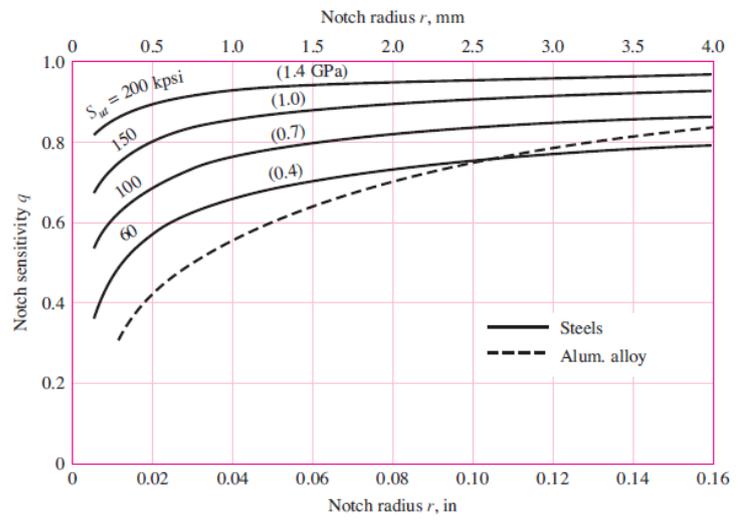
	Reliability, %	Transformation Variate $z_\alpha$	Reliability Factor $k_e$
Reliability Factors $k_e$	50	0	1.000
Corresponding to	90	1.288	0.897
8 Percent Standard	95	1.645	0.868
Deviation of the	99	2.326	0.814
Endurance Limit	99.9	3.091	0.753
	99.99	3.719	0.702
	99.999	4.265	0.659
	99.9999	4.753	0.620

Fuente: Shigley 2008

Tabla 6-5 Factor de sensibilidad a las muescas

**Figure 6-20**

Notch-sensitivity charts for steels and UNS A92024-T wrought aluminum alloys subjected to reversed bending or reversed axial loads. For larger notch radii, use the values of  $q$  corresponding to the  $r = 0.16$ -in (4-mm) ordinate. (From George Sines and J. L. Waisman (eds.), *Metal Fatigue*, McGraw-Hill, New York. Copyright © 1969 by The McGraw-Hill Companies, Inc. Reprinted by permission.)



Fuente: Shigley 2008

## 7. ANEXO G

Tabla 7-1 Factor FI

Máquina-herramienta		
Husillos de tornos y fresadoras	3 ... 4,5	Fuerza de corte, par motor, precarga peso de la pieza a mecanizar; velocidad de servicio
Husillos de taladradoras	3 ... 4	
Husillos de rectificadoras	2,5 ... 3,5	
Husillos porta-piezas en rectificadora	3,5 ... 5	
Transmisiones de máquina-herramienta	3 ... 4	Potencia nominal; velocidad nominal
Prensas / volante	3,5 ... 4	Peso de volante; velocidad nominal
Prensas / eje excéntrico	3 ... 3,5	Fuerza de prensado, tiempos alicuotos; velocidad nominal
Herramientas eléctricas y	2 ... 3	Fuerza de corte y accionamiento; velocidad nominal

Fuente: Catálogo FAG

Tabla 7-2 Factor de confiabilidad

▼ Factor $a_1$						
Probabilidad de fallo %	10	5	4	3	2	1
Vida a fatiga	$L_{10}$	$L_5$	$L_4$	$L_3$	$L_2$	$L_1$
Factor $a_1$	1	0,62	0,53	0,44	0,33	0,21

Fuente: Catálogo FAG

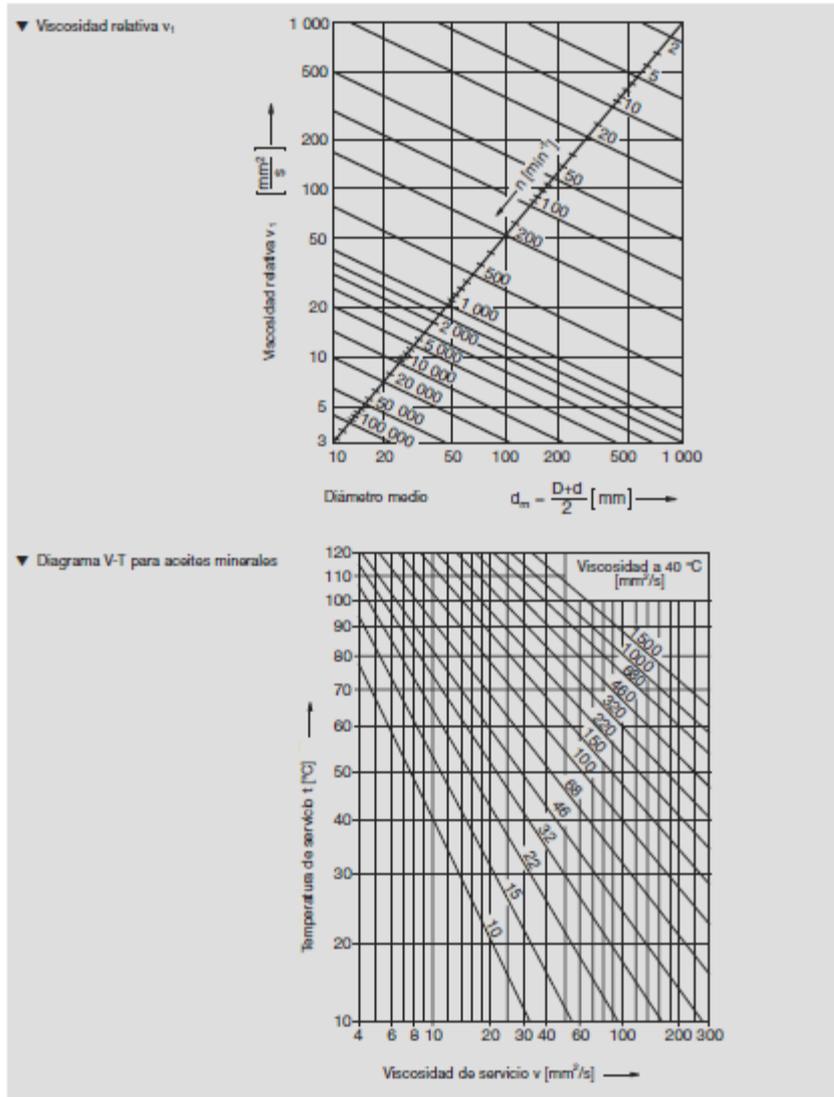


Figura 7-1 Viscosidad relativa y de servicio

Fuente: Catálogo FAG

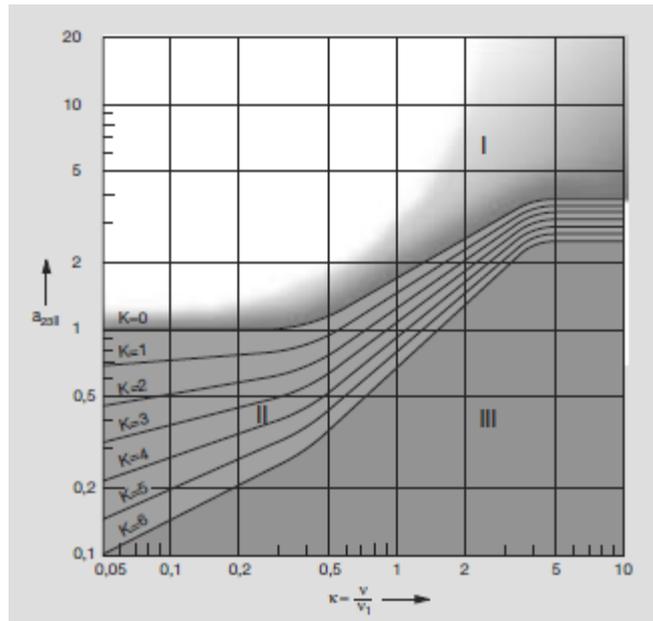


Figura 7-2 Factor  $a_{23}$

Fuente: Catálogo FAG

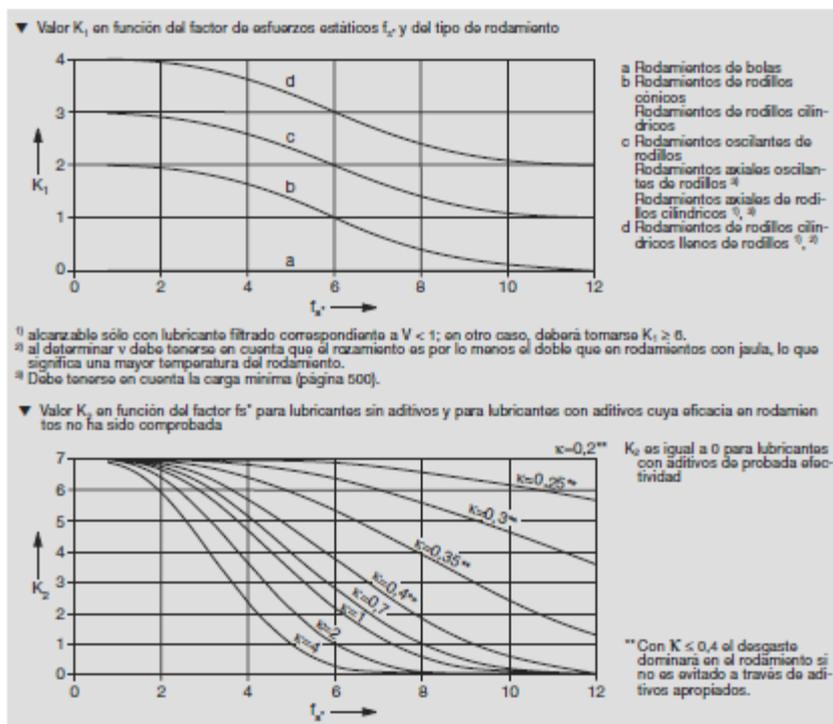


Figura 7-3 Factor de limpieza

Fuente: Catálogo FAG

Tabla 7-3 Selección de rodamientos

Eje	Dimensiones		
	d	D	B
	mm		
10	10	26	8
	10	26	8
	10	26	8
	10	26	8
	10	26	8
	10	26	8
	10	26	8
	10	26	8
	10	30	9
	10	30	9
	10	30	9
	10	30	9
	10	30	9
	10	30	9

Capacidad de carga		Velocidad límite	Velocidad de referencia	Denominación abreviada
dyn. C	stat. C <sub>0</sub>			
kN		min <sup>-1</sup>		Rodamiento FAG
4,55	1,98	34000	32000	6000
4,55	1,98	34000	32000	S6000.WZ03B
4,55	1,98	28000	32000	6000.ZR
4,55	1,98	19000		6000.ZRSH
4,55	1,98	19000		S6000.ZRSH.WZ03B
4,55	1,98	34000		16100
6	2,6	32000	26000	6200
6	2,6	32000	26000	S6200.WZ03B
6	2,6	26000	26000	6200.ZR
6	2,6	17000		6200.ZRSH
6	2,6	17000		S6200.ZRSH.WZ03B

Fuente: Catálogo FAG

## 8. ANEXO H

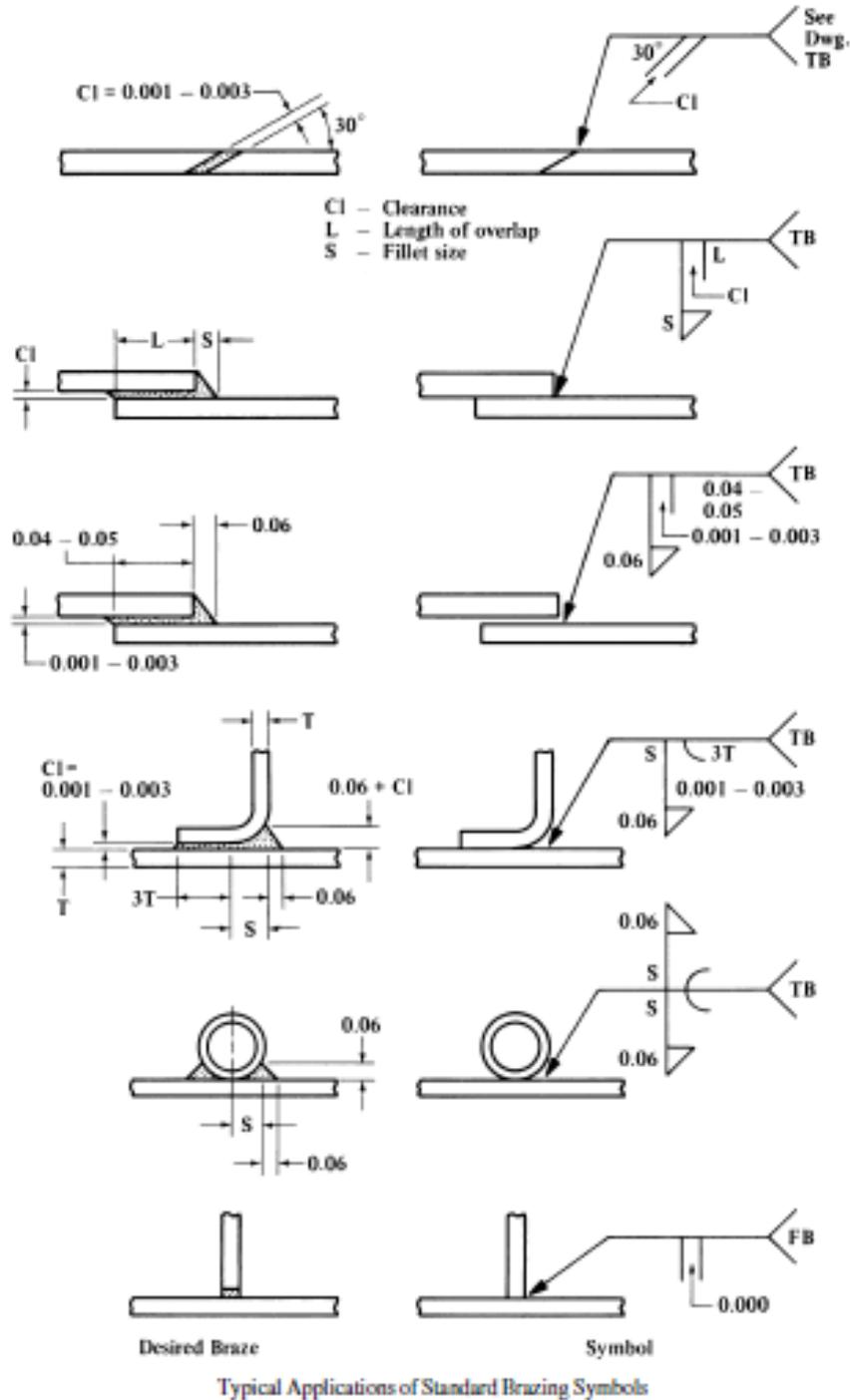


Figura 8-1 Simbología de soldadura

Fuente: (Jones, Horton, Ryffel, & Oberg, 2000)

## 9. ANEXO FOTOS



Figura 9-1 Máquina

Fuente: El autor



Figura 9-2 Probetas

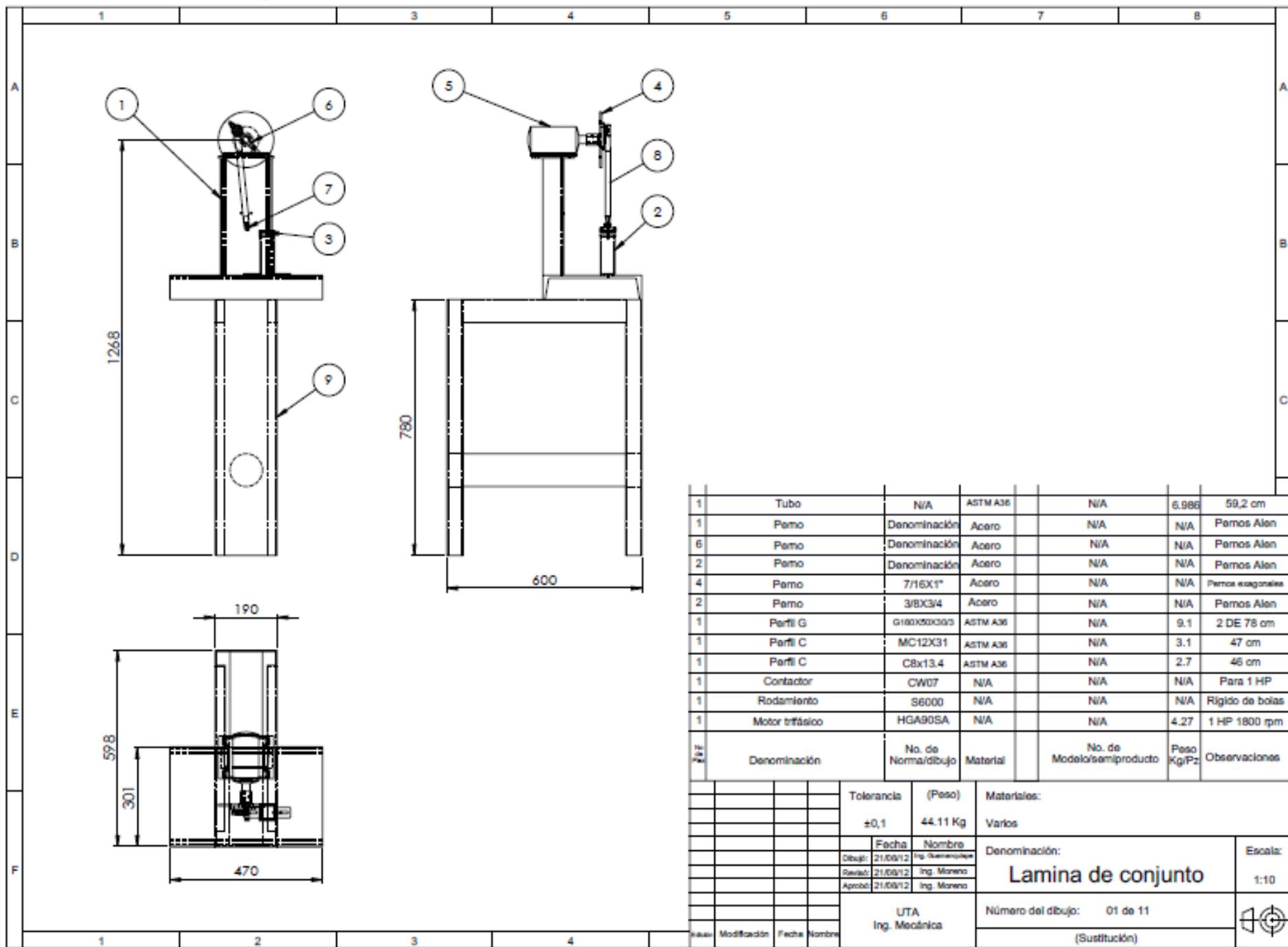
Fuente: El autor

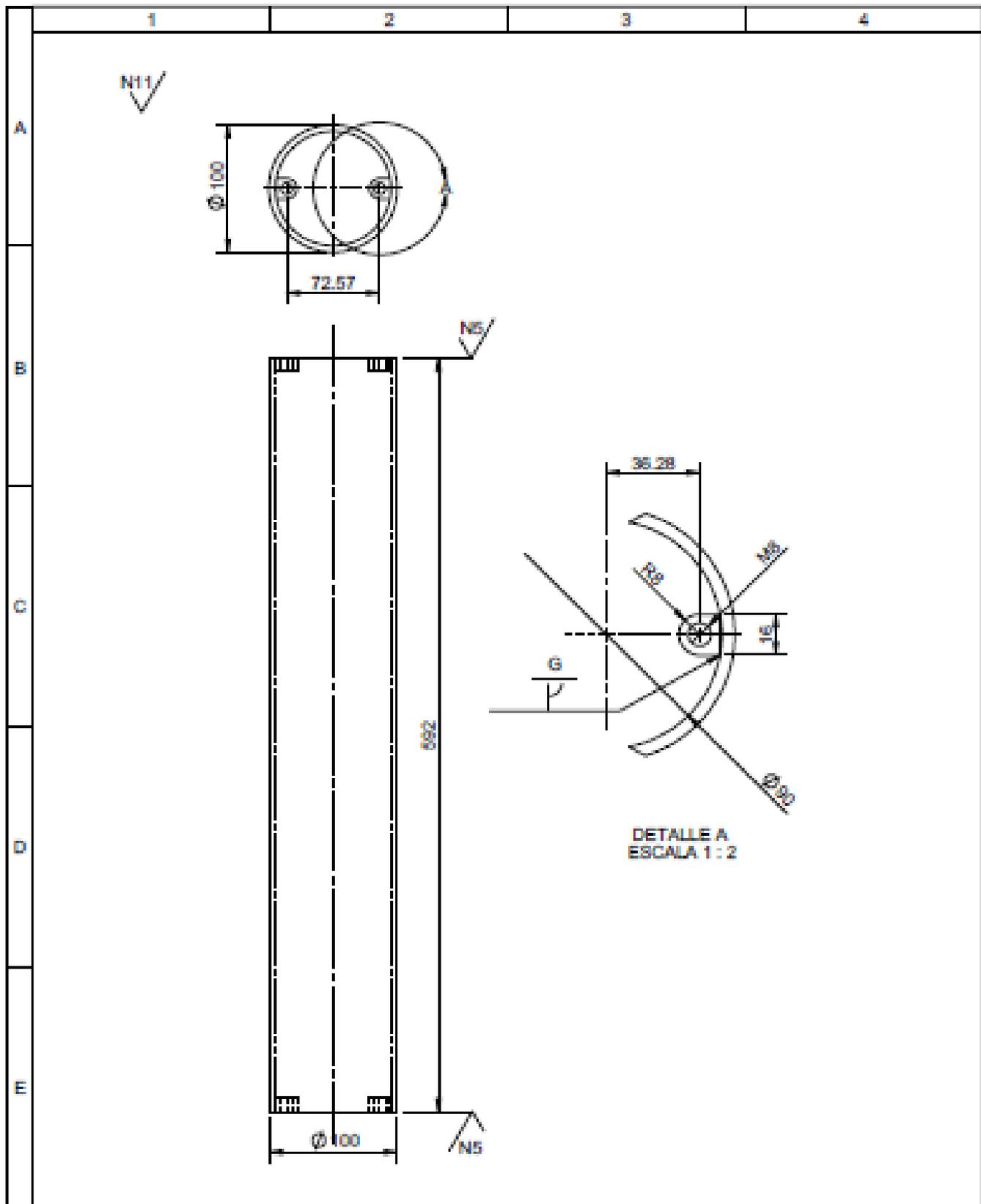


Figura 9-3 Probeta deformada

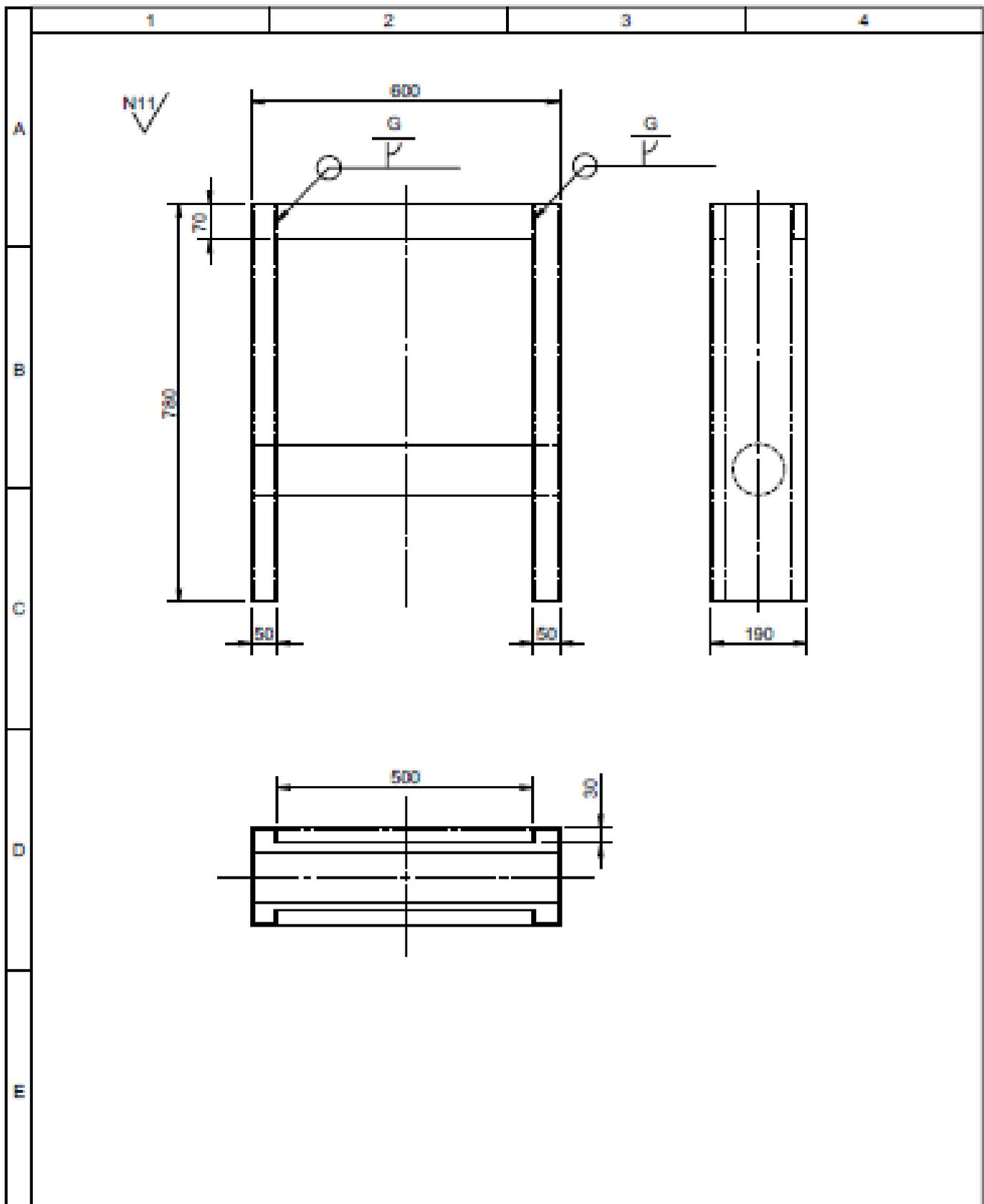
Fuente: El autor

## 10. ANEXO PLANOS

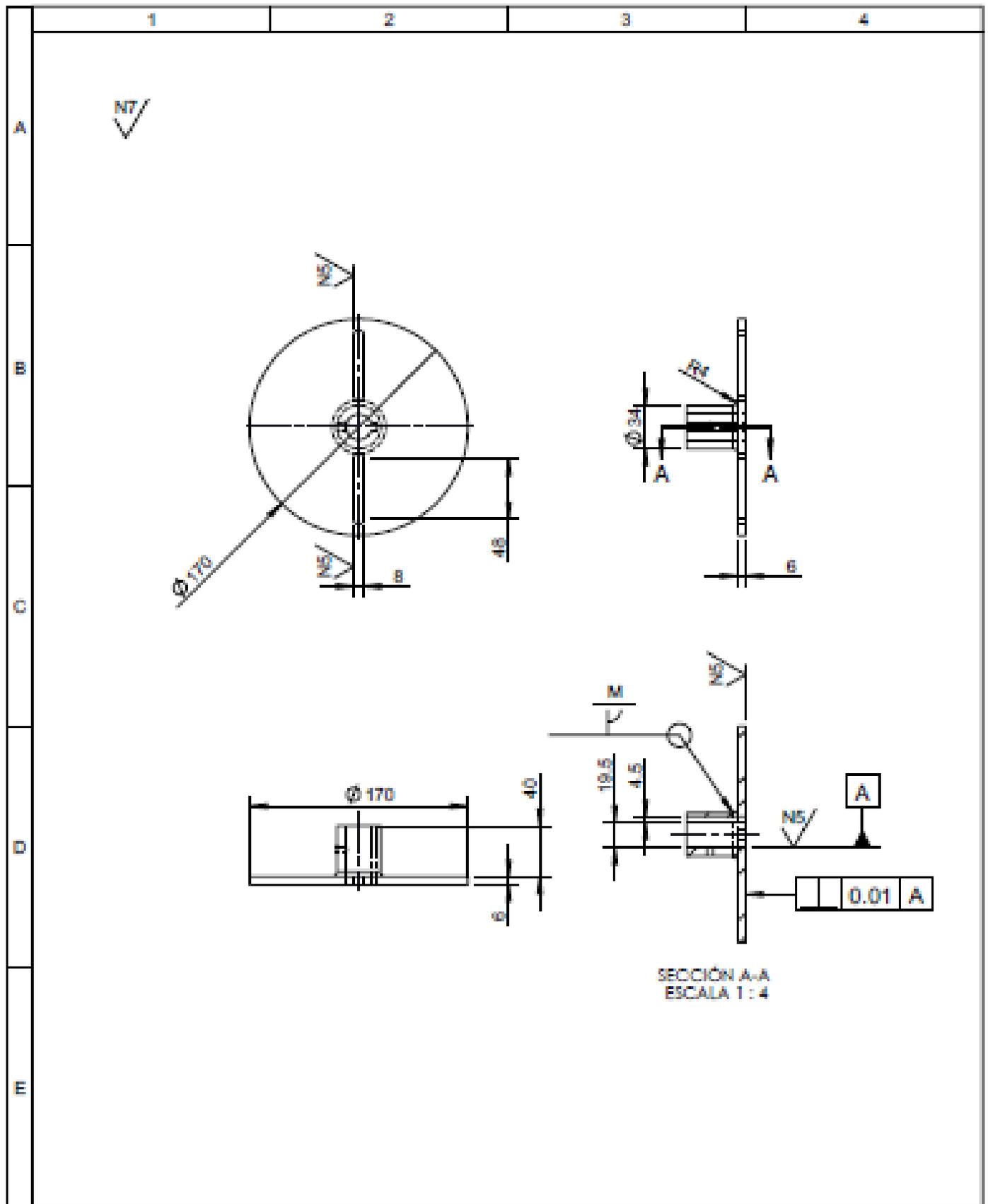




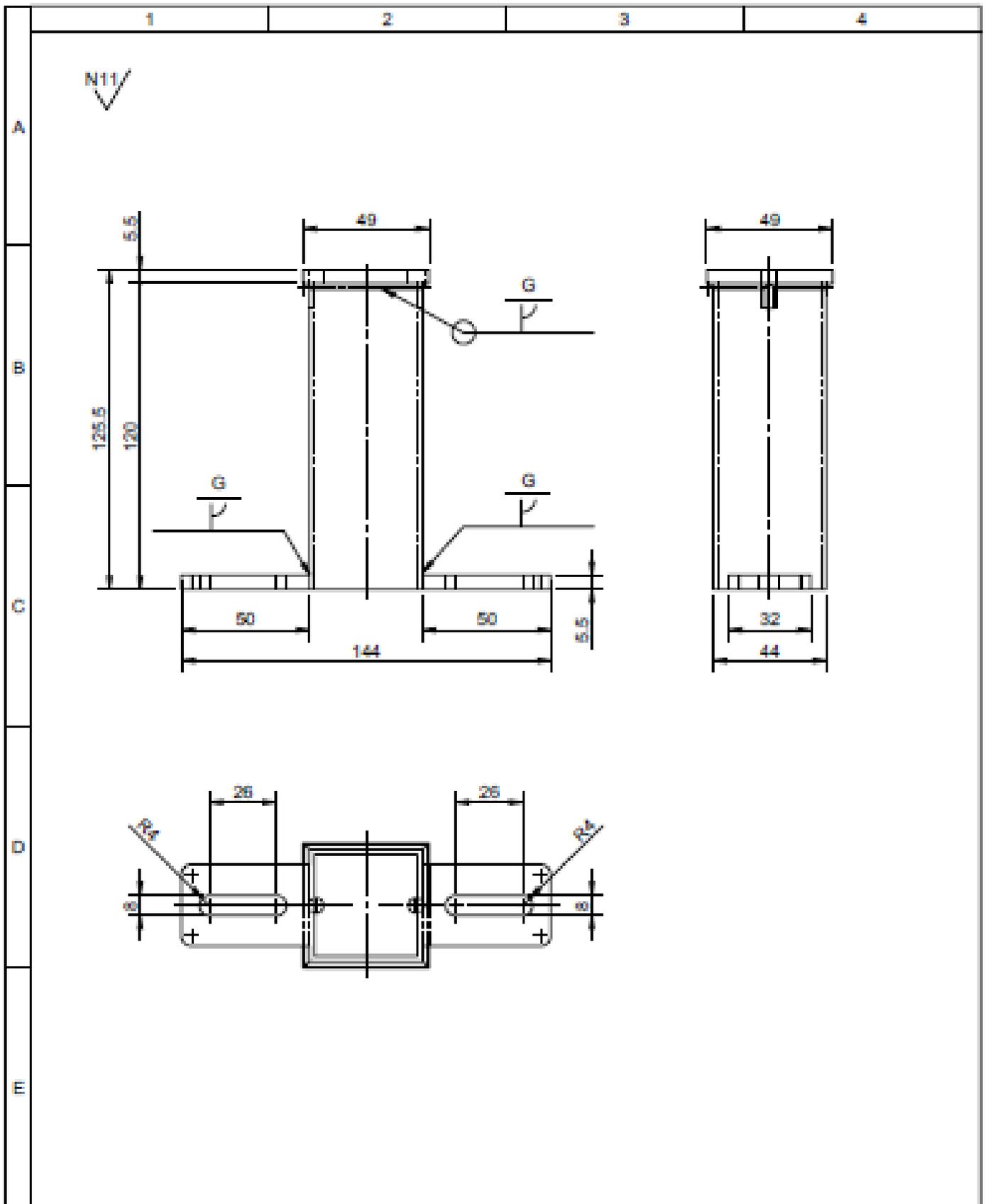
				Tolerancia	(Peso)	Materiales:		
				±0,1	6.986 Kg	Acero ASTM A36		
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:	
			Diseño: 21/08/12	Ing. Ramiro Rojas	<b>TRAVESAÑO</b>			1:4
			Revisó: 21/08/12	Ing. Moreno				
			Aprobó: 21/08/12	Ing. Moreno				
				UTA Ing. Mecánica		Número del dibujo: 02 de 11		
						(Sustitución)		
Revisión	Modificación	Fecha	Nombre					



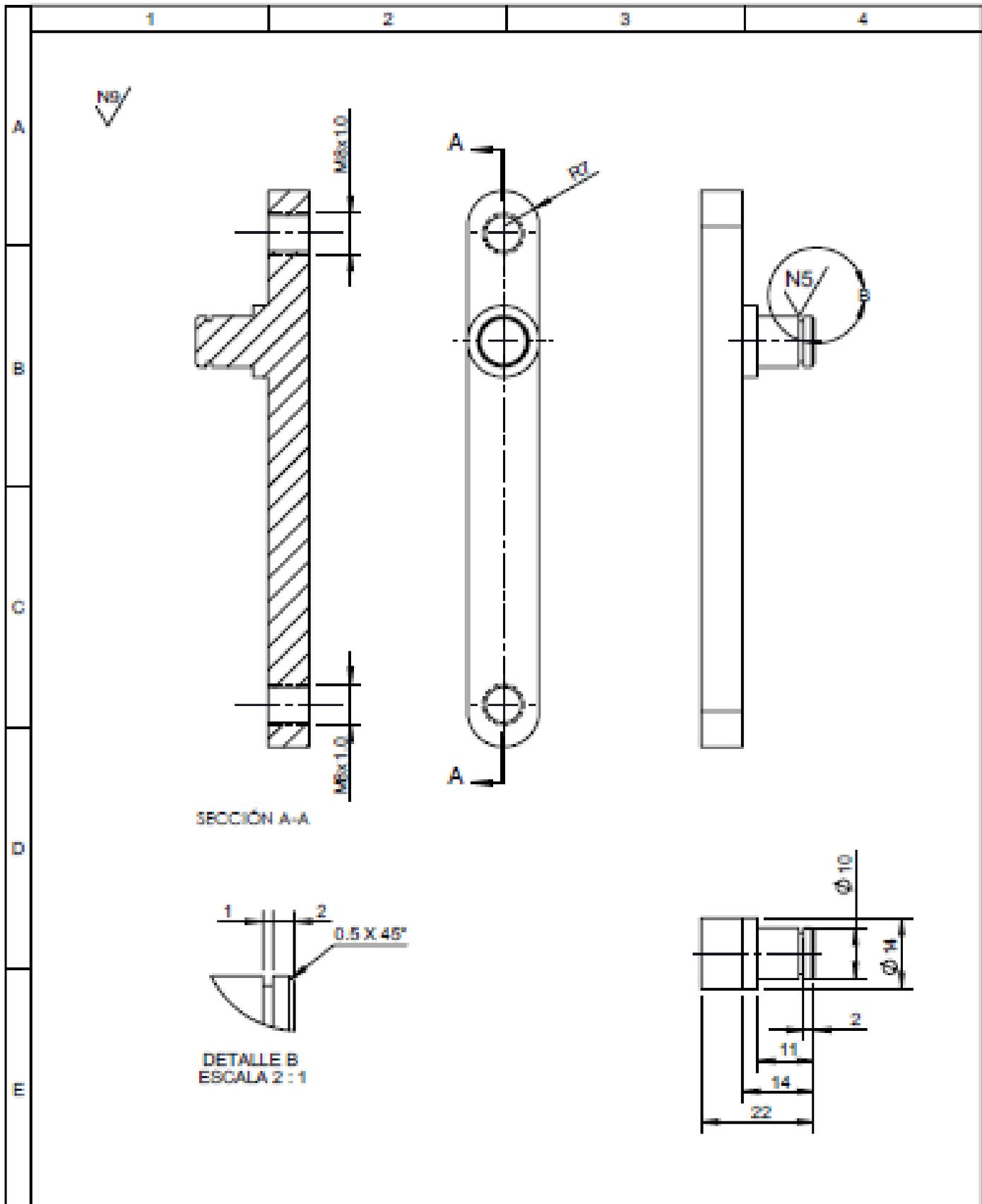
				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				±0,1	19.375 Kg	Acero ASTM A36	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dibujó: 21/08/12	Ing. Hernandez	<b>BANCADA</b>	1:10
				Revisó: 21/08/12	Ing. Moreno		
				Aprobó: 21/08/12	Ing. Moreno		
				UTA Ing. Mecánica		Número del dibujo: 03 de 11	
Revisión	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	



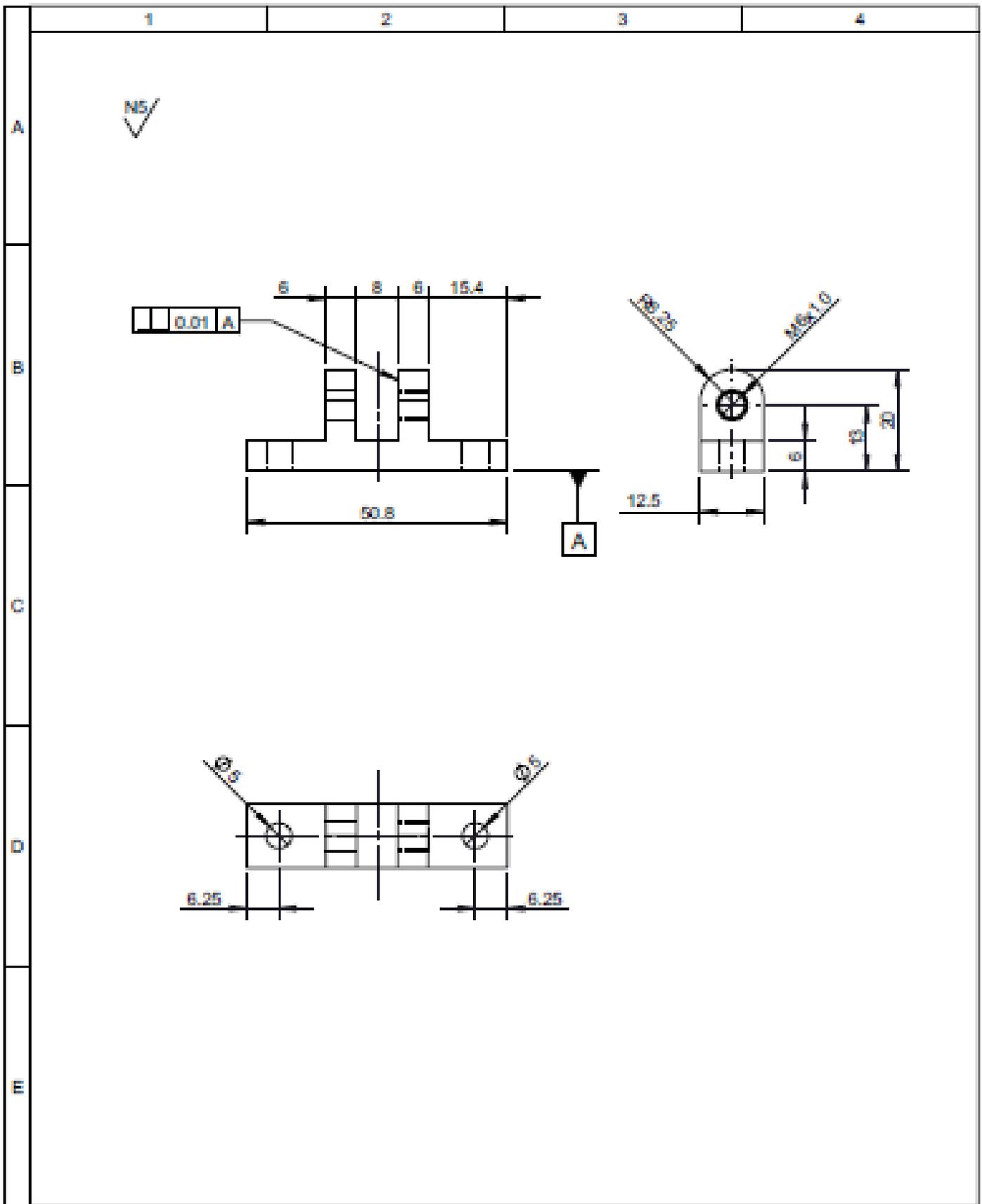
				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				±0,1	1.196 Kg	Acero AISI 1020	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dibujó: 21/08/12	Ing. Germán Rojas	<b>DISCO</b>	1:4
				Revisó: 21/08/12	Ing. Moreno		
				Aprobó: 21/08/12	Ing. Moreno		
				UTA Ing. Mecánica		Número del dibujo: 04 de 11	
Revisó	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	



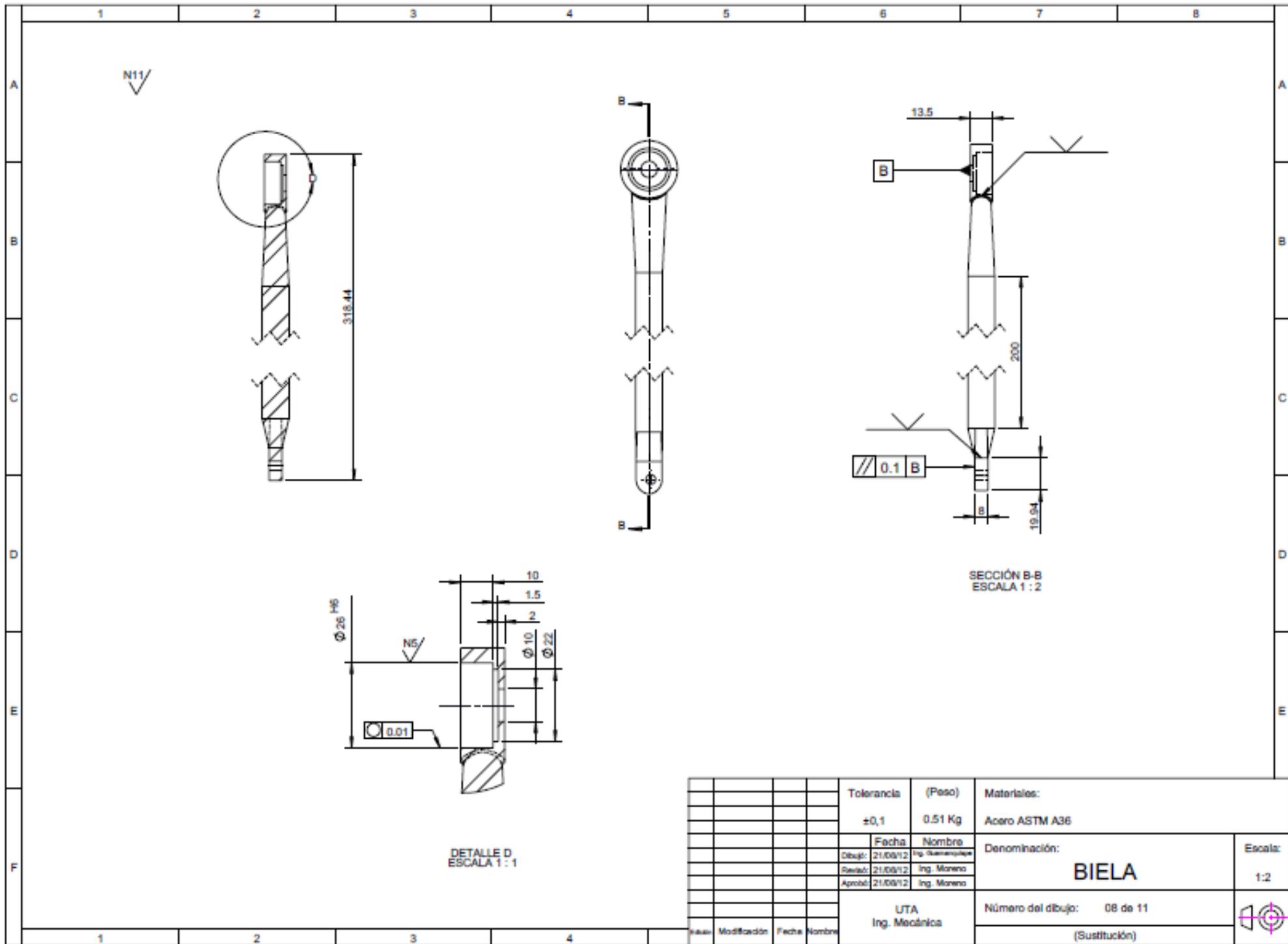
				Tolerancia	(Peso)	Materiales:		
				±0,1	0.532 Kg	Acero ASTM A36		
					Fecha	Nombre	Denominación:	
				Dibujó:	21/08/12	Ing. Guzmanquiza		
				Revisó:	21/08/12	Ing. Moreno		
				Aprobó:	21/08/12	Ing. Moreno	Escala:	
				UTA Ing. Mecánica				1:2
						Número del dibujo:	05 de 11	
						(Sustitución)		
	Modificación	Fecha	Nombre					



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:			
				±0,1	0.098 Kg	Acero AISI 1020			
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:		
			Dibujó:	21/08/12	Ing. Generador			<b>EJE</b>	1:1
			Revisó:	21/08/12	Ing. Moreno				
			Aprobó:	21/08/12	Ing. moreno				
				UTA Ing. Mecánica		Número del dibujo: 08 de 11			
Revisión	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)			



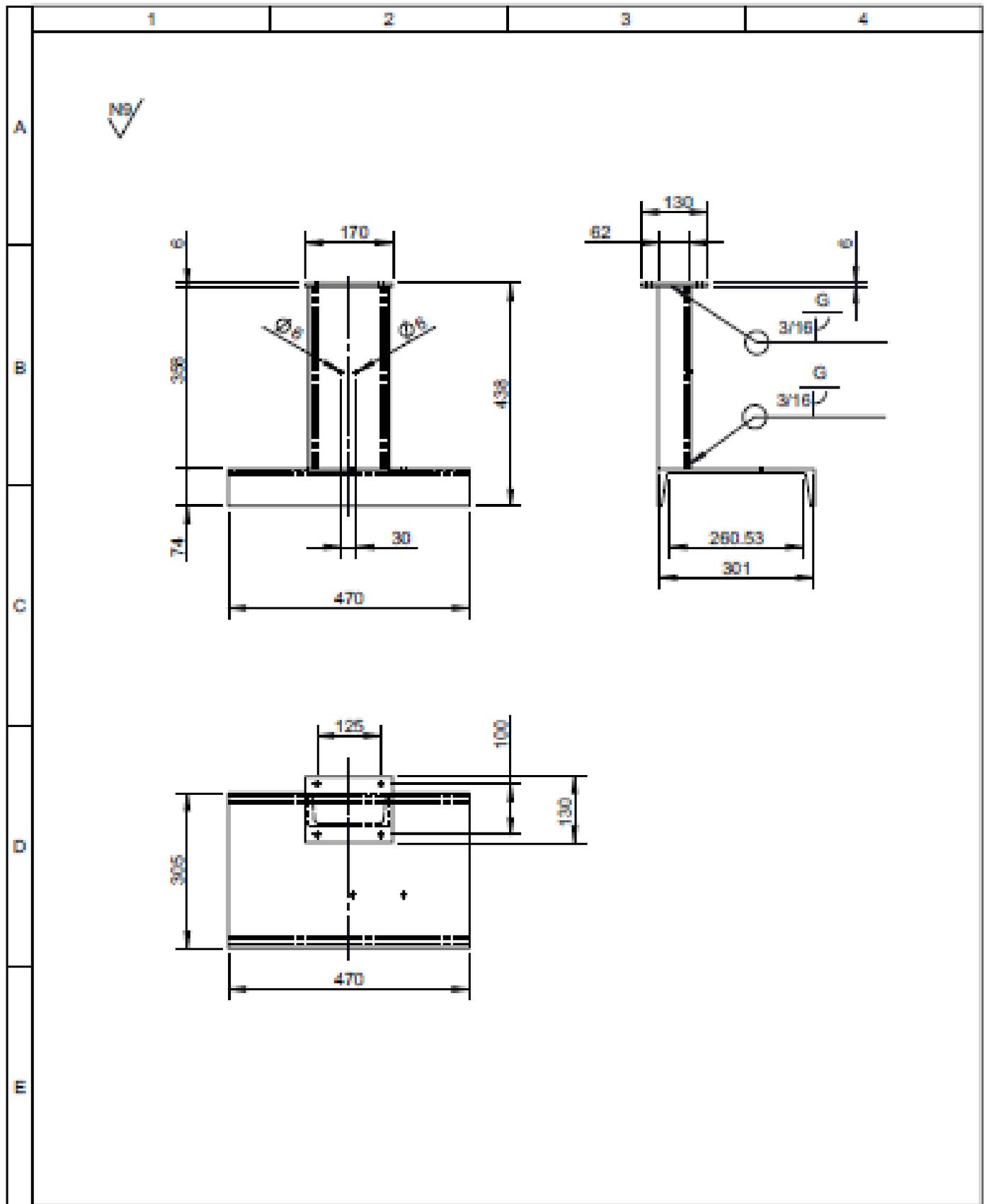
				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				±0,1	10 Kg	Acero NAYLON 310	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
			Dibujó:	22/05/11	Ing. Guillermo López		
			Revisó:	22/05/11	Ing. Moreno		
				Aprobó:	22/05/11	Ing. Moreno	
				UTA Ing. Mecánica		Número del dibujo: 07 de 11	
Revisión	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	



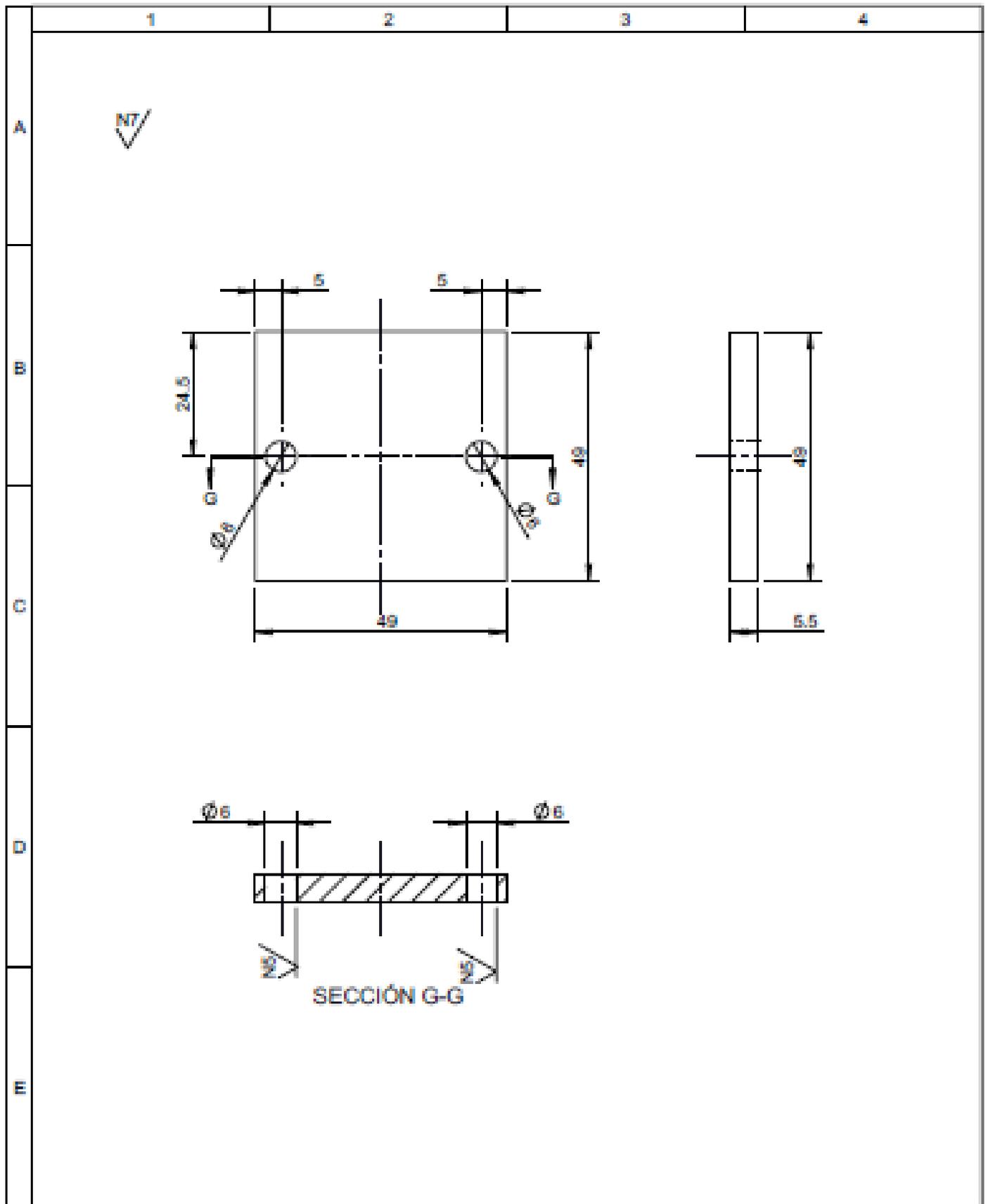
SECCIÓN B-B  
ESCALA 1 : 2

DETALLE D  
ESCALA 1 : 1

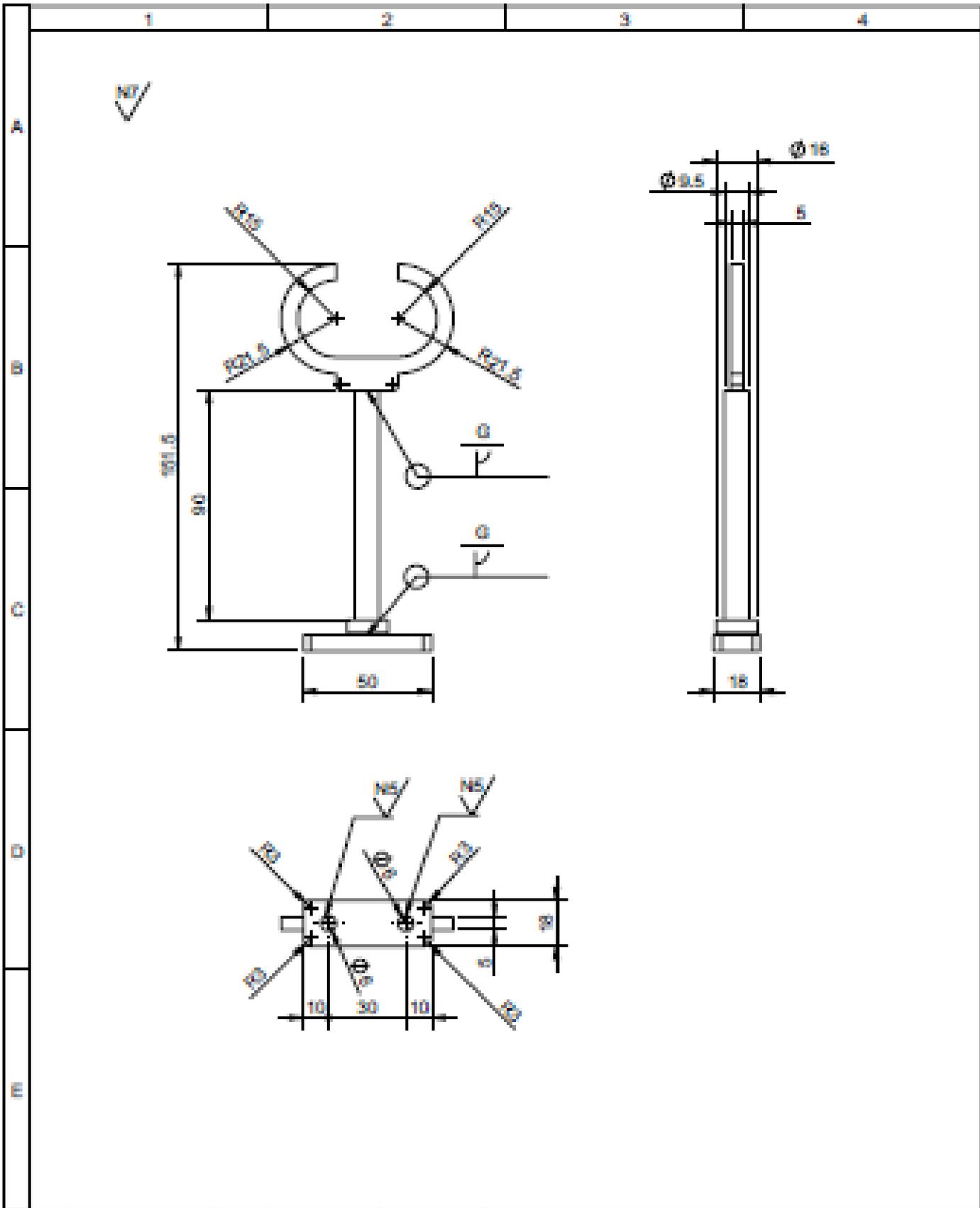
						Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
						±0,1	0.51 Kg	Acero ASTM A36	
						Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
						Dibujó: 21/06/12	Ing. Quinteros	<b>BIELA</b>	1:2
						Revisó: 21/06/12	Ing. Moreno		
						Aprobó: 21/06/12	Ing. Moreno		
						UTA Ing. Mecánica		Número del dibujo: 08 de 11	
							(Sustitución)		



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				±0,1	21.92 Kg	Acero ASTM A36	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dibujó: 21/08/12	Ing. Ramonczyk	<b>BASE</b>	1:10
				Revisó: 21/08/12	Ing. Moreno		
				Aprobó: 21/08/12	Ing. Moreno		
				UTA Ing. Mecánica		Número del dibujo: 09 de 11	
Revisión	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				±0,1	10 Kg	Acero ASTM A36	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dibujó: 21/08/12	Ing. Guzmanojay	<b>PLACA DE SUJECIÓN</b>	1:1
				Revisó: 21/08/12	Ing. Moreno		
				Aprobó: 21/08/12	Ing. Moreno		
				UTA Ing. Mecánica		Número del dibujo: 10 de 11	
Revisión	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	



				Tolerancia	(Peso)	Material(es):	
				±0,1	0.14 Kg	Acero AISI 1020	
					Fecha	Nombre	Denominación:
				Dibujó	21/08/12	Ing. Oramasquez	
				Revisó	21/08/12	Ing. Moreno	
				Aprobó	21/08/12	Ing. Moreno	Escala: 1:2
				UTA Ing. Mecánica		Número del dibujo: 11 de 11	
Revisión	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	