



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL
DURALÓN**

AUTOR: VELÁSQUEZ SALAZAR, FRANCISCO JOSÉ

DIRECTOR: MSC. PÉREZ ROSALES, JOSÉ EMILIO

SANGOLQUÍ



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "**CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL DURALÓN**" fue realizado por el señor **Velásquez Salazar Francisco José** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, septiembre del 2018

Firma:

Ing. José Pérez MSc.

C.C.: 1706481957

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Velásquez Salazar Francisco José**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: "**Caracterización de las Propiedades Mecánicas del Duralón**" es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, septiembre de 2018

Firma:

Francisco José Velásquez Salazar

C.C.: 1724197767



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **Velásquez Salazar Francisco José** autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Caracterización de las Propiedades Mecánicas del Duralón”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, septiembre de 2018

Firma:

Francisco José Velásquez Salazar

C.C.: 1724197767

DEDICATORIA

A mis padres, Gustavo y Verónica, sin su ayuda incondicional nada de esto sería posible.

Francisco

AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecer a Dios, por darme fortaleza y sabiduría durante esta etapa de mi vida, siendo mi guía ayudándome en los momentos en los cuales parecía imposible alcanzar este objetivo.

A mis padres Gustavo y Verónica, por todo el esfuerzo y sacrificio que han hecho por mí para poder darme un mejor futuro.

A los Ingenieros José Pérez y Francisco Navas por todo el tiempo y ayuda prestada durante el presente trabajo.

Finalmente, a mis amigos Diego, Andrés e Irving, por su amistad y apoyo durante toda la Carrera.

Francisco

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
RESUMEN	xxiii
ABSTRACT	xxiv
CAPÍTULO I.....	1
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes.....	3
1.3. Definición del Problema.....	6
1.4. Justificación e Importancia	7
1.5. Área de Influencia	9
1.6. Alcance	9
1.7. Objetivos.....	10
1.7.1. Objetivo General	10
1.7.2. Objetivos Específicos.....	11

2. MARCO TEÓRICO	12
2.1. Duralón (Nylon) - Definición	12
2.2. Polímeros	12
2.2.1. Definición	12
2.2.2. Clasificación	13
2.2.3. Proceso Químico y Reacciones de Polimerización	14
2.2.4. Termoplásticos de Ingeniería	18
2.2.5. Nylon (Duralón)	22
2.3. Máquina de R.R. Moore	36
CAPÍTULO III	39
3. CARACTERIZACIÓN DEL DURALÓN	39
3.1. Ensayos Estáticos	39
3.1.1. Ensayo de Tracción (ASTM D 638)	39
3.1.2. Ensayo de Flexión (ASTM D 790)	65
3.1.3. Ensayo Cortante (ASTM D 732)	85
3.2. Ensayo Dinámico	104
3.2.1. Ensayo de Fatiga	104
CAPÍTULO IV	126
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	126

4.1. Análisis de Resultados Ensayo de Tracción	127
4.1.1. Esfuerzo de Tracción Máximo	127
4.1.2. Esfuerzo de Fluencia	131
4.1.3. Módulo de Elasticidad a Tracción	133
4.1.4. Porcentaje de Elongación	135
4.2. Análisis de Resultados Ensayo de Flexión	138
4.2.1. Esfuerzo de Flexión máximo	138
4.2.2. Esfuerzo límite de proporcionalidad por flexión	141
4.2.3. Módulo de Elasticidad por flexión	144
4.3. Análisis de Resultados Ensayo Cortante	147
4.3.1. Esfuerzo Cortante Máximo	147
4.3.2. Límite de proporcionalidad esfuerzo cortante	150
4.4. Análisis de Resultados Ensayo de Fatiga	152
4.4.1. Curva S-N	152
CAPÍTULO V	158
5. ANÁLISIS ECONÓMICO	158
5.1. Análisis Costos Autofinanciados	158
5.2. Análisis costos financiados por la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE 159	

CAPÍTULO VI	162
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	162
6.1. Conclusiones	162
6.2. Recomendaciones	164
BIBLIOGRAFÍA	167

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Fechas de producción de primeros polímeros.....</i>	2
Tabla 2 <i>Ensayos Mecánicos.</i>	10
Tabla 3 <i>Código y producto de partida para poliamidas industriales.....</i>	23
Tabla 4 <i>Punto de Fusión de algunos tipos de Nylon.</i>	25
Tabla 5 <i>Absorción de Agua de algunos tipos de Nylon.</i>	26
Tabla 6 <i>Propiedades Mecánicas de algunas Poliamidas (DAM).</i>	28
Tabla 7 <i>Propiedades clave para Nylon 6,6 reforzado.....</i>	30
Tabla 8 <i>Puntos de Fusión y Rangos de Procesamiento para Nylons Comerciales.</i>	31
Tabla 9 <i>Aplicaciones Industriales del Nylon.</i>	35
Tabla 10 <i>Especificaciones Máquina de Ensayos Universales.</i>	41
Tabla 11 <i>Especificaciones del Extensómetro MTS.</i>	42
Tabla 12 <i>Especificaciones del Medidor de Deformaciones Unitarias.</i>	43
Tabla 13 <i>Especificaciones calibrador electrónico pie de rey.</i>	47
Tabla 14 <i>Diámetro y Longitud Inicial – muestras ensayo de tracción.</i>	47
Tabla 15 <i>Valores de deformación - ensayo de tracción.....</i>	49

Tabla 16 <i>Diámetro y Longitud final – muestras ensayo de tracción.....</i>	50
Tabla 17 <i>Esfuerzo de Tracción Máximo.....</i>	53
Tabla 18 <i>Esfuerzo de Fluencia a Tracción.....</i>	59
Tabla 19 <i>Porcentaje de Elongación - ensayo de tracción.....</i>	60
Tabla 20 <i>Módulo de Elasticidad a la Tracción.....</i>	63
Tabla 21 <i>Deformación unitaria y esfuerzo aplicado con diferentes cargas.....</i>	64
Tabla 22 <i>Especificaciones Máquina de Ensayos Universales MTS.....</i>	67
Tabla 23 <i>Ancho y espesor - muestras de flexión.....</i>	70
Tabla 24 <i>Esfuerzo Máximo de Flexión.....</i>	75
Tabla 25 <i>Esfuerzo Límite de Proporcionalidad a Flexión.....</i>	82
Tabla 26 <i>Módulo de Elasticidad a Flexión.....</i>	84
Tabla 27 <i>Especificaciones Micrómetro Mitutoyo.....</i>	92
Tabla 28 <i>Espesor de las muestras para Ensayo Cortante.....</i>	93
Tabla 29 <i>Fuerza Máxima - Ensayo Cortante.....</i>	95
Tabla 30 <i>Resultados Ensayo Cortante.....</i>	96
Tabla 31 <i>Esfuerzo cortante correspondiente al límite de proporcionalidad.....</i>	103

Tabla 32 <i>Especificaciones técnicas - Máquina de Fatiga.</i>	107
Tabla 33 <i>Número de muestras de acuerdo al tipo de prueba.</i>	109
Tabla 34 <i>Porcentaje de replicación de acuerdo al tipo de prueba.</i>	110
Tabla 35 <i>Dimensiones de la Máquina de Moore.</i>	114
Tabla 36 <i>Diámetro de las muestras de Fatiga.</i>	117
Tabla 37 <i>Valores obtenidos ensayo de Fatiga con soporte.</i>	119
Tabla 38 <i>Datos Ensayo de Fatiga.</i>	120
Tabla 39 <i>Resultados Ensayo de Fatiga.</i>	123
Tabla 40 <i>Reporte de esfuerzos y número de ciclos para fallo térmico.</i>	125
Tabla 41 <i>Datos esfuerzo de tracción máximo.</i>	127
Tabla 42 <i>Resultados del Esfuerzo Máximo a Tracción.</i>	130
Tabla 43 <i>Esfuerzo Máximo a Tracción - Varias fuentes.</i>	130
Tabla 44 <i>Datos esfuerzo de fluencia a tracción.</i>	131
Tabla 45 <i>Resultados del Esfuerzo de Fluencia a Tracción.</i>	132
Tabla 46 <i>Datos Módulo de elasticidad a tracción.</i>	133
Tabla 47 <i>Resultados del Módulo de Elasticidad a Tracción.</i>	134

Tabla 48 <i>Módulo de Elasticidad a Tracción - Varias fuentes.</i>	135
Tabla 49 <i>Datos porcentaje de elongación a tracción.</i>	135
Tabla 50 <i>Resultados del Porcentaje de Elongación a Tracción.</i>	137
Tabla 51 <i>Porcentaje de Elongación a Tracción.</i>	138
Tabla 52 <i>Datos esfuerzo de flexión máximo.</i>	138
Tabla 53 <i>Resultados del Esfuerzo Máximo a Flexión.</i>	141
Tabla 54 <i>Esfuerzo máximo a Flexión.</i>	141
Tabla 55 <i>Datos esfuerzo límite de proporcionalidad a flexión.</i>	141
Tabla 56 <i>Resultados del Esfuerzo Límite de proporcionalidad a Flexión.</i>	143
Tabla 57 <i>Datos módulo de elasticidad a flexión.</i>	144
Tabla 58 <i>Resultados del Módulo de Elasticidad a Flexión.</i>	145
Tabla 59 <i>Módulo de Elasticidad a Flexión - Varias fuentes.</i>	146
Tabla 60 <i>Datos esfuerzo cortante máximo.</i>	147
Tabla 61 <i>Resultados del Esfuerzo Máximo Cortante.</i>	149
Tabla 62 <i>Esfuerzo Cortante Máximo.</i>	150
Tabla 63 <i>Datos límite de proporcionalidad esfuerzo cortante.</i>	150

Tabla 64 <i>Resultado del Esfuerzo Límite de Proporcionalidad Cortante</i>	152
Tabla 65 <i>Datos para curva S-N</i>	152
Tabla 66 <i>Datos fatiga S-N (falla térmica)</i>	153
Tabla 67 <i>Log Si – Log Yi</i>	155
Tabla 68 <i>Datos S-N (función exponencial)</i>	156
Tabla 69 <i>Costos Autofinanciados</i>	158
Tabla 70 <i>Costos Financiados por UFA - ESPE</i>	160

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Balance comercial de la Producción Textil (millones de dólares).....	6
Figura 2. Comparación de las tres clases de polímeros.	13
Figura 3. Polimerización en cadena Nylon 6.....	17
Figura 4. Polimerización por condensación del Nylon 6,6.....	18
Figura 5. Propiedades de termoplásticos de ingeniería.	19
Figura 6. Clasificación de las Poliamidas.....	20
Figura 7. Enlace amida.....	22
Figura 8. Representación esquemática del enlace de hidrógeno entre dos cadenas moleculares.	24
Figura 9. Nylon 9,6 con esferulitas, desarrollada a 210°C.	24
Figura 10. Comparativa de la cristalización de un polímero con/sin agente nucleante.	29
Figura 11. Anuncio de medias nylon en Los Ángeles, California.	33
Figura 12. Rodamiento de nylon.....	35
Figura 13. Esquema de lo elementos de la máquina de Moore.	37
Figura 14. Mordazas y probeta para ensayo de tracción.	40

Figura 15. Máquina de Ensayos Universales AMSLER.	41
Figura 16. Extensómetro MTS.	42
Figura 17. Medidor de Deformaciones Unitarias.	43
Figura 18. Característica estática del Extensómetro MTS.	44
Figura 19. Dimensiones muestras Ensayo de Tracción – norma ASTM D-638.	45
Figura 20. Muestras Ensayo de Tracción.	46
Figura 21. Conjunto montado para ensayo de tracción.	48
Figura 22. Diagramas esfuerzo de ingeniería – def. unitaria, ensayos de tracción muestras 1-3. ..	54
Figura 23. Diagramas esfuerzo de ingeniería – def. unitaria, ensayos de tracción muestras 4-6. ..	55
Figura 24. Diagramas esfuerzo de ingeniería – def. unitaria, ensayos de tracción muestras 7-9. ..	56
Figura 25. Diagramas esfuerzo de ingeniería – def. unitaria, ensayos de tracción muestras 10-12.	57

Figura 26.

Diagramas esfuerzo de ingeniería – def. unitaria, ensayos de tracción muestras 13-15.	58
Figura 27. Diagrama esfuerzo - deformación en la zona elástica para muestra 1.....	62
Figura 28. Fuerzas implicadas en los Ensayos de Flexión.....	65
Figura 29. Máquina de Ensayos Universales MTS.	66
Figura 30. Soporte y Punzón para ensayo de flexión.....	67
Figura 31. Dimensiones muestras Ensayo de Flexión.	69
Figura 32. Muestras para Ensayo de Flexión.....	69
Figura 33. Calibración de la celda de carga de la máquina.....	72
Figura 34. Muestra antes y después de la prueba.	72
Figura 35. Diagrama esfuerzo – desplazamiento ensayo de flexión, muestra 1-3.	76
Figura 36. Diagrama esfuerzo – desplazamiento ensayo de flexión, muestra 4-6.	77
Figura 37. Diagrama esfuerzo – desplazamiento ensayo de flexión, muestra 7-9.	78
Figura 38. Diagrama esfuerzo – desplazamiento ensayo de flexión, muestra 10-12. ...	79
Figura 39. Diagrama esfuerzo – desplazamiento ensayo de flexión, muestra 13-15. ...	80
Figura 40. Análisis esfuerzo - desplazamiento para la muestra 1.	81

Figura 41. Diagrama Fuerza – Desplazamiento inicial para la muestra 1.	83
Figura 42. Matriz superior.....	87
Figura 43. Guías Matriz Superior.....	87
Figura 44. Montaje de guías en matriz superior.....	88
Figura 45. Matriz Inferior.....	88
Figura 46. Anillo para matriz inferior.	89
Figura 47. Matriz Inferior rectificada.	90
Figura 48. Punzón.	90
Figura 49. Dimensiones muestras para ensayo cortante.	91
Figura 50. Matrices y punzón ensamblado.	93
Figura 51. Ensayo Cortante.....	94
Figura 52. Diagrama esfuerzo – desplazamiento ensayo cortante, muestra 1-2.....	97
Figura 53. Diagrama esfuerzo – desplazamiento ensayo cortante, muestra 3-5.....	98
Figura 54. Diagrama esfuerzo – desplazamiento ensayo cortante, muestra 6-8.....	99
Figura 55. Diagrama esfuerzo – desplazamiento ensayo cortante, muestra 9-11.....	100
Figura 56. Diagrama esfuerzo – desplazamiento ensayo cortante, muestra 12-14.	101

Figura 57. Diagrama esfuerzo – desplazamiento ensayo cortante, muestra 15.	102
Figura 58. Diagrama esfuerzo cortante - desplazamiento.....	103
Figura 59.	
Máquina de R.R. Moore - Laboratorio de Mecánica de Materiales UFA - ESPE.	106
Figura 60. Dimensiones para muestras del Ensayo de Fatiga.	109
Figura 61. Muestras Ensayo de Fatiga.	111
Figura 62. Diagrama de cuerpo libre para la Máquina de Moore.	113
Figura 63. Diagrama fuerza cortante para el sistema.	115
Figura 64. Diagrama momento flector para el sistema.....	116
Figura 65. Ensayo de Fatiga con soporte de precarga.	119
Figura 66. Ejemplo de simulación realizada en CAE.	122
Figura 67. Muestras ensayo de fatiga, fallo por deformación y por rotura.	125
Figura 68. Curvas típicas esfuerzo/deformación, Ensayo de Tracción.....	127
Figura 69. Diagrama esfuerzo de ingeniería - deformación unitaria muestras 1-15. ...	128
Figura 70.	
Distribuciones de Probabilidad para los datos de Esfuerzo Máximo a Tracción.	129
Figura 71. Distribución Log-Logística para datos de Esfuerzo Máximo a Tracción.	129

Figura 72.

Distribuciones de Probabilidad para los datos de Esfuerzo de Fluencia a Tracción. ... 131

Figura 73. Distribución Weibull para datos de Esfuerzo de Fluencia a Tracción. 132

Figura 74.

Distribuciones de Probabilidad para los datos de Módulo de Elasticidad a Tracción. .. 133

Figura 75. Distribución Log-Logística para datos de Módulo de Elasticidad a Tracción.
..... 134

Figura 76.

Distribuciones de Probabilidad para los datos de Porcentaje de Elongación a Tracción.
..... 136

Figura 77. Distribución Log-Normal para datos de Porcentaje de Elongación a Tracción.
..... 137

Figura 78. Diagrama esfuerzo - desplazamiento - Muestras 1-15..... 139

Figura 79. Distribuciones de Probabilidad para los datos de Esfuerzo Máximo a Flexión.
..... 139

Figura 80. Distribución Log-Logística para datos de Esfuerzo Máximo a Flexión. 140

Figura 81.

Distribuciones de Probabilidad para datos del Límite de proporcionalidad a Flexión. .. 142

Figura 82.

Distribución Log-Logística para datos de Esfuerzo Límite de Proporcionalidad..... 143

Figura 83.

Distribuciones de Probabilidad para los datos del Módulo de Elasticidad a Flexión. ... 144

Figura 84. Distribución Log-Logística para datos del Módulo de Elasticidad a Flexión.

..... 145

Figura 85. Diagrama esfuerzo - desplazamiento, muestras 1-15..... 147**Figura 86.** Distribuciones de Probabilidad para los datos de Esfuerzo Máximo Cortante.

..... 148

Figura 87. Distribución Log-Logística para datos de Esfuerzo Máximo Cortante. 149**Figura 88.**

Distribuciones de Probabilidad para los datos de Límite de Proporcionalidad Cortante.

..... 151

Figura 89.

Distribución Log-Logística para datos de Esfuerzo Límite de Proporcionalidad Cortante.

..... 151

Figura 90. Diagrama S-N Ensayo de Fatiga. 153**Figura 91.** Curva S-N ensayo de fatiga por flexión rotativa. (Minitab) 157

Figura 92. Curva S-N ensayo de fatiga por flexión rotativa. (Excel)157

RESUMEN

El Duralón es un polímero termoplástico cuyas propiedades físicas y mecánicas hacen que sea uno de los materiales poliméricos con mayor uso dentro de la industria de la manufactura, por ello en el presente trabajo se realizó la caracterización de las propiedades mecánicas por medio de ensayos estáticos y dinámicos, mediante el empleo de 15 muestras para cada prueba con el fin de obtener los valores principales de cada ensayo. Para esto se realizó las pruebas de tracción, flexión y corte de acuerdo a las normas ASTM D-638, D-790 y D-732 respectivamente. Se utilizó dichas normas para determinar el tipo de nylon con el que se trabajó, además para verificar si el material cumple o no con los valores recomendados por otras fuentes. Además, debido a su alto uso en piezas móviles como engranajes, levas, rodamientos, etc, fue importante realizar el ensayo de fatiga utilizando la máquina de Moore. Al no existir una norma que sirva de referencia para ensayar a materiales poliméricos sometidos a fatiga por flexión rotativa, se utilizó la norma ASTM E-466 la cual ayudó como guía solo en ciertos parámetros debido a que este estándar está hecho para materiales metálicos. Finalmente, el análisis de los datos de dispersión obtenidos durante el ensayo de fatiga se lo realizó con la norma ASTM E-739, para poder graficar el diagrama S-N con el cual se pudo realizar una caracterización del comportamiento del duralón bajo cargas cíclicas – fatiga, útil para un correcto diseño de elementos para máquinas sometidos a fatiga por flexión rotativa.

PALABRAS CLAVES:

- DURALÓN
- NYLON
- PROPIEDADES MECÁNICAS
- FATIGA MÁQUINA DE MOORE

ABSTRACT

Duralon is a thermoplastic polymer whose physical and mechanical properties make it one of the most widely used polymeric materials in the manufacturing industry, for this reason, in the present work, the characterization of the mechanical properties was carried out by means of static and dynamic tests, in order to obtain the main values it was use 15 samples for each test. For this, tensile, flexural and shear tests were carried out according to ASTM D-638, D-790 and D-732 respectively, these standards were used to determine the type of nylon with which it was worked, in addition to verify if the material meets or not with the values recommended by other sources. Also, due to its high use in moving parts such as gears, cams, bearings, etc., it was important to perform the fatigue test using Moore's machine. In the absence of a standard that serves as a reference for testing polymeric materials subjected to rotating flexural fatigue, the ASTM E-466 standard was used which helped as a guide in certain parameters because this standard is made for metallic materials. Finally, the dispersion data analysis obtained during the fatigue test was done with the ASTM E-739 standard, to determine the diagram S-N with which a characterization of the behavior of the duralon could be made under cyclic loads - fatigue, useful for a correct design of elements for machines subjected to fatigue by rotating flexural.

KEYWORDS:

- DURALON
- NYLON
- MECHANICAL PROPERTIES
- FATIGUE MACHINE OF MOORE

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1. Introducción

Los plásticos son los primeros materiales sintéticos creados por el hombre, sus indicios datan del siglo XIX; para el año 1820 Thomas Hancock descubrió el caucho al triturar y mezclar goma cruda, años después Charles Goodyear en 1839 accidentalmente transformó el caucho crudo en un material resistente y elástico mediante el proceso denominado “Vulcanización”, el mismo que fue utilizado posteriormente para la fabricación de neumáticos en la industria automovilística.

En el año 1909 el químico Leo Hendrick Baekeland sintetizó un polímero a partir de moléculas de fenol y formaldehído que se denominó “Baquelita”, siendo este el primer plástico totalmente sintético de la historia, cuyas propiedades lo hicieron un material de alto nivel comercial.

A pesar de la importancia que tuvieron los materiales sintéticos desde sus primeras apariciones no fue hasta el año de 1922 cuando el científico Herman Staudinger dio una primera explicación racional del proceso de polimerización, casi un siglo después del descubrimiento de dicho proceso.

Tabla 1*Fechas de producción de primeros polímeros.*

1909	Baquelita	USA
1927	Plexiglás	Alemania
1930	Poliestireno	Alemania
1931	Polivinilo	Alemania
1937	Polietileno Bd	Inglaterra
1941	Nylon	USA
1942	Siliconas	USA
1942	Poliéster	USA
1943	Teflon	USA
1947	Epoxi	Suiza
1953	Acetales	USA
1955	Polietileno Ad	Alemania
1957	Polipropileno	Italia
1957	Policarbonatos	USA

Fuente: Luis Bilurbina, 1990

Después de 1956 la producción de los tres principales polímeros: polivinilo, polietileno y el poliestireno sobrepasó la producción de los principales metales no férreos. (Luis Bilurbina, 1990)

En la Tabla 1 se puede observar las fechas de producción de los principales polímeros dentro de los cuales se encuentra en nylon.

En la actualidad el uso de plásticos va más allá de la producción y comercialización de polímeros clásicos, a medida que va progresando la tecnología aparecen nuevos polímeros resultado de investigaciones científicas de todo el mundo.

Ahora existen más de 40 diferentes tipos de polímeros sin contar con los elastómeros, de los cuales para cada uno puede haber hasta 50 composiciones distintas o grados con pequeñas diferencias en sus propiedades.

Entre los plásticos más utilizados se encuentran los denominados "Polímeros de Ingeniería", dentro de esta familia destacan principalmente las poliamidas alifáticas conocidas como Nylons o Duralón considerados como uno de los polímeros técnicos más

versátiles y con mayores posibilidades de aplicación debido a sus excelentes características que los hacen materiales irremplazables en la construcción de elementos de máquinas y mecanismos.

1.2. Antecedentes

En el Ecuador no se ha realizado investigaciones o trabajos acerca de la caracterización de las propiedades mecánicas del duralón mediante el uso de ensayos estáticos, únicamente se ha realizado ensayos dinámicos específicamente de fatiga.

Como es el caso de la investigación de Jorge Guamanquispe realizado en la Universidad Técnica de Ambato, en el cual se estudia el comportamiento a fatiga mecánica del Nylon y del Teflón, utilizando muestras empotradas como vigas en cantiléver aplicando la norma ASTM D-671, todo esto debido al interés que se presenta y la manera en la que afectan las cargas variables en dichos materiales, en su uso como elementos de máquinas.

En dicho estudio se obtiene las curvas esfuerzo – número de ciclos (S-N) también llamadas curvas de Wöhler, además de determinar la influencia que tiene la temperatura en la relación (S-N), el autor después de obtener las gráficas mencionadas, concluye que el nylon es un material recomendado para utilizarse como elemento de máquina a diferencia del teflón el cual no es recomendado debido a que los valores de esfuerzos que soporta son demasiado bajos.

También concluye que la temperatura es un parámetro que afecta directamente a la resistencia de fatiga, esto debido a la dificultad que tienen los plásticos de disipar el calor generado durante los ensayos. (Guamanquispe, 2012)

Así como en el estudio de J. Guamanquispe, existen más trabajos que se centran en la importancia que tiene el aumento de la temperatura con el desempeño a fatiga, como es el realizado por M.G. Wyzgoski, G.E. Novak, D.L. Simon para la revista *Journal of Materials Science*.

Su trabajo denominado "Fatigue fracture of nylon polymers", tuvo como propósito determinar el efecto de la frecuencia sobre la tasa de propagación de las grietas específicamente, era de interés investigar cuando el calentamiento por histéresis no se producía.

Los resultados que consiguieron fueron al trabajar con nylon 6 (identificado como XPN 1033) y nylon 66 (identificado como Zytel 122L), ambos materiales obtenidos por moldeo en seco.

Al final los autores concluyen que existe una fuerte dependencia entre la frecuencia y la velocidad de propagación de las grietas siendo esta tasa de propagación mayor a frecuencias bajas, inferiores a (1,0 Hz). También observaron que cuando se produce calentamiento por histéresis, provoca que durante la propagación de la grieta aparezcan fracturas incluso a frecuencias cíclicas relativamente bajas (5,0 Hz). (M.G. Wyzgoski, G.E. Novak, D.L. Simon, 1990)

Actualmente la mayoría de investigaciones realizadas con Poliamidas son las orientadas a la síntesis y caracterización de los Nylons modificados (materiales

compuestos), debido a la relativa facilidad que tienen dichos materiales a ser modificados y por las mejoras que puede adquirir en las diferentes propiedades mecánicas.

Como ejemplo se mencionará la investigación publicada por la revista *Journal of Materials Research* denominada "Mechanical properties of nylon 6-clay hybrid", en la cual los autores sintetizan dos materiales compuestos, estos están formados por Nylon 6 y capas de silicato de montmorillonita y saponita, (NCH y NCHP), respectivamente.

Para estimar las propiedades mecánicas de dichos materiales, se llevaron a cabo pruebas de tracción, flexión, impacto Charpy e Izod y distorsión térmica, para finalmente comparar con propiedades del Nylon 6 utilizado como referencia.

Se observó que ambos materiales tuvieron una mejora tanto en la resistencia, como en el módulo de elasticidad en los ensayos de tracción y flexión, además hubo un aumento en la temperatura de distorsión térmica, sin embargo, las propiedades de resistencia al impacto disminuyeron.

También se observó una diferencia entre los valores obtenidos de ambos materiales siendo menor las de NCHP llegando a la conclusión que la saponita tiene un menor efecto sobre dichas propiedades mecánicas que la montmorillonita.

Finalmente, los autores concluyen que la resistencia, el módulo y la temperatura de distorsión térmica aumentan a medida que se incrementa la longitud y el contenido de las capas de silicato. (Yoshitsugu Kojima, Arimitsu Usuki, Masaya Kawasumi, Akane Okada, Yoshiaki Fukushima, Toshio Kurauchi, Osami Kamigaito., 1993)

1.3. Definición del Problema

Como se mencionó anteriormente, en el Ecuador no existen estudios relacionados con la caracterización de las propiedades mecánicas del Duralón, esto se debe principalmente a que dicho material es fabricado y utilizado únicamente por y para las industrias textiles.

Siendo este material una de las fibras más importantes para el sector textil, junto con el poliéster, algodón, seda y lana, la producción de dichos materiales no es suficiente para abastecer a la necesidad del mercado local, por ello las empresas son obligadas a importarlas.

Muestra de esto es el desbalance comercial que existe entre las importaciones de las principales fibras y las exportaciones de productos textiles ya terminados, cuyas cifras en promedio para el año 2014 ascendieron a más de 670 millones de dólares, y el pronóstico indica que este desbalance se mantendrá negativo los siguientes años (Figura 1). (Maldonado & Proaño, 2015)

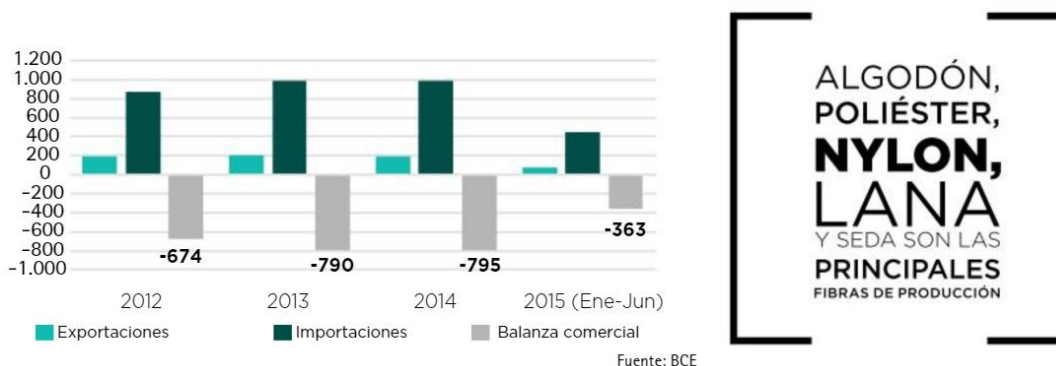


Figura 1. Balance comercial de la Producción Textil (millones de dólares).
Fuente: (Maldonado & Proaño, 2015).

Este problema no solo afecta a la industria textil, también afecta al sector manufacturero debido a que una de las principales aplicaciones del duralón en dicha industria, es en la fabricación de elementos de máquinas.

Para conseguir las piezas finales, estas son obtenidas mediante moldeo por inyección, pero en su gran mayoría se las fabrica mediante procesos de maquinado a partir de planchas o barras, y es ahí donde empieza el problema ya que el duralón en sus dos formas base al igual que como fibra también es importado.

La mayoría de empresas que comercializan el duralón no cuentan con una información que asegure el tipo de nylon que es, o que asegure que el material vendido cumpla con las propiedades mecánicas solicitadas, esto es un problema teniendo en cuenta la gran variedad de nylons que existen y de las diferencias entre sus propiedades.

Esto en el caso del sector manufacturero hace que la situación se complique, ya que, si se desea fabricar piezas que cumplan su funcionamiento adecuadamente, estas deben tener un correcto estudio de diseño, y para esto es necesario la información antes mencionada.

1.4. Justificación e Importancia

El Nylon es uno de los polímeros termoplásticos con mayor volumen de producción anual en el mundo, por ello el uso de estos materiales cada vez va en aumento dentro de la industria ecuatoriana, esto se debe principalmente a su costo relativamente bajo comparado con metales suaves.

Al ser un plástico de ingeniería las aplicaciones más importantes se encuentran en el campo de la ingeniería mecánica, dependiendo de las condiciones con las que fue procesado este material nos permite su uso como fibras de gran resistencia, mediante el moldeo directo o mecanizado de piezas.

Además, el Nylon es considerado un material fácil de maquinar, esto es de gran importancia al momento de diseñar y fabricar elementos de precisión como los engranajes mismos que por lo general no se pueden conseguir comercialmente, esta también es una las grandes ventajas que posee el nylon dentro de los Procesos de Manufactura.

Actualmente en el Ecuador el consumo per cápita de materiales plásticos varía entre 18 – 20 kg al año, teniendo un volumen de ventas que alcanza más de US\$ 1400 millones, siendo la tercera industria del país con más stock de capital fijo lo que genera más de 15000 empleos fijos. (Pro Ecuador, 2015)

Considerando lo anteriormente indicado sobre la importancia que tiene el Nylon o Duralón dentro de la industria, en el presente trabajo de titulación se pretende obtener valores referenciales de sus propiedades mecánicas realizando los ensayos estáticos y dinámicos correspondientes aplicando las normas ASTM.

Con esto se pretende también verificar el tipo de nylon que se comercializa en la industria ecuatoriana y si las propiedades mecánicas del mismo son las correspondientes para dicho material.

1.5. Área de Influencia

El presente trabajo de titulación tiene dos áreas de influencia que son de gran importancia en el desarrollo del país.

La primera área de influencia es la educación superior, tanto a profesores como estudiantes de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de las universidades que cuentan con dichas carreras en la provincia de Pichincha es necesario e importante conocer más acerca del Duralón debido a que cada vez los materiales poliméricos en especial el nylon van teniendo mayor participación en la industria.

Además de que este material es muy utilizado en las prácticas de Procesos de Manufactura y en otras asignaturas afines gracias a sus excelentes propiedades en especial su facilidad para ser maquinado.

La segunda área de influencia es en el sector de la industria, en el área textil y en el sector manufacturero, específicamente para las empresas dedicadas al diseño y fabricación de elementos con duralón.

1.6. Alcance

Este trabajo de titulación tiene como finalidad la caracterización de las propiedades mecánicas del Duralón que se comercializa en una de las empresas con más renombre en la Provincia de Pichincha (cuentan con ficha técnica del material), realizando los procedimientos pertinentes en los laboratorios de Metrología, Procesos de Manufactura y Mecánicas de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, sede Sangolquí.

Esta caracterización del Duralón se realizará mediante los ensayos mecánicos detallados en la Tabla 2:

Tabla 2
Ensayos Mecánicos.

<ul style="list-style-type: none"> • Ensayo de Tracción: ASTM D638. 	<ul style="list-style-type: none"> • Esfuerzo Máximo. • Esfuerzo de Fluencia. • Alargamiento Porcentual. • Módulo de Elasticidad.
<ul style="list-style-type: none"> • Ensayo de Flexión: ASTM D790. 	<ul style="list-style-type: none"> • Esfuerzo Máximo • Límite de Proporcionalidad. • Módulo de Elasticidad.
<ul style="list-style-type: none"> • Ensayo de Corte: ASTM D732. 	<ul style="list-style-type: none"> • Esfuerzo Máximo. • Límite de Proporcionalidad.
<ul style="list-style-type: none"> • Ensayo de Fatiga: Método R.R. Moore. 	<ul style="list-style-type: none"> • Comportamiento de Fatiga – Diagrama (S-N).

Los resultados obtenidos de cada ensayo serán analizados y comparados con valores de referencias internacionales de confiabilidad comprobada, para poder garantizar que el material cumple con las propiedades mecánicas correspondientes.

Finalmente se realizará un análisis de los costos autofinanciados y financiados por la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, necesarios para la correcta realización de las pruebas mecánicas a materiales plásticos, así se obtendrá una referencia útil para estudios posteriores.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo General

- Caracterizar las propiedades mecánicas del Duralón que se comercializa en la Provincia de Pichincha.

1.7.2. Objetivos Específicos

- Detallar un estudio teórico del Duralón (Nylon), sus propiedades, métodos de obtención, tipos de nylon y sus aplicaciones.
- Realizar los ensayos mecánicos de Tracción, Flexión, Corte y Fatiga del Duralón, aplicando las normas respectivas.
- Obtener valores referenciales de las propiedades mecánicas del Duralón, analizar y comparar con respecto a referencias internacionales de confiabilidad comprobada.
- Presentar un análisis económico de este proyecto para referencias de estudios posteriores.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Duralón (Nylon) - Definición

El Duralón es un polímero termoplástico, pertenece a la familia de las poliamidas alifáticas conocidas también como nylons, las cuales se caracterizan por tener en común el enlace amida en forma repetida en su composición.

2.2. Polímeros

2.2.1. Definición

La palabra polímero viene del griego *polys*, que significa “muchos”, y *meros* que significa “partes”. Los polímeros son moléculas lineales o ramificadas, formadas por la repetición indefinida de grupos funcionales simples (monómeros) que se componen básicamente de Carbono, Hidrógeno, Oxígeno y Nitrógeno. Los plásticos son materiales que en su mayoría son sintéticos y orgánicos, constituidos por macromoléculas, con pesos moleculares desde 10000 hasta más de 1000000 g/mol. (Shackelford, 2005)

Se obtienen de materias primas como el petróleo, el carbón o el gas natural, pero la mayoría de polímeros se obtienen a partir del petróleo, después de un proceso de craking y reforming se obtiene moléculas simples necesarias para la síntesis de los polímeros, de estos procesos se encarga principalmente la industria petroquímica.

2.2.2. Clasificación

Los polímeros se pueden clasificar de diferentes maneras puede ser: dependiendo de la manera en que las moléculas son sintetizadas, en función de su estructura molecular o por su familia química; pero el método más común es dependiendo de su comportamiento mecánico y térmico. (Askeland, 2012)



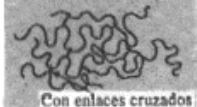
Comportamiento	Estructura general	Diagrama
Termoplástico	Cadenas lineales flexibles	
Termoestable	Red rígida tridimensional	 Con enlaces cruzados
Elastómero	Cadenas lineales con enlaces cruzados	 Con enlaces cruzados

Figura 2. Comparación de las tres clases de polímeros.
Fuente: Askeland, 2012.

Como se puede ver en la Figura 2, los polímeros se los puede clasificar como: polímeros termoplásticos, polímeros termoestables y elastómeros.

Los polímeros termoplásticos tienen una estructura molecular mayoritariamente lineal con o sin ramificaciones, se comportan de una manera plástica y dúctil, cuando se los expone a elevadas temperaturas por lo general sobre los 150°C estos polímeros se ablandan y se convierten en fluido viscoso fácil de moldear, una vez se enfrían no pierden sus propiedades notablemente lo que los hace plásticos reciclables, pero este proceso se lo puede realizar un número determinado de veces dependiendo del polímero.

Los polímeros termoestables están constituidos por cadenas largas de moléculas fuertemente unidas por enlaces cruzados para formar estructuras de redes tridimensionales, se caracterizan por ser materiales mucho más rígidos, pero más frágiles que otros polímeros, los termoestables no tienen una temperatura de fusión fija cuando se los somete a elevadas temperaturas empiezan a descomponerse, pero no se funden lo que hace de estos materiales no reciclables.

Los elastómeros tienen una estructura intermedia, en la cual se permite que ocurra una ligera formación de enlaces cruzados entre las cadenas, estos materiales son capaces de deformarse notablemente y una vez retirados los esfuerzos recuperan su forma inicial, por lo que tienen una deformación elástica superior a 200%, estas propiedades los convierten en excelentes componentes de los cauchos, así el 68% de su producción total es exclusivamente para la fabricación de neumáticos. (Blanco, 2012)

2.2.3. Proceso Químico y Reacciones de Polimerización

La polimerización es el proceso químico (reacción química) en el cual las moléculas más pequeñas como el etileno, estireno, benceno, etc., se unen hasta formar macromoléculas mediante el aporte de un catalizador, luz o calor, al número de veces que se repite el monómero es un valor que se lo conoce como grado de polimerización (G.P.), dentro de este proceso se distinguen dos métodos: polimerización por adición y polimerización por condensación.

El grado de polimerización también se lo puede definir mediante la siguiente expresión:

Ecuación 1 Fórmula grado de polimerización.

$$\text{Grado de polimerización} = \frac{\text{Peso molecular del polímero}}{\text{Peso molecular de la unidad de repetición}}$$

Dependiendo del grado de polimerización podemos obtener polímeros en estado líquido a temperatura ambiente como aceites sintéticos cuando el G.P. es muy bajo y a medida que este valor aumenta el producto será sólido aumentando progresivamente su temperatura de fusión, diferente para cada tipo de polímero.

2.2.3.1. Polimerización por Adición:

La polimerización por adición, también denominada como polimerización en cadena o poliadición, se produce cuando reaccionan monómeros bifuncionales que se van uniendo uno a uno, a modo de cadena, hasta que la reacción llegue a su final formando una macromolécula lineal. (Callister, 2007)

La composición de la molécula resultante es un múltiplo exacto del monómero reactivo original. Generalmente el monómero inicial es un derivado del etileno que va perdiendo su concentración de forma constante durante la reacción.

La reacción en cadena usualmente consta de tres etapas: iniciación, propagación y terminación.

- **Iniciación:** La etapa de iniciación se forma al reaccionar un catalizador con una unidad monomérica, un centro activo capaz de continuar la polimerización, este catalizador puede ser un radical libre, un catión, un anión o un catalizador de coordinación siendo este último el catalizador de mayor importancia comercial. (Seymour, 2002)

- Propagación: La etapa de propagación consiste en el crecimiento lineal de la molécula, este proceso se desarrolla de manera relativamente rápida, siendo así de miles de adiciones por segundo, por ejemplo para formar 1000 unidades monoméricas el tiempo necesario es de aproximadamente 10^{-2} a 10^{-3} segundos. La velocidad de crecimiento va disminuyendo a medida que los pocos monómeros sin reaccionar deben alcanzar un sitio activo en los extremos de alguna cadena.
- Terminación: La reacción puede terminar por dos maneras: (a) Las cadenas en crecimiento pueden unir sus extremos activos formando una molécula no reactiva, a este proceso se lo conoce como combinación, (b) el extremo activo de una cadena puede reaccionar y quitar un átomo de hidrógeno de otra cadena, a este proceso se lo conoce como desproporciónación. (Askeland, 2012)

La polimerización en cadena es un proceso que sirve para la síntesis de cloruro de polivinilo, poliestireno, polipropileno, polietileno, algunas poliamidas y de muchos otros copolímeros.

Las poliamidas que se pueden obtener por polimerización en cadena contienen tanto ácido orgánico como grupos amina en sus compuestos cíclicos. La principal poliamida obtenida con este proceso es el Nylon 6, producto de polimerizar ϵ – caprolactama (6 carbonos), como se muestra en la Figura 3. (William F. Smith, 2006)

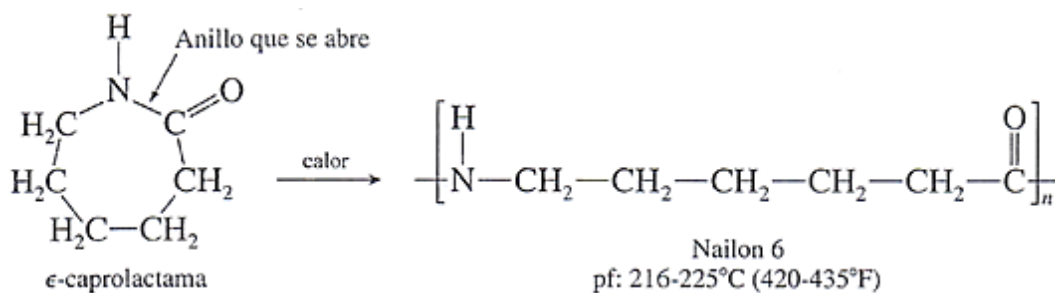


Figura 3. Polimerización en cadena Nylon 6.

Fuente: (William F. Smith, 2006)

2.2.3.2. Polimerización por Condensación

La polimerización por condensación, se la denomina de varias maneras dependiendo el autor estas pueden ser: polimerización de crecimiento por pasos, polimerización sucesiva, polimerización escalonada, policondensación o reacción por etapas.

Este proceso requiere que por lo menos dos monómeros distintos participen en la reacción, durante la polimerización se producen reacciones químicas intermoleculares dando como resultado la formación del polímero y un subproducto de bajo peso molecular que generalmente es agua, que se elimina.

Las sustancias que reaccionan son químicamente diferentes de la unidad que se repite, la longitud de la cadena del polímero resultante depende de la facilidad con la que las reacciones intermoleculares de los monómeros formen la unidad repetitiva en los extremos de la cadena.

Así, para obtener productos con elevados pesos moleculares es necesario que el tiempo de reacción sea suficiente para que se produzca la conversión de todos o la mayoría de los monómeros reactivos, es por ello que los tiempos de polimerización por

condensación son mayores que los tiempos de la polimerización por adición. (Callister, 2007)

Mediante la polimerización por condensación es posible obtener una de las poliamidas más importantes, este material consiste en la reacción de polimerización entre el ácido adípico y la hexametildiamina, el producto final es la polihexametilendiamina conocida como Nylon 6,6 y en este caso el subproducto que se produce de la reacción es agua como se muestra en la Figura 4.

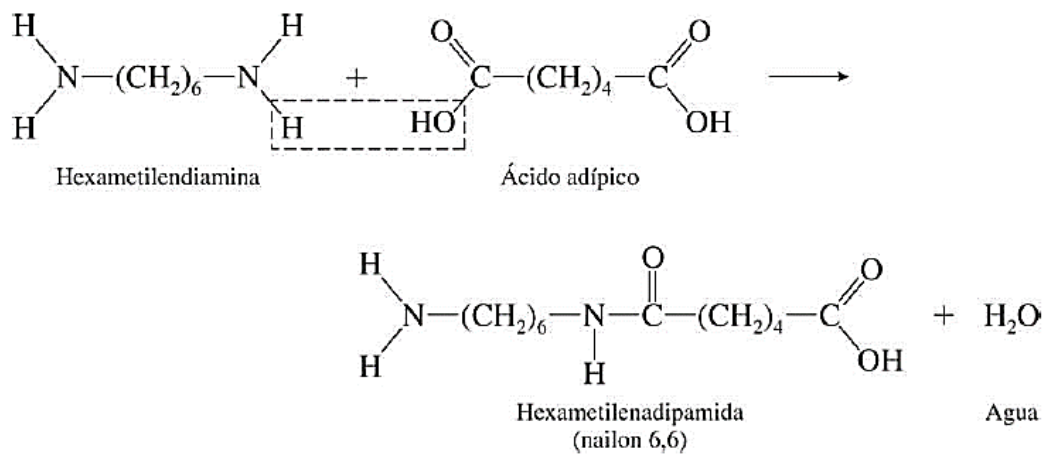


Figura 4. Polimerización por condensación del Nylon 6,6.

Fuente: (William F. Smith, 2006)

2.2.4. Termoplásticos de Ingeniería

Los termoplásticos de ingeniería es una familia de los polímeros cuyas propiedades únicas los hacen útiles para aplicaciones de ingeniería, se considera dentro de esta familia a las poliamidas (nylon), policarbonatos, acetales, poliésteres termoplásticos, polisulfona, sulfuro de polifenileno y polieterimida.

Material	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a la tensión (×1000 psi)*	Resistencia al impacto, Izod (pie · lb/pulg)†	Resistencia dieléctrica (V/mil)‡	Temp. máx. de uso (sin carga)	
					°F	°C
Nailon 6,6	1.13-1.15	9-12	2.0	385	180-300	82-150
Poliacetel, homo.	1.42	10	1.4	320	195	90
Policarbonato	1.2	9	12-16	380	250	120
Poliéster:						
PET	1.37	10.4	0.8	300	175	80
PBT	1.31	8.0-8.2	1.2-1.3	590-700	250	120
Óxido de polifenileno	1.06-1.10	7.8-9.6	5.0	400-500	175-220	80-105
Polisulfona	1.24	10.2	1.2	425	300	150
Sulfuro de polifenileno	1.34	10	0.3	595	500	260

*1000 psi = 6.9 MPa.

†Prueba Izod con muesca: 1 pie · lb/pulg = 53.38 J/m.

‡1 V/mil = 39.4 V/mm.

Figura 5. Propiedades de termoplásticos de ingeniería.

Fuente: (William F. Smith, 2006)

Como se puede observar en la Figura 5, cabe destacar algunas propiedades de los termoplásticos de ingeniería principalmente su baja densidad y alta resistencia eléctrica, lo que resulta en una ventaja en múltiples diseños dentro del campo de la ingeniería.

Otra ventaja principal de estos materiales es que son relativamente fáciles de procesar en forma casi terminada o terminada, sin embargo su producción y tonelaje de ventas es relativamente bajo comparando con otros plásticos de uso común, siendo la excepción el nylon debido a sus propiedades especiales que lo hacen un material de uso importante en la industria.

2.2.4.1. Poliamidas

Dentro del grupo de los polímeros termoplásticos se encuentra la familia de las poliamidas, estos fueron los primeros materiales sintéticos que empezaron a competir con otros materiales tradicionales como los metales, debido a sus propiedades mecánicas el crecimiento en el uso de las poliamidas desde su aparición ha sido rápido y continuo.

El principio de obtención de las poliamidas alifáticas puede ser de tres maneras: mediante policondensación de diaminas y ácidos dicarboxílicos, policondensación de aminoácidos o por polimerización de lactamas.

Para las poliamidas aromáticas (aramidas) se obtienen a base de ácidos tereftálico e isoftálico, así como p-fenilendiamina y m-fenilendiamina. (Weissermel, 1981)

La clasificación de las poliamidas se realiza de acuerdo a su composición química siendo esta (Figura 6):

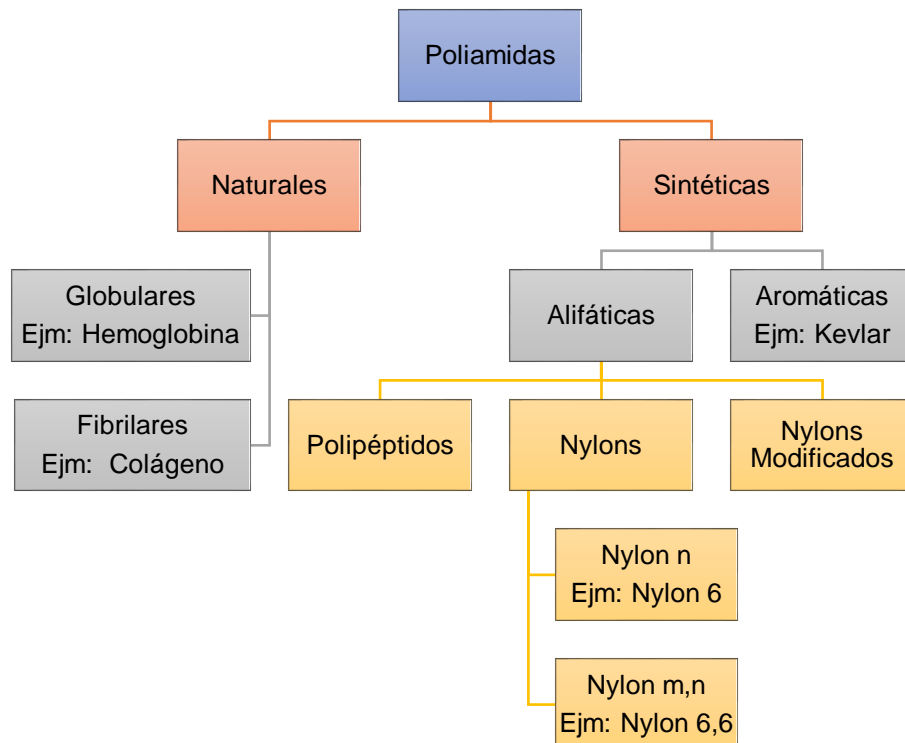


Figura 6. Clasificación de las Poliamidas.

Las poliamidas naturales son proteínas, se trata de poliamidas con la composición química más compleja estas pueden ser poliamidas globulares con enlaces de hidrógeno

intramoleculares son solubles en agua y poliamidas fibrilares con enlaces de hidrógeno intermoleculares son insolubles en agua. (Seymour, 2002)

Las proteínas fibrilares pueden ser la queratina o el colágeno que se encuentran en cabello, uñas o tejido conectivo, son polímeros mucho más resistentes que las proteínas globulares como las enzimas, las hormonas, la hemoglobina y la albúmina.

Las poliamidas sintéticas se pueden dividir en poliamidas alifáticas siendo el material más importante el nylon y las poliamidas aromáticas también conocidas como aramidas estas últimas han venido ganando una gran importancia dentro de la industria de la goma debido a sus excelentes propiedades de estabilidad a la temperatura y anti inflamabilidad.

Entre las poliamidas aromáticas los materiales más importantes son el Kevlar y el Nomex desarrollados por la DuPont en 1972, su producción paso de una instalación inicial de 2700 toneladas al año a una capacidad superior de 100000 toneladas al año para 1975, su desarrollo llamo la atención de otras empresas como Goodyear que desarrollaron las fibras Flexten para el año de 1976. (Weissermel, 1981)

Entre el año de 1975 y 1978 la producción mundial de las poliamidas subió de 7,1 a 10 millones de toneladas siendo la aplicación principal para fibras sintéticas, para el año de 1974 las poliamidas participaban con el 32 % de la producción mundial ubicándolas en segundo lugar por detrás de los poliésteres que participaban con un 46 %.

Dentro del consumo de las poliamidas un 10 % de su producción es utilizado para la fabricación y moldeo de elementos por inyección o extrusión, esta característica hace que las poliamidas sean materiales insustituibles en el diseño de elementos de máquinas disminuyendo costos de producción en el proceso de manufactura.

2.2.5. Nylon (Duralón)

El Nylon (Duralón) fue inventado en el complejo químico de la empresa DuPont en 1933, año en el cual Wallace Carothers descubrió la poliamida 6,6. Para 1939 la DuPont producía a escala industrial dicho polímero utilizado principalmente en el mercado textil, bajo la marca registrada de “Nylon”, nombre con el cual en adelante se identificarán las poliamidas alifáticas.

Las poliamidas alifáticas (Nylons) fueron los primeros materiales en ser reconocidos como termoplásticos de ingeniería, debido a sus propiedades mecánicas superiores frente a otros materiales poliméricos. Estas propiedades permitieron que los nylons sean usados en aplicaciones que anteriormente solo podían ser satisfechas por metales. (Margolis, 1985)

2.2.5.1. Tipos de Nylon

Actualmente existen muchos tipos de nylon pero lo que caracteriza a este tipo de poliamidas es que en todas ellas se tiene en común el enlace amida en forma repetida (Figura 7).

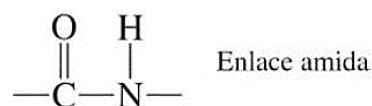


Figura 7. Enlace amida.
Fuente: (William F. Smith, 2006)

La denominación de los diferentes tipos de nylons se realiza mediante un código, en el cuál un solo número indica que su obtención viene de un solo componente (aminoácido

o lactama) este a su vez indica el número de átomos de Carbono del componente, dos números indican que la obtención viene de dos componentes (diamina y ácido dicarboxílico) así el primer dígito indica el número de átomos de Carbono de la diamina y el segundo dígito el número de átomos de Carbono del ácido dicarboxílico.

Tabla 3

Código y producto de partida para poliamidas industriales.

Código - Nylon	Producto de Partida
6	ϵ – caprolactama
6,6	Hexametilendiamina (HMDA) / Ácido Adípico
6,10	HMDA / Ácido sebásico
6,12	HMDA / Ácido 1,12-dodecanodioico
11	Ácido ω - aminoundecanoico
12	Laurilactama

Fuente: (Weissermel, 1981)

En la Tabla 3 se muestran algunos tipos de nylon considerados entre los más importantes industrialmente, pero en este grupo destacan la producción del Nylon 6 y el Nylon 6,6 los mismos que constituyen casi el 99% de la producción mundial de nylons, esto debido a su buen balance entre sus excelentes propiedades y precio. Los otros tipos de nylons se utilizan para usos exclusivos donde sus propiedades únicas sean necesarias.

2.2.5.2. Propiedades Físicas

Las poliamidas alifáticas (Nylons) son materiales altamente cristalinos debido a la existencia de puentes o enlaces de hidrógeno que se forma entre las cadenas moleculares (Figura 8).

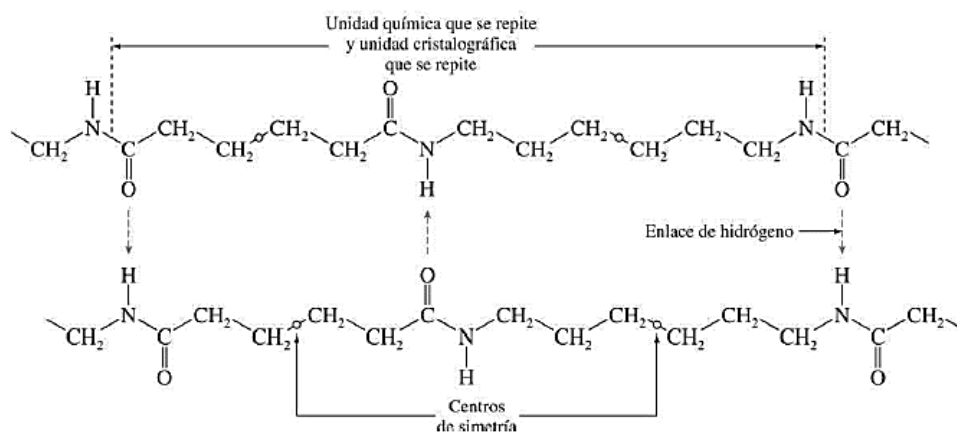


Figura 8. Representación esquemática del enlace de hidrógeno entre dos cadenas moleculares.

Fuente: (William F. Smith, 2006)

Como se observa en la figura 8, el enlace de hidrógeno entre el oxígeno del $\text{C}=\text{O}$ y el hidrógeno del grupo NH de las dos cadenas moleculares es posible gracias al enlace amida, lo que proporciona un alto grado de cristalinidad, permitiendo que dichos materiales puedan producir esferulitas en condiciones de solidificación controladas (Figura 9).

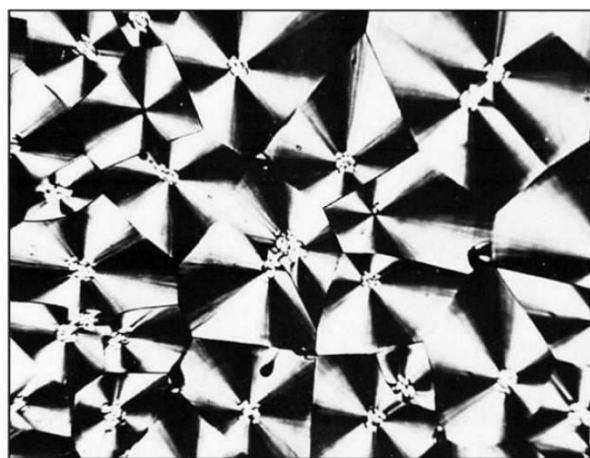


Figura 9. Nylon 9,6 con esferulitas, desarrollada a 210°C .

Fuente: (William F. Smith, 2006)

El enlace o puente de hidrógeno provoca que las poliamidas tengan un aumento tanto en su resistencia a la tracción como en su temperatura de fusión, así cuanto mayor es el número de grupos amida que existan, a igualdad de número de átomos totales de carbono estos valores van aumentando notablemente, como resultado se tiene materiales con mejores propiedades físicas y mecánicas. (Luis Bilurbina, 1990)

Entre las propiedades físicas más importantes que mejoran por los enlaces de hidrógeno están la baja fricción superficial, alta lubricidad, buena resistencia a la abrasión, altas temperaturas de deformación por calor, además la flexibilidad de las cadenas de carbono imparte flexibilidad molecular lo que provoca que estos materiales tengan una baja viscosidad del fundido lo que da como resultado una mayor facilidad de procesado y de obtención de piezas terminadas mediante moldeo, sin la necesidad de procesos de manufactura.

Además, otra importancia de los enlaces de hidrógeno con las propiedades del nylon es el punto de fusión de las poliamidas esto se puede demostrar con la comparación de dicho valor mostrado en la Tabla 4.

Tabla 4

Punto de Fusión de algunos tipos de Nylon.

Poliamida	Punto de Fusión [°C]
Nylon 6	226
Nylon 6,6	265
Nylon 6,9	226
Nylon 11	184
Nylon 12	179

Fuente: (Margolis, 1985)

La diferencia de puntos de fusión entre los diferentes tipos de nylons radica en la orientación del grupo amida en la cadena polimérica, esto se debe a que los nylons

formados por diaminas y ácidos dicarboxílicos tienen los grupos amida con orientación alterna a lo largo de la cadena mientras que los nylons formados por aminoácido o lactamas tienen todos los grupos amida en una sola dirección a lo largo de la cadena.

La orientación alterna de los grupos amida produce más enlaces de hidrógeno con ello mayores puntos de fusión, así una menor concentración de grupos amida limita el número de enlaces de hidrógeno, como se puede observar en la Tabla 4 el nylon 6,6 tiene un punto de fusión alrededor de 40 °C mayor que el nylon 6.

La concentración de los grupos amida también afecta a la absorción de agua de los nylons, con la asociación de agua en los grupos amida en las áreas amorfas. Esta asociación de agua con el grupo amida es esencialmente un reemplazo del enlace amida – amida con el enlace amida – agua. (Margolis, 1985)

Tabla 5

Absorción de Agua de algunos tipos de Nylon.

Poliamida	Absorción de H₂O, 24 [hr] (ASTM D570)	% Amida
Nylon 6	1,3 - 1,9	38
Nylon 6,6	1,0 - 1,3	38
Nylon 6,9	0,5	32
Nylon 6,12	0,4	28
Nylon 12	0,25 - 0,3	22

Fuente: (Margolis, 1985)

Por esta razón para aplicaciones donde la humedad puede afectar al nylon 6,6 o 6 que son de uso común es aconsejable utilizar el nylon 11 o 12 ya que son menos sensibles a la absorción de agua (Tabla 3), esto debido a que la humedad provoca una disminución en la resistencia a la tracción y también un aumento considerable del

volumen de las piezas, factor que debe ser considerado especialmente en el diseño de piezas voluminosas. (Blanco, 2012)

Otra propiedad física muy importante de los nylons que es controlado por el enlace de hidrógeno es la buena resistencia a sustancias químicas o disolventes, sólo los cresoles, ácido fórmico y fenoles los atacan algo, los alcoholes y ácidos fuertes los degradan, pero tienen una excelente resistencia al éter etílico, a la acetona, a los hidrocarburos saturados y al tetracloruro de carbono, motivo que hace del nylon uno de los polímeros de ingeniería de mayor uso industrial.

2.2.5.3. Propiedades Mecánicas

Como se mencionó anteriormente en propiedades físicas del nylon, debido a la sensibilidad de este material en condiciones de humedad los productores presentan características y propiedades mecánicas en condiciones secas en el momento de desmoldear (DAM “dry as moulded”), debido a que estas propiedades varían considerablemente sobre todo en los nylons 6 y 6,6 (Tabla 6).

A pesar de que sus propiedades difieren en condiciones de humedad cabe aclarar que mediante un proceso de secado es posible lograr que los nylons recuperen sus propiedades mecánicas originales. Además, al contrario del trabajo en humedad las poliamidas tiene un buen desempeño a altas temperaturas como se mencionó anteriormente, los nylons conservan sus propiedades mecánicas hasta los 150 °C aunque la temperatura de utilización máxima recomendada es de 125 °C, dependiendo del esfuerzo que se aplique, siendo un valor alto comparado con otros tipos de polímeros. (Luis Bilurbina, 1990)

Otro factor ambiental que afecta a las poliamidas son los ambientes fríos y secos esto hace que los nylons se vuelvan más frágiles disminuyendo principalmente su resistencia a impacto y fatiga.

Tabla 6

Propiedades Mecánicas de algunas Poliamidas (DAM).

Propiedades Mecánicas de algunas Poliamidas						
Propiedad	Unidades	Nylon 6,6	Nylon 6	Nylon 6,9	Nylon 6,12	Nylon 12
Resistencia a la Tracción	kpsi	12	11,8	10,2	8,8	8,5
Alargamiento a la Rotura	%	73	200	50	150	300
Módulo de Flexión	kpsi	400	395	335	290	165
Impacto Izod, muesca	ft-lb/in	1	1,1	0,7	1	2-5,5
Dureza	Rockwell R	120	120	61	114	105
Temperatura de Deflexión						
264 psi	°C	80	80	75	80	55
66 psi	°C	230	188	170	165	145

Fuente: (Margolis, 1985)

Una manera de mejorar las propiedades mecánicas, es aumentando la cristalinidad del material esto se puede lograr mediante un proceso de estirado unidireccional en frío de manera que las macromoléculas estiradas se coloquen paralelamente, con este proceso se puede llegar a valores de resistencias a la tracción tan altas como 50 kpsi como sucede con el nylon 6,6.

También se puede mejorar las propiedades mecánicas debido a una de las características más importantes de las poliamidas que es su relativa facilidad de modificación, esto se logra de varias maneras puede ser mediante la adición en pequeñas cantidades (menos del 1 %) de aditivos nucleantes, o añadiendo cantidades relativamente grandes hasta un 40–45 % de agentes reforzantes como minerales o fibras de vidrio (Figura 10).

- Los agentes nucleantes ayudan a controlar el grado de cristalización y el tamaño de las esferulitas como resultado se obtiene una mejor estabilidad dimensional (mayor resistencia a esfuerzos), y baja la ductilidad (porcentaje de elongación y resistencia al impacto).

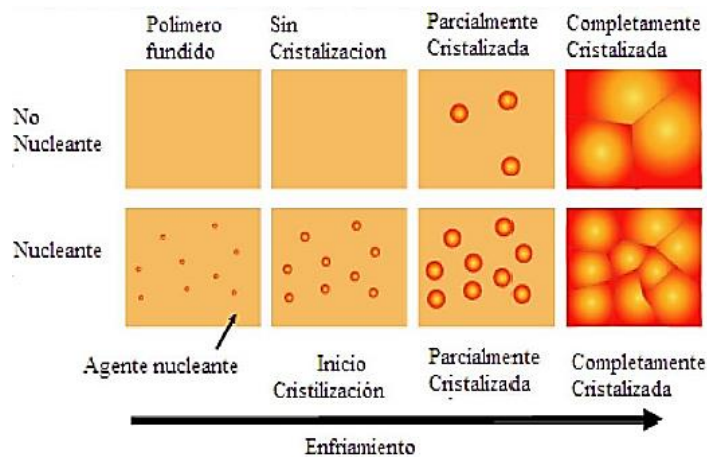


Figura 10. Comparativa de la cristalización de un polímero con/sin agente nucleante.
Fuente: (Blanco, 2012)

Se han encontrado un gran número de agentes nucleantes para nylons, entre estos están minerales, sales inorgánicas, grafito, ácidos orgánicos, partículas de caucho dispersas, partículas de polvo, entre otros. (Margolis, 1985)

- Los agentes reforzantes tienen que estar químicamente unidos a la matriz del nylon. Al igual que los agentes nucleantes, los agentes reforzantes aportan una mayor estabilidad dimensional esto es mayor resistencia a la tracción, módulo de elasticidad y temperatura de deflexión bajo carga, como se puede ver en la Tabla 7.

Existen varios agentes que se unen efectivamente entre estos están titanatos funcional amino y silanos funcional amino, estos materiales son compuestos

polifuncionales con un grupo amino orgánico capaz de reaccionar con nylons y una funcionalidad inorgánica capaz de reaccionar con materiales silíceos como arcilla silicatada, fibra de vidrio y sílice.

Tabla 7

Propiedades clave para Nylon 6,6 reforzado.

Valor de Propiedades Mecánicas con Reforzamiento

Propiedad	Unidad	Ninguno	Caolinita 40%	Mica 50%	Fibra de vidrio 43%
Esfuerzo a la Tracción	kpsi	12	14	13,8	30
Alargamiento a la Rotura	%	80	9	-	2
Módulo de Flexión	kpsi	400	870	1900	1600
Temperatura de deflexión bajo carga	°C	90	193	229	252
Volumen del Reforzamiento	%	0	23	29	26

* Las propiedades mostradas son medidas en dirección de la orientación del reforzamiento.

Fuente: (Margolis, 1985)

El nylon posee excelentes propiedades mecánicas, pero como se mostró su relativamente fácil capacidad a ser modificado hace que sus propiedades superen a la de otros polímeros siendo esta otra razón que ha llevado a que sus aplicaciones y ventas tengan cada vez una mayor influencia en la industria.

2.2.5.4. Procesamiento

El moldeo por inyección es por mucho el método más utilizado para convertir la resina de nylon en planchas, barras y piezas acabadas; pero dentro de este proceso se debe tener en cuenta aspectos importantes que se tratarán a continuación como el comportamiento cristalino y la absorción de humedad.

Como se mencionó en propiedades físicas, los nylons son materiales semicristalinos debido al enlace amida entre sus cadenas moleculares, este enlace afecta a la temperatura de fusión haciendo que dicho valor varíe para cada tipo de nylon.

Durante el procesamiento el nylon tiene que ser calentado a temperaturas sobre el punto de fusión (Tabla 8), generalmente no existe un suavizado gradual de este polímero cuando está dentro del barril de la máquina de moldeo.

Por ello si no se aplica suficiente calor, este puede ocasionar daños en la máquina, en especial cuando se trabaja con nylons reforzados, a continuación, se muestra una tabla comparativa entre las temperaturas de fusión y las de procesamiento recomendada para algunos nylons.

Tabla 8

Puntos de Fusión y Rangos de Procesamiento para Nylons Comerciales.

Composición	Punto de Fusión [°F]	Rango de Procesamiento [°F]
Nylon 6	410 - 436	440 - 550
Nylon 66	482 - 500	520 - 560
Nylon 69	410	430 - 500
Nylon 610	406 - 428	430 - 500
Nylon 612	403 - 419	450 - 500
Nylon 11	356 - 374	400 - 450
Nylon 12	347 - 356	400 - 450

Fuente: (Margolis, 1985)

Otro factor importante que depende del enlace amida es la absorción de humedad, la tasa de absorción es afectada por la temperatura, área de superficie y la cantidad de humedad que existe en el ambiente.

Por esta razón el nylon en su estado premoldeado, o pellet es enviado presecado en bolsas selladas con muchas capas de papel kraft (papel madera), papel de aluminio y con protectores de humedad hechos de poliolefina.

El uso de este material es seguro mientras la bolsa que lo contiene este sellada, caso contrario el uso de esta resina cuando ha pasado los 9 meses no es recomendado ya que la humedad excesiva es difícil de eliminar.

Esto quiere decir que tiene un límite de vida finito para poder usarse, y una vez se ha abierto las bolsas es importante guardarlo en latas, tambores o cualquier recipiente a prueba de humedad.

El resultado de moldear nylon húmedo, produce superficies con imperfecciones, ocasionado por la formación de vapor durante el proceso, además el vapor reacciona con el nylon ocasionando que se reduzca su peso molecular y con ello la formación de partes frágiles con propiedades físicas degradadas.

Es importante utilizar nylon sin humedad, por eso este puede ser sacado en hornos con circulación de aire limpio antes de ser moldeado, siempre manteniendo una temperatura constante y no superior a los 175 °F (80 °C), debido al peligro de degradación oxidativa.

Finalmente hay que aclarar que para nylon con húmedo (sobre 2 %), se lo puede salvar y utilizar siempre que se aplique un secado prolongado, evitando al máximo aplicar altas temperaturas para acelerar dicho proceso ya que esto hace más daño que bien al material.

2.2.5.5. Aplicaciones

Las aplicaciones de los nylons se dan en casi todas las industrias desde el momento de su aparición en el año de 1933 su uso ha sido muy común y variado y ha avanzado a la par con el progreso de la tecnología, gracias a sus propiedades han permitido que el nylon pueda resistir la competencia con nuevos materiales.

La primera aplicación que tuvo el nylon fue en la fabricación de las cerdas para los cepillos de dientes, pero su primer gran éxito fue en la fabricación de medias femeninas en el año de 1940 la empresa DuPont fabricó 2,6 millones de libras de nylon dándole ganancias en ventas por \$ 9 millones, fue tanta la demanda que al año siguiente la compañía vendió \$ 25 millones, convirtiendo al nylon en un reemplazo de la seda japonesa en la fabricación de medias (Figura 11).



Figura 11. Anuncio de medias nylon en Los Ángeles, California.
Fuente: <https://www.sciencehistory.org/>

A pesar de la pronta fama que adquirió el nylon dentro de la industria de la moda pronto se hizo difícil de conseguir, en 1942 cuando la Segunda Guerra Mundial consumía a Europa, prácticamente toda la producción de nylon se destinó para la fabricación de material de guerra, sus aplicaciones fueron la fabricación de cuerdas de remolques,

paracaídas, chalecos antibalas, redes contra mosquitos, cordones, hamacas y tanques de combustible para aviones. (Wolfe, 2008)

Actualmente una de sus mayores aplicaciones es como fibra sintética, en el año 2000 se produjo aproximadamente 4 millones de toneladas de nylon en el mundo, esto fue casi el 8 % de la producción total de fibras, y en términos de producción por volumen ubicó al nylon en tercer lugar entre las producciones de las principales fibras.

1,6 millones de toneladas de nylon aproximadamente el 39 % de la producción fue destinada para la confección de prendas de vestir, 1 millón de toneladas el 24,4 % se utilizó para la fabricación de alfombras esta es una de las aplicaciones que más se utiliza en la industria automovilística en el recubrimiento del interior de los vehículos, 1 millón de toneladas el 24,4 % se utilizó en aplicaciones industriales, finalmente 0,5 millones de toneladas el 12,2 % fue destinado para el uso textil con fibras cortadas. (McIntyre, 2000)

Otra de las aplicaciones más importantes del nylon está en el moldeo por inyección de piezas mecánicas que deben funcionar a altas temperaturas resistiendo el contacto con productos químicos, disolventes o hidrocarburos, además se utiliza para piezas antifricción sometidas a impacto que necesitan resistencia, rigidez y no necesiten lubricación, como los rodamientos mostrados en la Figura 12.



Figura 12. Rodamiento de nylon.

Fuente: (Blanco, 2012)

En la Tabla 9, se detalla aplicaciones importantes que tienen los nylons en las diferentes industrias.

Tabla 9

Aplicaciones Industriales del Nylon.

Aplicaciones de los Nylons	
Industria	Aplicación
Manufactura	Engranajes. Cojinetes. Empaques. Levas. Envases para alimentos. Asientos de válvulas. Rodamientos.
Automovilística	Velocímetros. Engranajes para limpia parabrisas. Abrazaderas de ajuste. Paletas de ventilador de motor. Recipiente para fluido de freno y servodirección. Cubiertas de la columna de dirección. Tapas de válvulas. Mecanismos de abertura de puertas y ventanas. Líneas y conductos de combustible y lubricación. Piezas exteriores del chasis. Sistema airbag.
Eléctrica y/o electrónica (Solo se utiliza a baja tensión)	Interruptores. Aislantes de alambre para conexiones. Enchufes. Monturas de antena y terminales. Núcleos de bobinas. Relés.

2.3. Máquina de R.R. Moore

El estudio y análisis de la resistencia a fatiga en los materiales es uno de los aspectos más importantes dentro del diseño de elementos mecánicos, debido a que la mayoría de veces las piezas fallan por cargas cíclicas o de fatiga antes que por cargas estáticas.

Los primeros estudios fueron realizados por el ingeniero alemán August Wöhler en el año de 1850 con el análisis del fenómeno de fatiga en los ejes de ferrocarril, concluyendo con la introducción del concepto de límite de fatiga y con el trazo del diagrama de Wöhler que actualmente se conoce como diagrama S-N.

Durante casi 20 años de estudio Wöhler, diseño y construyó diversas máquinas para ensayos de las cuales algunas aún se utilizan, en la actualidad existen varios tipos y se las pueden clasificar desde varios puntos de vista, pero la división que se aplica principalmente consiste en las siguientes clases:

- Máquina con carga axial.
- Máquina de flexión plana.
- Máquina de flexión rotativa.
- Máquinas de torsión.
- Máquina combinada de flexión y torsión.
- Máquina con cargas biaxial y triaxial.

Entre los diferentes tipos de máquinas las que producen cargas por flexión rotativa son las más comunes, entre estas la denominada Máquina de Moore es por mucho la más utilizada y con la cual se trabajó en el presente estudio.

Esta máquina fue diseñada por R.R. Moore en el año 1919, para entender mejor su funcionamiento se presenta el siguiente esquema con sus partes principales (Figura 13).

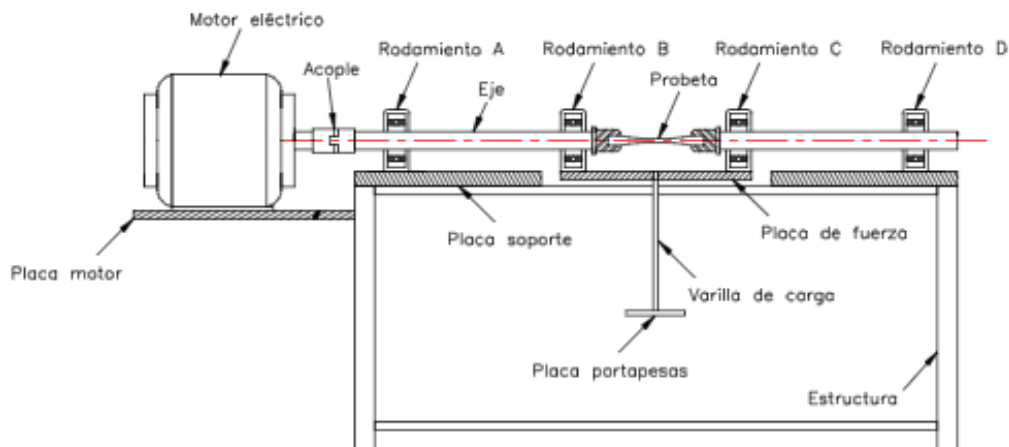


Figura 13. Esquema de lo elementos de la máquina de Moore.

Fuente: (Cuichán & Dueñas, 2008)

El motor eléctrico transmite el movimiento de rotación a los dos ejes y a la probeta a través del acople semiflexible, este movimiento en la muestra se considera como rotación libre debido a los rodamientos, y con esto se asegura que ningún elemento de la máquina se encuentra sometido a esfuerzos de torsión.

Los ejes cuentan con mordazas útiles para mantener a las probetas fijas para las pruebas, la máquina cuenta con dos rodamientos fijos (rodamientos A y B) que sirven de soporte, y dos rodamientos libres (rodamientos B y C) que sirven de pivotes.

La carga es aplicada en la placa portapesas la cual transmite dicha fuerza a los rodamientos libres los mismos que producen en las muestras el efecto de una viga simplemente apoyada, sometida a flexión pura. Al girar el motor hace que las fibras externas de las muestras pasen de estar en tracción a compresión cada vez que los ejes

dan media vuelta, estos esfuerzos alternantes producen la falla por fatiga. (Siza & Chango, 2012)

Es importante que tanto los rodamientos fijos como móviles no transmitan a las muestras esfuerzos de tracción o compresión, únicamente debe afectar el esfuerzo de flexión, de aquí la importancia de que la máquina se debe encontrar en buenas condiciones.

CAPÍTULO III

3. CARACTERIZACIÓN DEL DURALÓN

3.1. Ensayos Estáticos

3.1.1. Ensayo de Tracción (ASTM D 638)

La medida de la elongación y el módulo de Young por esfuerzo a tracción están entre las indicaciones más importantes de resistencia en un material y son las propiedades más ampliamente especificadas de los materiales plásticos.

La prueba de tracción, es una medida de la capacidad de un material para soportar fuerzas que tienden a estirarlo y determinar hasta qué punto el material se alarga antes de romperse. (Shah, 2007)

Las máquinas con las que se realiza el ensayo generalmente constan de una mordaza fija que sujeta a la pieza en un extremo y en el otro la sujeta una mordaza móvil, estas se separan a una velocidad constante mientras se va midiendo la carga aplicada y la extensión que sufre la muestra (Figura 14).

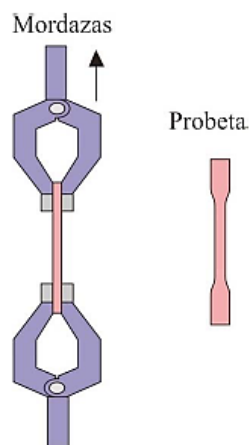


Figura 14. Mordazas y probeta para ensayo de tracción.

Fuente: (Marcilla Gomis & Beltrán Rico, 2012)

La norma que se tomará como guía para realizar el ensayo de tracción en el presente trabajo de titulación será la ASTM D 638 “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics”. (American Society for Testing and Materials, 2003)

A continuación, se indicarán los parámetros y las condiciones con las que se realizaron las pruebas, tratando de seguir a las de la norma en la manera más precisa posible.

3.1.1.1. Equipos

a) Máquina de Ensayo

Se utilizó la Máquina de Ensayos Universales AMSLER ubicada en el Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE (Figura 15).



Figura 15. Máquina de Ensayos Universales AMSLER.

Las especificaciones de la máquina se muestran en la Tabla 10:

Tabla 10

Especificaciones Máquina de Ensayos Universales.
Máquina de Ensayos Universales

Voltaje	220 [V]	Marca	AMSLER
Fases	3	Modelo	FM - 1033
Ciclos	60 [Hz]	Capacidad Máxima	Tracción: 10 [Ton]
Peso	500 [kg]		Compresión: 200 [Ton]
Tipo de motor	P - 8	Potencia motor	2 [HP]
Velocidad Max. Motor	1700 [rpm]	Refrigerante	N/A

La máquina se encuentra en correcto funcionamiento y su última calibración fue realizada por personal del INEN en el mes de marzo del 2018.

Sin embargo, la norma pide que la máquina sea capaz de mantener una velocidad constante de 5 mm/min \pm 25 %, esto no es posible debido al funcionamiento de la misma, ya que la carga se aplica mediante la apertura o cierre de la válvula de paso del líquido

hidráulico, esta válvula es controlada manualmente por el usuario y durante el ensayo se la va abriendo a medida que se necesita más presión.

b) Extensómetro



Figura 16. Extensómetro MTS.

Las especificaciones del extensómetro utilizado (Figura16), se muestran en la Tabla 11:

Tabla 11

Especificaciones del Extensómetro MTS.

Extensómetro

Marca	MTS
Origen	Estados Unidos
Modelo	632.11C-20
Serial No.	349
Longitud de calibre	25 [mm]
Desplazamiento Máximo	± 5 [mm]
Desplazamiento Recomendado	$\pm 3,75$ [mm]

El extensómetro produce una señal de salida en [mV], producto de la deformación en la muestra, esta señal es ingresada en un instrumento llamado medidor de tensión digital

o medidor de deformaciones unitarias, el cual acondicionada y transforma el voltaje produciendo como respuesta un valor numérico.

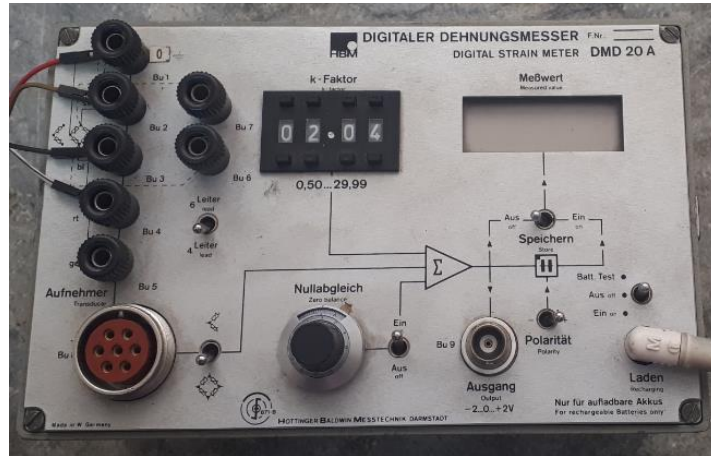


Figura 17. Medidor de Deformaciones Unitarias.

Las especificaciones del medidor de deformaciones unitarias (Figura 17), se muestran en la Tabla 12:

Tabla 12

Especificaciones del Medidor de Deformaciones Unitarias.

Medidor de Deformaciones Unitarias

Marca	HBM
Origen	Alemania
Modelo	DMD 20A
Voltaje	12 [V]
Fases	1
Ciclos	60 [Hz]
Peso	3 [Kg]
Capacidad	10000 x 10 E-6 (Def. Unit)

Antes de utilizar los instrumentos en la práctica, fue necesario obtener la característica estática del extensómetro, esto se realizó obteniendo la gráfica de relación entre la

deformación de las pinzas del extensómetro y el valor de respuesta dado por el instrumento medidor de deformaciones unitarias.

Para que esta gráfica sea confiable se realizó 10 mediciones con diferentes deformaciones del extensómetro, obteniendo el siguiente resultado.

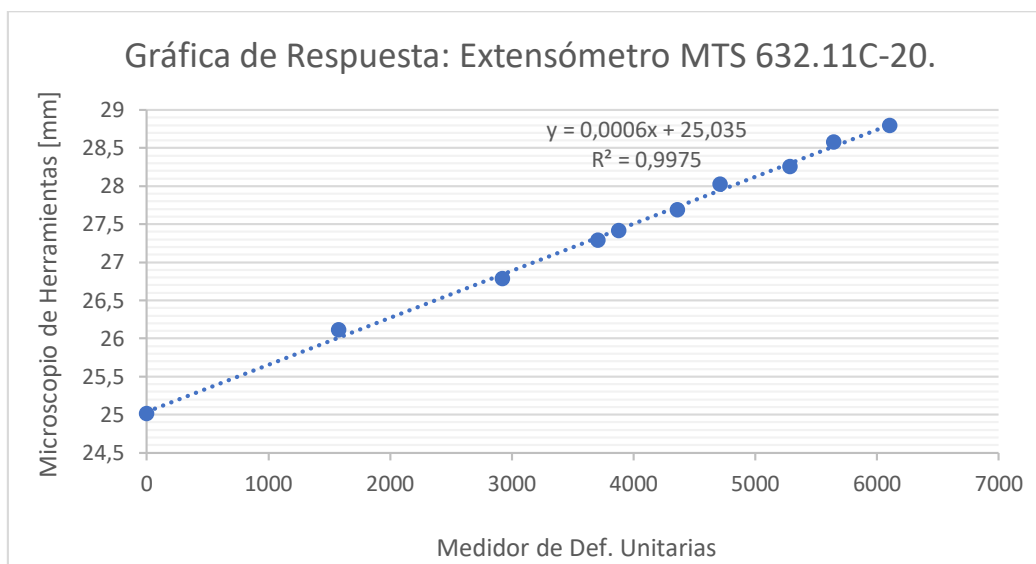


Figura 18. Característica estática del Extensómetro MTS.

La ecuación correspondiente a la característica estática del Extensómetro MTS que se muestra en la Figura 18 es la siguiente:

Ecuación 2 Característica estática del Extensómetro MTS.

$$y = 0,0006x + 25,035$$

Todo este procedimiento fue realizado en el Laboratorio de Metrología de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, los resultados y equipos utilizados se muestran en el Anexo 1.

3.1.1.2. Muestra de Prueba

El material utilizado para los ensayos fue comprado a una de las empresas con más renombre en la Provincia de Pichincha (cuentan con ficha técnica del material), todas las muestras fueron obtenidas del mismo lote de venta.

El duralón utilizado se comercializa bajo el nombre de Nylon 6A, las muestras se extrajeron de barras rígidas de 20 [mm] de diámetro por 1 [m] de largo mediante un proceso de mecanizado en torno, garantizando que las dimensiones y tolerancias sean las más exactas posibles.

Las dimensiones de las muestras se pueden ver en la Figura 19, las mismas que cumplen con las condiciones mostrados en el Anexo 2 como lo indica la norma ASTM D-638.

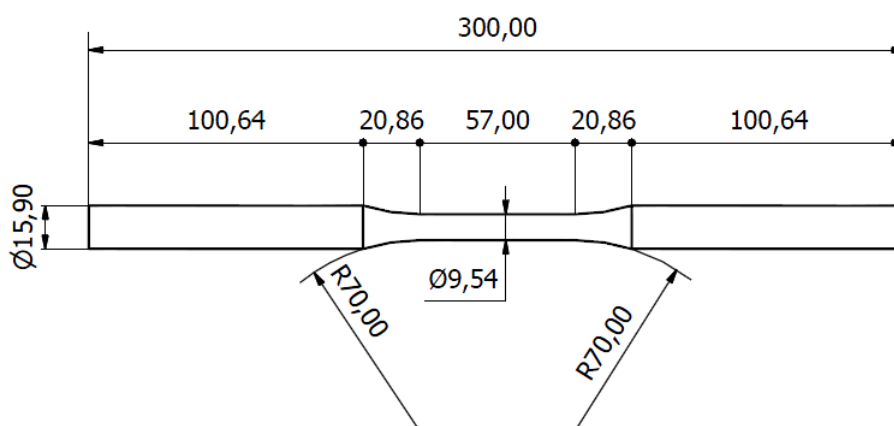


Figura 19. Dimensiones muestras Ensayo de Tracción – norma ASTM D-638.

Todas las muestras son verificadas que estén libres de defectos visibles, arañazos o imperfecciones (Figura 20).



Figura 20. Muestras Ensayo de Tracción.

3.1.1.3. Condiciones

Las pruebas fueron realizadas en condiciones atmosféricas estándar, cumpliendo con los valores que indica la norma que son 23 ± 2 °C y 50 ± 5 por ciento de humedad relativa.

De la misma manera el acondicionamiento de las muestras fue de 3 días (72 horas) con las mismas condiciones a las que se realizó las pruebas, este tiempo de acondicionamiento se empezó a contar a partir de que el maquinado fue finalizado.

3.1.1.4. Procedimiento

Primero, se realizó las mediciones del diámetro inicial y la longitud entre muescas en la zona de la probeta donde el diámetro es el menor llamado también la zona de prueba, para esto se utilizó un calibrador electrónico pie de rey con las siguientes especificaciones (Tabla 13):

Tabla 13*Especificaciones calibrador electrónico pie de rey.***Calibrador Electrónico**

Marca	Fowler
Origen	Estados Unidos
Modelo	Euro Cal
Rango	0 - 150 [mm]
Apreciación	0,01 [mm]

Para las mediciones del diámetro inicial se tomaron varios valores a lo largo de la zona de prueba siempre en dos puntos separados por 90°, los datos de diámetro y longitud inicial se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14*Diámetro y Longitud Inicial – muestras ensayo de tracción.*

No. Muestra	Diámetro Inicial [mm] - Do				Longitud Inicial [mm]
1	9,39	9,37	9,40	9,39	50,09
2	9,22	9,22	9,24	9,23	50,06
3	9,41	9,40	9,41	9,41	49,68
4	9,18	9,18	9,18	9,17	49,90
5	9,22	9,22	9,21	9,23	49,95
6	9,32	9,32	9,31	9,30	49,73
7	9,18	9,20	9,20	9,22	50,00
8	9,22	9,20	9,23	9,21	49,53
9	9,28	9,27	9,29	9,28	49,88
10	9,08	9,08	9,12	9,10	49,82
11	9,03	9,03	9,04	9,05	49,91
12	9,44	9,44	9,47	9,44	49,76
13	9,32	9,32	9,33	9,31	49,66
14	9,28	9,27	9,30	9,28	49,88
15	9,30	9,30	9,29	9,31	49,71

Segundo, se realizó el procedimiento para el cálculo del módulo de elasticidad, para ello se empezó colocando las muestras en el sistema de agarre de la máquina de manera

que el eje principal de la muestra de ensayo coincidía con la dirección de tracción a través de la línea central del conjunto de agarre.

Tercero, una vez que la muestra se encontraba bien sujeta se procedió a ubicar al extensómetro en la mitad de la zona de prueba (Figura 21).

Cuarto, se encendió el medidor de deformaciones unitarias y se retiró el seguro de las pinzas del extensómetro. En este procedimiento al ser este un instrumento tan sensible en el medidor de deformaciones unitarias ya había variación del valor, por ello esta medición fue tomada como valor de referencia.

Esta variación pudo haber ocurrido por la adaptación de las cuchillas de las pinzas del extensómetro en las imperfecciones superficiales de la muestra que no se pueden observar a simple vista, por ello dichos valores son bajos.



Figura 21. Conjunto montado para ensayo de tracción.

Quinto, se aplicó 4 cargas diferentes a todas las muestras, y se anotó la medición que proporcionaba el medidor de deformaciones unitarias para cada carga aplicada, obteniendo los resultados de la Tabla 15.

Tabla 15

Valores de deformación - ensayo de tracción.

Muestra	Referencia	Carga aplicada [kgf]			
		100	200	300	350
1	12	161	338	538	654
2	22	181	362	571	698
3	13	181	351	542	663
4	0	167	324	513	622
5	10	176	340	538	662
6	10	168	344	536	658
7	17	178	352	549	672
8	23	193	370	573	698
9	23	197	374	575	684
10	0	177	360	559	679
11	18	193	372	571	715
12	0	169	339	529	636
13	13	185	360	558	672
14	26	198	378	583	706
15	22	188	363	552	668

Valores proporcionados por el medidor de deformaciones unitarias.

Sexto, se volvió a montar las muestras de la misma forma indicada en el segundo paso, y se procedió a realizar los ensayos de tracción, esta vez hasta conseguir la rotura del material de prueba.

Séptimo, finalmente una vez terminada la prueba se realizó la medición del diámetro y longitud final mostrados en la Tabla 16, además se guardó todos los datos de fuerza y

desplazamiento registrados por el propio sistema de adquisición de datos de la máquina durante el ensayo, los mismos que se pueden ver en el Anexo 3.

Tabla 16

Diámetro y Longitud final – muestras ensayo de tracción.

No. Muestra	Diámetro final [mm] - Df				Longitud final [mm]
1	4,90	4,89	4,88	4,88	73,29
2	4,97	4,94	4,95	4,95	67,42
3	4,93	4,91	4,93	4,93	79,92
4	4,82	4,84	4,83	4,81	84,24
5	4,93	4,93	4,94	4,92	72,50
6	4,97	4,98	4,97	4,97	67,85
7	4,83	4,82	4,83	4,83	88,67
8	4,91	4,92	4,92	4,91	71,01
9	4,96	4,97	4,96	4,96	67,51
10	4,91	4,96	4,94	4,94	65,16
11	4,78	4,80	4,78	4,78	76,73
12	5,04	5,02	5,02	5,04	71,05
13	4,95	4,93	4,95	4,93	67,20
14	4,88	4,89	4,89	4,87	72,50
15	5,00	4,99	5,00	4,99	64,66

3.1.1.5. Cálculos

a) El cálculo de la resistencia a la tracción se realizó mediante la siguiente expresión:

Ecuación 3 Esfuerzo de tracción.

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

Donde:

- σ es el valor de la resistencia a la tracción, en [Pa].
- F es la medición de la carga máxima aplicada, en [N].
- A es el área de la sección transversal inicial, en [mm²].

Este valor se expresará con tres cifras significativas.

b) El cálculo de la elongación se realizó mediante la siguiente expresión:

Ecuación 4 Elongación por tracción.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_0}{l_0} = \frac{l_f - l_0}{l_0}$$

Donde:

- ε es el valor de la elongación.
- Δl_0 es el aumento en la longitud de la muestra, en [mm].
- l_0 es la longitud inicial de la muestra, en [mm].

Este valor se expresará como porcentaje.

c) El cálculo del módulo de elasticidad se realizó mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 5 Módulo de elasticidad a la tracción.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

Donde:

- E es el módulo de elasticidad por tracción, en [Pa].
- σ_2 es el esfuerzo de tracción medido a una deformación ε_2 .
- σ_1 es el esfuerzo de tracción medido a una deformación ε_1 .

Este valor se lo debe calcular con los esfuerzos y deformaciones que están en la zona elástica del material.

3.1.1.6. Reporte

a) Esfuerzo de tracción máximo.

Antes de todos los cálculos realizados cabe aclarar que el esfuerzo máximo que se obtendrá a continuación corresponde al esfuerzo de ingeniería ya que en la ecuación 3 se sustituyó al área resultante del diámetro inicial.

De esta manera primero se obtuvo la media del diámetro inicial de la zona de prueba de las muestras, utilizando los datos de la Tabla 14.

El cálculo del esfuerzo máximo se realizó con la carga máxima soportada por las muestras durante los ensayos, y reemplazando dichos valores en la ecuación 3.

Por ejemplo: Cálculo del esfuerzo máximo para la muestra 1.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$
$$\sigma = \frac{5400,8 [N]}{69,2 [mm^2]}$$
$$\sigma = 78,0 [MPa]$$

A continuación, se muestra la Tabla 17 con los esfuerzos máximos para las muestras ensayadas a tracción.

Tabla 17*Esfuerzo de Tracción Máximo.*

No. Muestra	Fuerza Máxima [kgf]	Fuerza Máxima [N]	Do [mm]	Ao [mm ²]	Esfuerzo Máximo [MPa]
1	550,7	5400,8	9,39	69,21	78,0
2	530,3	5200,9	9,23	66,87	77,8
3	520,4	5103,6	9,41	69,51	73,4
4	513,6	5037,0	9,18	66,15	76,1
5	507,9	4980,6	9,22	66,77	74,6
6	539,8	5293,2	9,31	68,11	77,7
7	510,5	5006,2	9,20	66,48	75,3
8	529,8	5195,8	9,22	66,69	77,9
9	529,8	5195,8	9,28	67,64	76,8
10	490,6	4811,5	9,10	64,97	74,1
11	510,5	5006,2	9,04	64,15	78,0
12	549,2	5385,4	9,45	70,10	76,8
13	529,8	5195,8	9,32	68,22	76,2
14	521,5	5113,8	9,28	67,67	75,6
15	529,8	5195,8	9,30	67,93	76,5

Los diagramas de esfuerzo de ingeniería – deformación unitaria de los valores obtenidos en los ensayos para cada probeta (Anexo 3), se muestran a continuación.

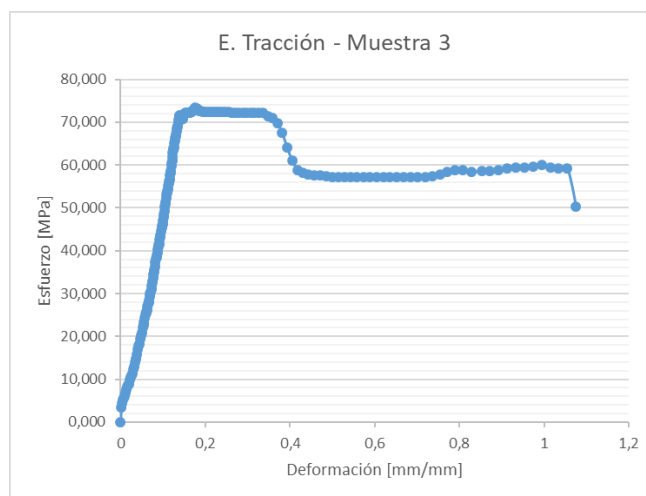
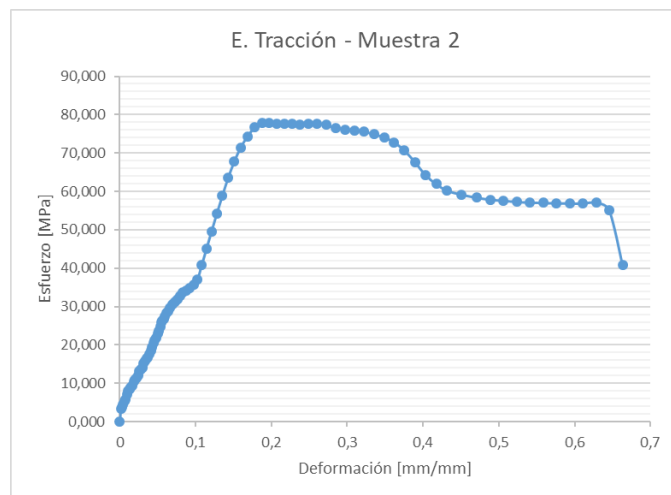
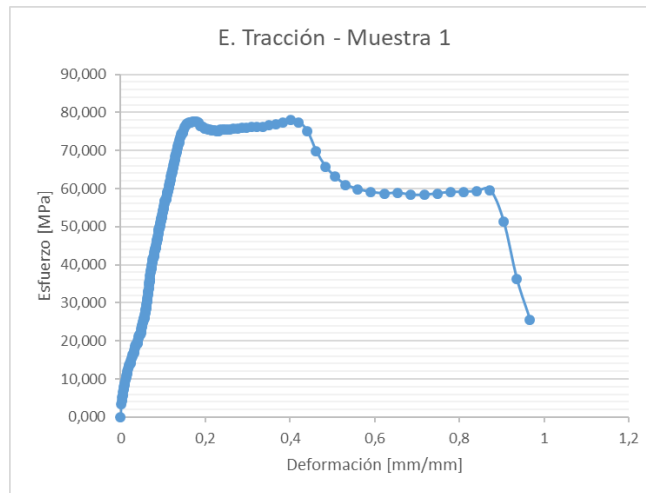


Figura 22. Diagramas esfuerzo de ingeniería – def. unitaria, ensayos de tracción muestras 1-3.



Figura 23. Diagramas esfuerzo de ingeniería – def. unitaria, ensayos de tracción muestras 4-6.



Figura 24. Diagramas esfuerzo de ingeniería – def. unitaria, ensayos de tracción muestras 7-9.

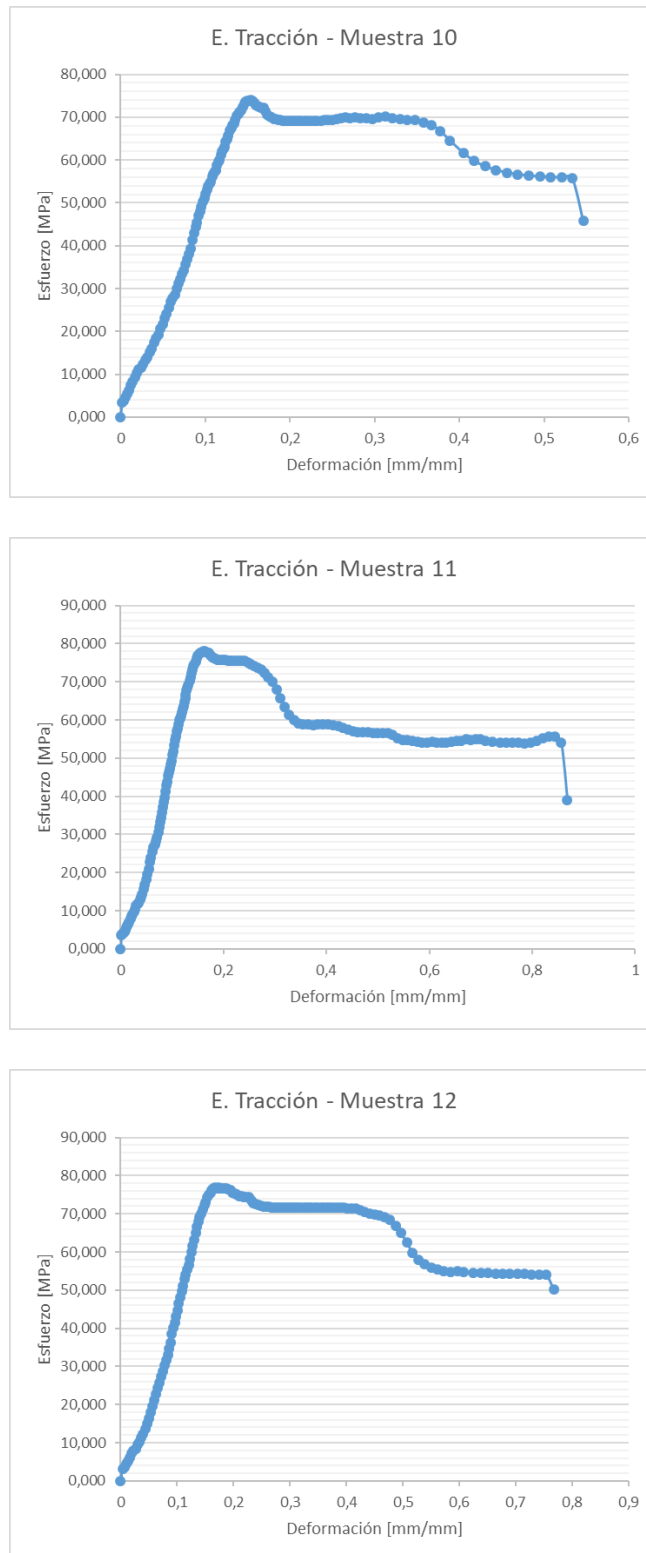


Figura 25. Diagramas esfuerzo de ingeniería – def. unitaria, ensayos de tracción muestras 10-12.

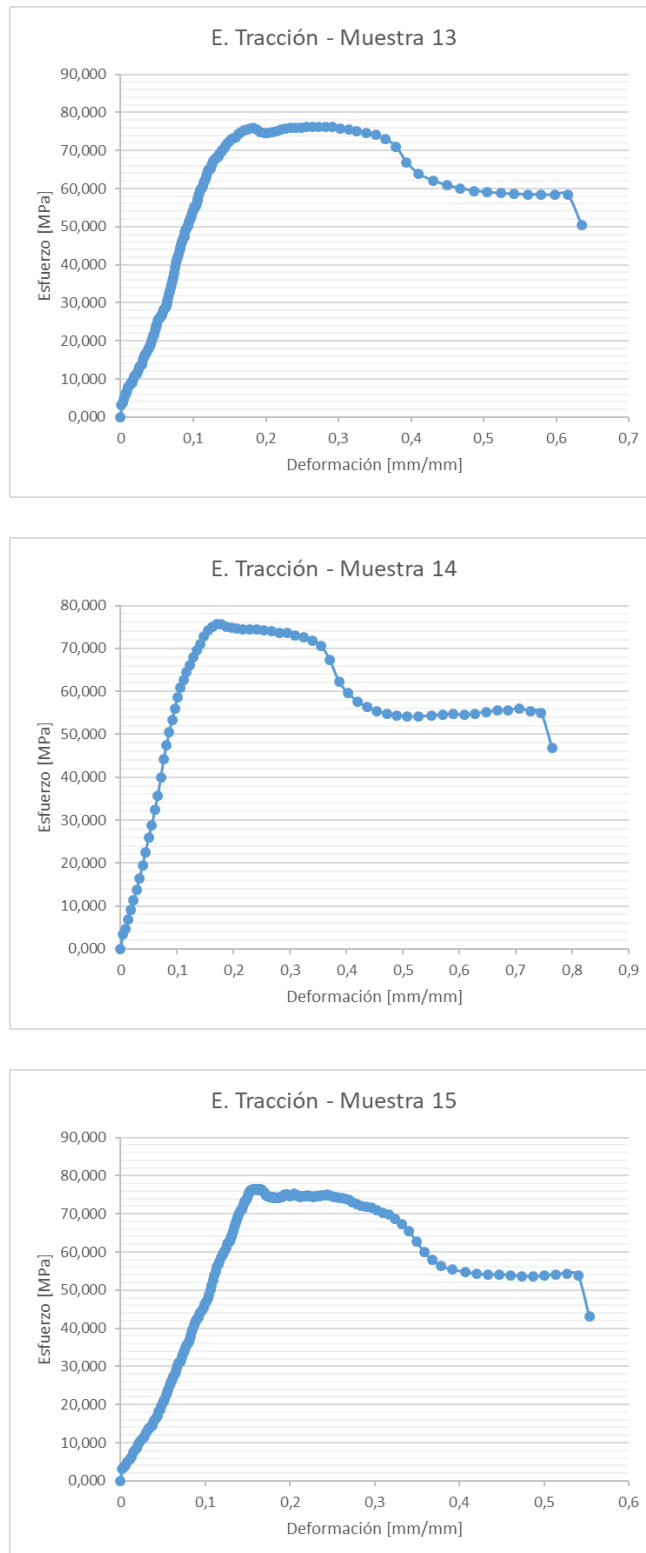


Figura 26. Diagramas esfuerzo de ingeniería – def. unitaria, ensayos de tracción muestras 13-15.

Como se puede observar en los diagramas esfuerzo de ingeniería vs deformación unitaria de las Figuras (22-26), una vez se alcanza el esfuerzo máximo existe un comportamiento de fluencia en donde el material soporta un esfuerzo de tracción constante a medida que aumenta su deformación.

Estos valores se los puede ver claramente resaltados en color naranja en los datos de tracción del Anexo 3. Estas fuerzas se las utilizará como la medida del límite de fluencia para el duralón, los mismos que se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18

Esfuerzo de Fluencia a Tracción.

No. Muestra	Fuerza Fluencia [kgf]	Fuerza Fluencia [N]	Do [mm]	Ao [mm ²]	Esfuerzo Fluencia [MPa]
1	533,0	5226,5	9,39	69,21	75,5
2	529,8	5195,8	9,23	66,87	77,7
3	512,1	5021,6	9,41	69,51	72,2
4	512,1	5021,6	9,18	66,15	75,9
5	494,3	4847,4	9,22	66,77	72,6
6	529,8	5195,8	9,31	68,11	76,3
7	494,3	4847,4	9,20	66,48	72,9
8	512,1	5021,6	9,22	66,69	75,3
9	512,1	5021,6	9,28	67,64	74,2
10	458,2	4493,8	9,10	64,97	69,2
11	494,3	4847,4	9,04	64,15	75,6
12	548,1	5375,1	9,45	70,10	76,7
13	529,3	5190,7	9,32	68,22	76,1
14	521,5	5113,8	9,28	67,67	75,6
15	514,7	5047,2	9,30	67,93	74,3

b) Porcentaje de elongación a la rotura.

Para el cálculo del porcentaje de elongación a la rotura se utilizó la ecuación 4, sustituyendo los datos de longitud inicial y final de las tablas 14 y 16 respectivamente.

Ejemplo: Porcentaje de elongación para la muestra 1.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_0}{l_0} = \frac{l_f - l_0}{l_0}$$

$$\varepsilon = \frac{73,29 - 50,09}{50,09} \times 100 \%$$

$$\varepsilon = 46,31 \%$$

Los resultados obtenidos se muestran a continuación en la Tabla 19.

Tabla 19

Porcentaje de Elongación - ensayo de tracción.

No. Muestra	Elongación por tracción	Porcentaje Elongación [%]
1	0,4632	46,3
2	0,3468	34,7
3	0,6087	60,9
4	0,6882	68,8
5	0,4515	45,1
6	0,3644	36,4
7	0,7734	77,3
8	0,4337	43,4
9	0,3534	35,3
10	0,3079	30,8
11	0,5374	53,7
12	0,4279	42,8
13	0,3532	35,3
14	0,4535	45,3
15	0,3007	30,1

c) Módulo de elasticidad

Para el cálculo del módulo de elasticidad se realizaron las siguientes operaciones.

Primero, se transformó a milímetros los valores mostrados por el medidor de deformaciones unitarias de la Tabla 15, sustituyendo dichos valores en la ecuación 2 correspondiente a la curva de la característica estática del Extensómetro MTS, estos resultados se pueden observar en la Tabla 21.

Ejemplo: Deformación en milímetros para la muestra 1 cuando se aplica 100 [kgf].

$$y = 0,0006x + 25,035$$

$$y = 0,0006 x (161) + 25,035$$

$$y = 25,1316 [mm]$$

Segundo, se calculó la deformación unitaria utilizando la ecuación 4, con esto se obtuvo ε_1 (entre las deformaciones cuando las cargas son 0 y 100 [kgf]), ε_2 (entre las deformaciones cuando las cargas son 100 y 200 [kgf]), ε_3 (entre las deformaciones cuando las cargas son 200 y 300 [kgf]) y ε_4 (entre las deformaciones cuando las cargas son 300 y 350 [kgf]).

Ejemplo: Deformación unitaria ε_1 para la muestra 1.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_0}{l_0} = \frac{l_f - l_0}{l_0}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{25.1316 - 25.0422}{25.0422}$$

$$\varepsilon_1 = 0.00356997$$

Tercero, se calculó para todas las muestras el esfuerzo de tracción aplicado con las diferentes cargas.

El cálculo del módulo de elasticidad se lo puede realizar utilizando la ecuación 5, y sustituyendo los valores respectivos de esfuerzo – deformación que se muestran en la Tabla 21.

Pero en el presente trabajo para obtener un resultado que represente mejor los valores obtenidos en la práctica y así no desperdiciar datos se procedió a graficar el diagrama de esfuerzo – deformación unitaria en la zona plástica para las diferentes cargas aplicadas, utilizando los datos de la Tabla 21.

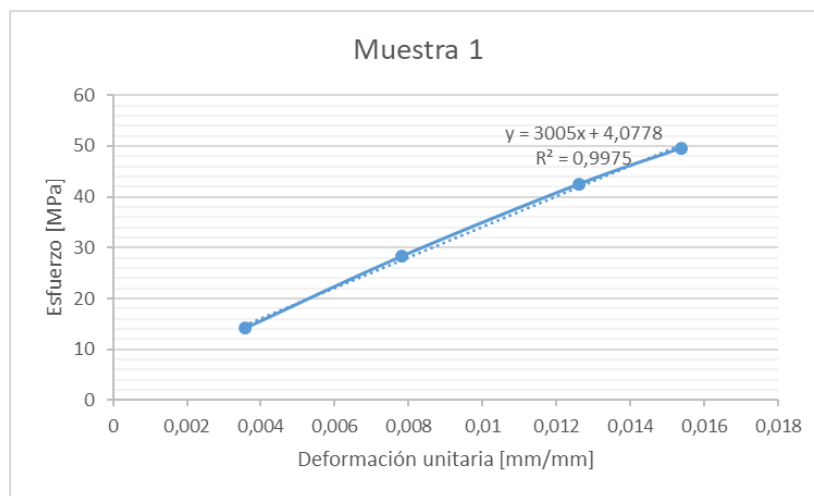


Figura 27. Diagrama esfuerzo - deformación en la zona elástica para muestra 1.

Una vez se realizó el diagrama se procedió a obtener la ecuación de la recta que más se ajusta a los puntos graficados (Figura 27), la pendiente de dicha recta es el valor del módulo de elasticidad que se utilizó como resultado, el mismo procedimiento se realizó para las demás muestras.

A continuación, se presentan en la Tabla 20 los resultados del módulo de elasticidad obtenidos.

Tabla 20

Módulo de Elasticidad a la Tracción.

Muestra	Módulo de Elasticidad [MPa]
1	3005,0
2	2968,6
3	3071,3
4	3394,6
5	3158,3
6	3087,3
7	3131,0
8	3049,9
9	3104,6
10	3153,0
11	3087,2
12	3129,0
13	3085,2
14	2986,3
15	3158,4

Tabla 21

Deformación unitaria y esfuerzo aplicado con diferentes cargas.

Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Deformación de las muestras bajo diferentes cargas [mm]														
Ref. - 0 [kgf]	25,0422	25,0482	25,0428	25,035	25,041	25,041	25,0452	25,0488	25,0488	25,035	25,0458	25,035	25,0428	25,0506	25,0482
100 [kgf]	25,1316	25,1436	25,1436	25,1352	25,1406	25,1358	25,1418	25,1508	25,1532	25,1412	25,1508	25,1364	25,146	25,1538	25,1478
200 [kgf]	25,2378	25,2522	25,2456	25,2294	25,239	25,2414	25,2462	25,257	25,2594	25,251	25,2582	25,2384	25,251	25,2618	25,2528
300 [kgf]	25,3578	25,3776	25,3602	25,3428	25,3578	25,3566	25,3644	25,3788	25,38	25,3704	25,3776	25,3524	25,3698	25,3848	25,3662
350 [kgf]	25,4274	25,4538	25,4328	25,4082	25,4322	25,4298	25,4382	25,4538	25,4454	25,4424	25,464	25,4166	25,4382	25,4586	25,4358
	Deformación Unitaria														
E1	0,00356997	0,00380866	0,00402511	0,0040024	0,00397748	0,00378579	0,00385703	0,00407205	0,00416786	0,00424206	0,00419232	0,00405033	0,00412094	0,00411966	0,00397633
E2	0,00781082	0,0081443	0,00809814	0,00776513	0,00790703	0,0080288	0,00802549	0,00831178	0,00840759	0,00862792	0,00848046	0,00812463	0,00831377	0,00843094	0,00816825
E3	0,01260273	0,01315065	0,0126743	0,01229479	0,01265125	0,01260333	0,01274496	0,01317428	0,01322219	0,01339724	0,01324773	0,01267825	0,01305765	0,013341	0,01269552
E4	0,01538204	0,01619278	0,01557334	0,01490713	0,01562238	0,01552654	0,01569163	0,01616844	0,01588309	0,01627322	0,01669741	0,01524266	0,01578897	0,01628704	0,01547417
	Esfuerzo [Mpa]														
980,665 [N]	14,168729	14,6643456	14,1085487	14,8245667	14,6882127	14,3978692	14,7521439	14,7041565	14,4988929	15,0947313	15,2874192	13,9893325	14,374706	14,4910842	14,4365991
1961,33 [N]	28,337458	29,3286911	28,2170973	29,6491334	29,3764253	28,7957383	29,5042878	29,4083129	28,9977858	30,1894627	30,5748383	27,978665	28,7494119	28,9821683	28,8731982
2941,995 [N]	42,506187	43,9930367	42,325646	44,4737	44,064638	43,1936075	44,2564316	44,1124694	43,4966787	45,284194	45,8622575	41,9679975	43,1241179	43,4732525	43,3097974
3432,327 [N]	49,5905515	51,3252095	49,3799203	51,8859834	51,4087444	50,3925421	51,6325036	51,4645476	50,7461251	52,8315597	53,5059671	48,9626638	50,3114708	50,7187945	50,5280969

3.1.2. Ensayo de Flexión (ASTM D 790)

La resistencia a la flexión es la capacidad del material para soportar dichas fuerzas aplicadas perpendicularmente a su eje longitudinal. Las tensiones inducidas por la carga son una combinación de esfuerzos de compresión, tracción y cizalla.

Las propiedades de flexión se calculan en términos de la tensión y deformación máxima que se producen en la superficie exterior de la probeta de prueba. Muchos polímeros no se rompen incluso después de una gran deformación lo que hace imposible la determinación de la resistencia final a la flexión. En tales casos, la práctica común es reportar el rendimiento al esfuerzo de flexión, cuando la deformación máxima en la fibra exterior de la muestra ha alcanzado el 5 por ciento.

El método más empleado para realizar ensayos de flexión en plásticos y el que se utilizó en el presente trabajo consiste en un sistema de tres puntos de carga. En éste la muestra se apoya en dos soportes y la carga la realiza un punzón situado entre los soportes (Figura 28). Este método es usado específicamente para determinar las propiedades a la flexión para control de calidad y propósitos específicos. (Shah, 2007)

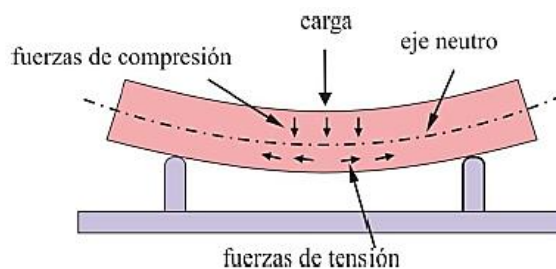


Figura 28. Fuerzas implicadas en los Ensayos de Flexión.
Fuente: (Marcilla Gomis & Beltrán Rico, 2012)

La norma que se tomará como guía para realizar un correcto ensayo de flexión es la ASTM D 790 “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials”. (American Society for Testing and Materials, 2003)

Dentro de la ASTM D 790 existen dos métodos de prueba de los cuales se trabajó con el Procedimiento B, el mismo que está diseñado especialmente para aquellos materiales que sufren grandes deformaciones durante las pruebas.

A continuación, se indican las condiciones con las que se realizó las pruebas, las mismas que se trataron de seguir a la norma en la manera más precisa posible.

3.1.2.1. Equipos

a) Máquina de Ensayo

Para los ensayos de flexión se utilizó la máquina de Ensayos Universales MTS, ubicada en el Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE (Figura 29).



Figura 29. Máquina de Ensayos Universales MTS.

La máquina se encuentra en correcto funcionamiento, sus especificaciones técnicas se muestran a continuación en la Tabla 22:

Tabla 22

Especificaciones Máquina de Ensayos Universales MTS.
Máquina de Ensayos Universales MTS

Marca	MTS	Ciclos	60 [Hz]
Modelo	T 5002	Peso	300 [kg]
Voltaje	110/220 [V]	Capacidad Máxima	5000 [N]
Fases	1	Velocidad Máxima Motor	20 [plg/min]

b) Componentes

El laboratorio cuenta con los componentes necesarios para realizar los ensayos, estos son el soporte y el puntero mismos que se adaptaron a la máquina a su base y brazo móvil respectivamente (Figura 30).



Figura 30. Soporte y Punzón para ensayo de flexión.

La norma indica que los componentes deben tener superficies de contacto cilíndricas cuyas dimensiones van a depender del espesor de la muestra, para el presente trabajo el espesor utilizado fue de 10 [mm].

De esta manera para el soporte el radio mínimo debe ser de 3,2 [mm] y el máximo de 16 [mm], y para el puntero el radio mínimo debe ser de 3,2 [mm] y el máximo de 40[mm]. Además, la distancia entre superficies de contacto del soporte fue de 16 veces (tolerancia ± 1) el espesor de la muestra de prueba.

Los dos componentes con lo que cuenta el laboratorio tienen superficies cilíndricas con un radio de 9,49 [mm], y en el caso del soporte la distancia entre superficies de contacto es regulable, esta se ajustó a 160 [mm], cumpliendo así con las condiciones indicadas anteriormente.

3.1.2.2. Muestra de Prueba

El material utilizado para los ensayos fue comprado a una de las empresas con más renombre en la Provincia de Pichincha (cuentan con ficha técnica del material), todas las muestras fueron obtenidas del mismo lote de venta del material que se comercializa bajo el nombre de Nylon 6A.

Todas las muestras se cortaron en dirección paralela a la longitud más larga de la plancha, cuyo espesor es de 10 [mm], con esto se aseguró que las superficies que estarán sometidas a los mayores esfuerzos de tracción y compresión sean originales y no mecanizadas.

Las muestras tienen forma rectangular y sus dimensiones son las siguientes (Figura 31):

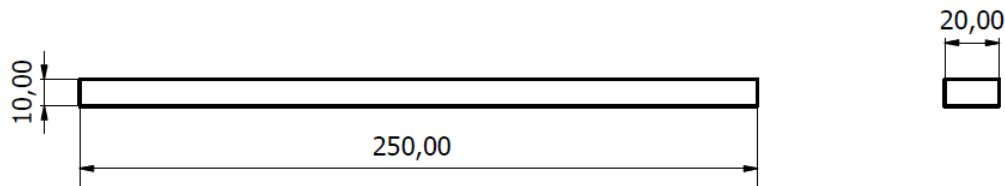


Figura 31. Dimensiones muestras Ensayo de Flexión.

La longitud de la muestra es de 250 [mm], lo suficientemente larga para sobrepasar en un 10 % en cada uno de sus extremos a la distancia entre soportes.

Y el ancho de 20 [mm] es el adecuado para no exceder en un cuarto la distancia entre soportes, estas dos condiciones son aclaradas por la norma y fueron cumplidas en las muestras ensayadas (Figura 32).



Figura 32. Muestras para Ensayo de Flexión.

3.1.2.3. Condiciones

Las pruebas fueron realizadas en condiciones atmosféricas estándar, cumpliendo con los valores que indica la norma que es 23 ± 2 °C y 50 ± 5 por ciento de humedad relativa.

De la misma manera el acondicionamiento de las muestras fue de 3 días (72 horas) con las mismas condiciones a las que se realizó las pruebas, este tiempo de

acondicionamiento se empezó a contar a partir del momento en que las muestras se cortaron de la plancha.

3.1.2.4. Procedimiento

Primero, se midió el ancho y espesor de las muestras en la sección que posteriormente se ubicó en la mitad de la longitud entre los soportes, para esto se utilizó un calibrador electrónico pie de rey cuyas especificaciones están en la (Tabla 13), los valores obtenidos fueron los siguientes (Tabla 23):

Tabla 23

Ancho y espesor - muestras de flexión.

Muestra	Ancho [mm]	Espesor [mm]
1	21,11	10,55
2	20,32	10,71
3	20,43	10,89
4	20,27	10,73
5	20,69	10,66
6	20,02	10,53
7	20,81	10,45
8	21,27	10,61
9	20,98	10,76
10	20,36	10,74
11	21,17	10,68
12	20,5	10,48
13	20,69	10,45
14	20,73	10,48
15	20,79	10,58

Segundo, se calculó la velocidad del brazo móvil de la máquina con la siguiente ecuación.

Ecuación 6 Velocidad del brazo móvil, ensayo flexión.

$$R = \frac{ZL^2}{6d}$$

Donde:

- R es la velocidad de movimiento del brazo móvil, en [mm/min].
- L es la longitud entre soportes, en [mm].
- d es el espesor de la muestra, en [mm].
- Z es la tasa de deformación en la fibra externa, en [mm/mm/min].

En el caso del procedimiento B el valor de Z es de 0,10 [mm/mm/min].

$$R = \frac{0,10 \times 160^2}{6 \times 10}$$

$$R = 42,66 \left[\frac{mm}{min} \right]$$

Para controlar la velocidad del brazo móvil de la máquina, el operador debe fijar una frecuencia al motor antes de empezar el ensayo, de esta manera la máquina es capaz de mantener una velocidad constante.

La frecuencia para mantener la velocidad calculada es de 402 [Hz], misma que se usó para todas las pruebas, además se verificó y comprobó que esta velocidad se mantenga constante dentro de la tolerancia recomendada que es de $\pm 4,26$ [mm/min].

Tercero, se calibró la celda de carga de la máquina, para que los datos de la fuerza que se van guardando simultáneamente sean los correctos (Figura 33).



Figura 33. Calibración de la celda de carga de la máquina.

Cuarto, se adaptó el soporte y el puntero (punzón) a la base y brazo móvil de la máquina respectivamente.

Las muestras se colocaron en los soportes y se bajó al puntero hasta que pudo estar cerca del contacto con la superficie de la muestra, sin que empiece a aplicar carga sobre la misma.



Figura 34. Muestra antes y después de la prueba.

Según la norma ASTM D-790 apartado 10, el ensayo debe terminar cuando la deformación máxima en la superficie externa de la muestra ha alcanzado el 5% lo que equivale a 0,05 mm/mm, o si la muestra se rompe antes de llegar a la deformación máxima (Figura 34).

La deflexión que se produce cuando ocurre esta deformación máxima se calculó con la siguiente expresión:

Ecuación 7 Deflexión producida por la deformación máxima.

$$D = \frac{rL^2}{6d}$$

Donde:

- D es la deflexión en el centro del tramo de los soportes, en [mm].
- r es la deformación máxima, se toma el valor de 0,05 [mm/mm].
- d es el espesor de la muestra, en [mm].
- L es la distancia entre soportes, en [mm].

$$D = \frac{0,05 \times 160^2}{6 \times 10}$$

$$D = 21,33 [mm]$$

Finalmente, se empezó a realizar los ensayos, pero debido a que las muestras no se rompían y la deflexión a la cual la norma sugiere detener la prueba era muy pequeña, los ensayos tuvieron final en el momento en el que la fuerza empezó a descender, esto con el fin de poder obtener la fuerza máxima que resiste el duralón a la flexión.

Los datos obtenidos durante los ensayos se pueden observar en el Anexo 4.

3.1.2.5. Cálculos

- a) El esfuerzo máximo de flexión es calculado en la superficie externa de la muestra que es en el punto medio de la misma y se calculó con la siguiente expresión:

Ecuación 8 Esfuerzo de Flexión.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Donde:

- σ_f es el esfuerzo de flexión en la fibra externa en el punto medio, en [Mpa].
- P es la carga aplicada, en [N].
- L es la distancia entre apoyos, en [mm].
- b es el ancho de la muestra, en [mm].
- d es el espesor de la muestra, en [mm].

- b) El Módulo de Elasticidad se calculó con la siguiente expresión:

Ecuación 9 Módulo de Elasticidad por flexión.

$$E_B = \frac{L^3 m}{4bd^3}$$

Donde:

- E_B es el módulo de elasticidad a flexión, en [MPa].
- L es la distancia entre apoyos, en [mm].
- d es el espesor de la muestra, en [mm].
- b es el ancho de la muestra, en [mm].
- m es la pendiente de la tangente en la porción de línea recta inicial más empinada de la curva carga – deflexión, en [N/mm].

3.1.2.6. Reporte

a) Esfuerzo máximo de flexión

Se calculó sustituyendo en la ecuación 8 los valores de la carga máxima alcanzados durante los ensayos, junto con los valores de espesor y ancho de cada muestra indicados en la (Tabla 23).

Ejemplo: Esfuerzo máximo por flexión para la muestra 1.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2}$$

$$\sigma_f = \frac{3 \times 724,80 \times 160}{2 \times 21,11 \times 10,55^2}$$

$$\sigma_f = 74,035 \text{ [MPa]}$$

Los resultados obtenidos son los siguientes (Tabla 24):

Tabla 24

Esfuerzo Máximo de Flexión.

Muestra	Carga Máxima Aplicada [N]	Esfuerzo de Flexión [MPa]
1	724,5	74,0
2	795,0	81,9
3	803,1	79,6
4	789,2	81,2
5	778,5	79,5
6	722,5	78,1
7	733,7	77,5
8	787,8	79,0
9	783,5	77,4
10	762,7	77,9
11	806,0	80,1
12	739,0	78,8

CONTINÚA

13	723,8	76,9
14	756,8	79,8
15	770,8	79,5

Los diagramas de esfuerzo – desplazamiento de los valores obtenidos en los ensayos para cada probeta (Anexo 4), se muestran en las Figuras 35 – 39 como se observan a continuación.

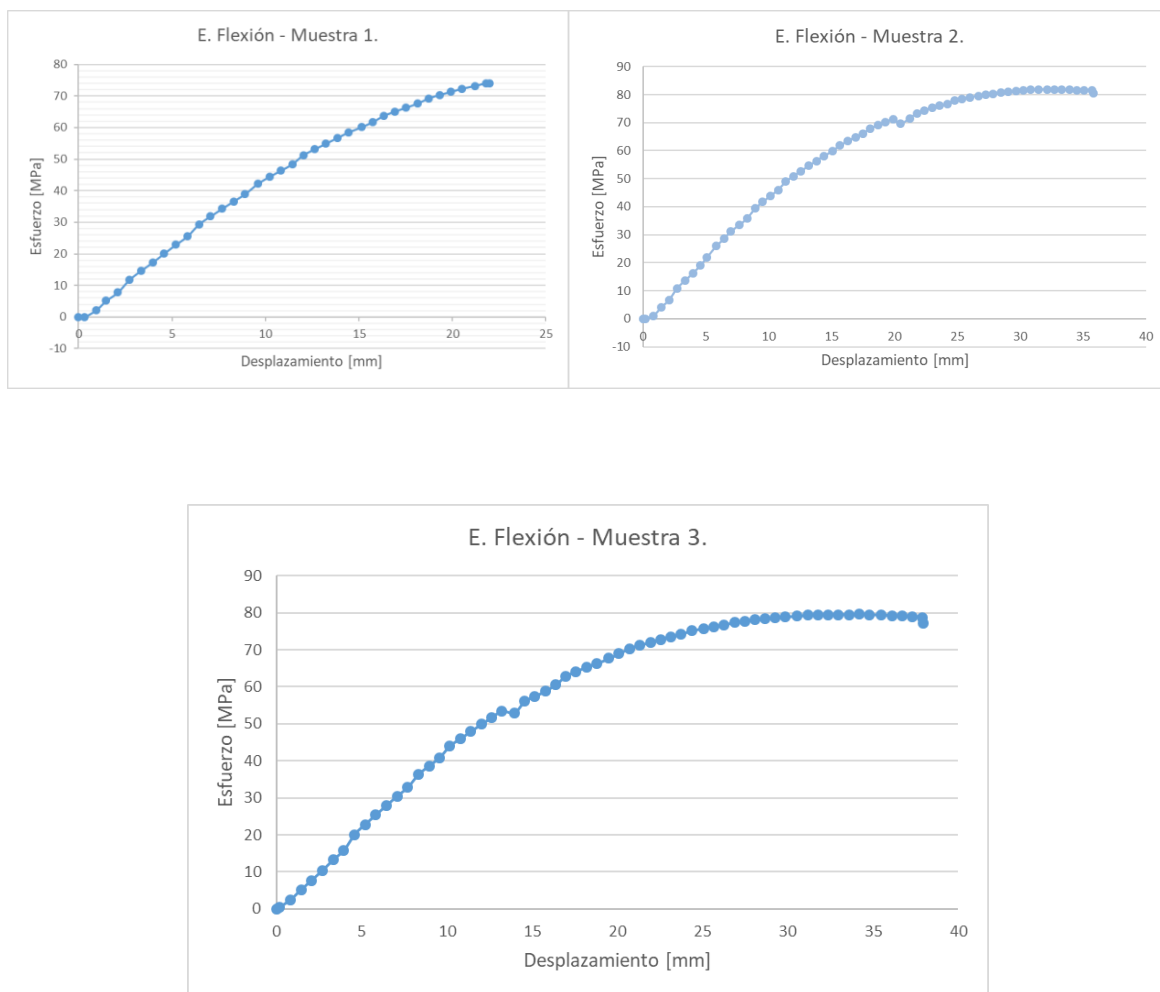


Figura 35. Diagrama esfuerzo – desplazamiento ensayo de flexión, muestra 1-3.

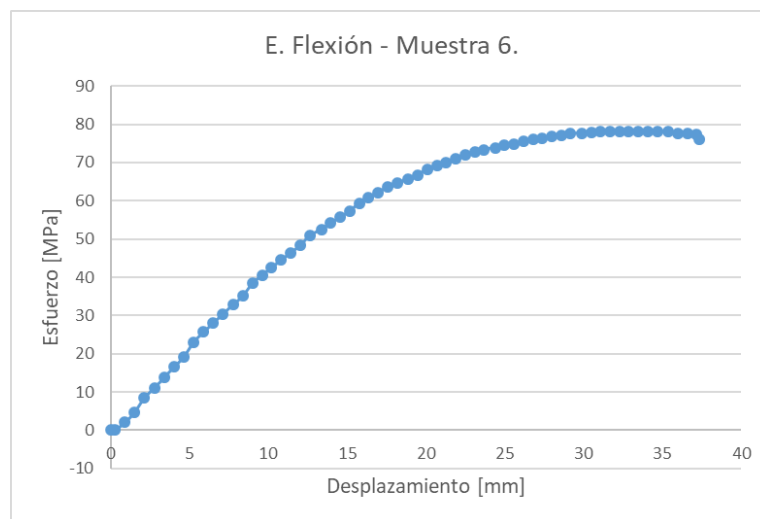
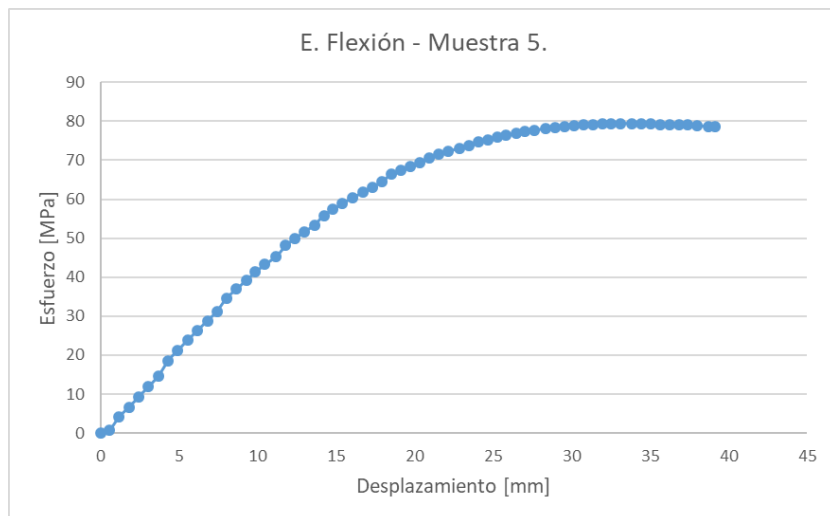
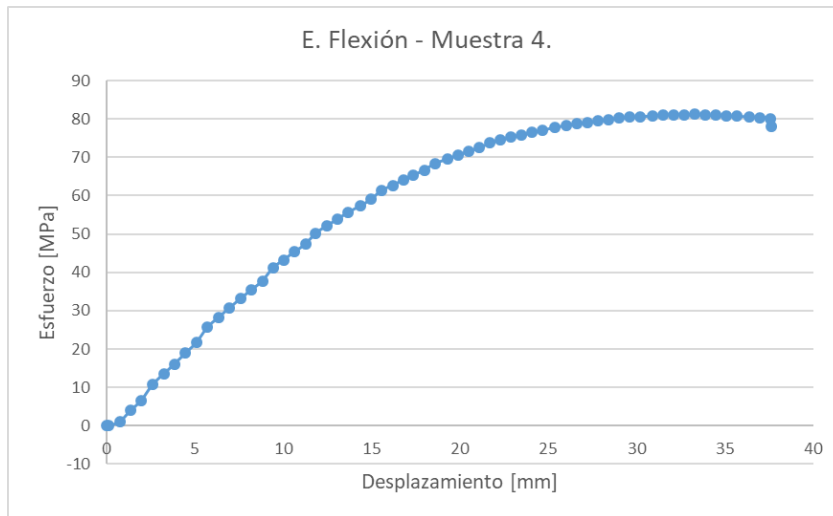


Figura 36. Diagrama esfuerzo – desplazamiento ensayo de flexión, muestra 4-6.

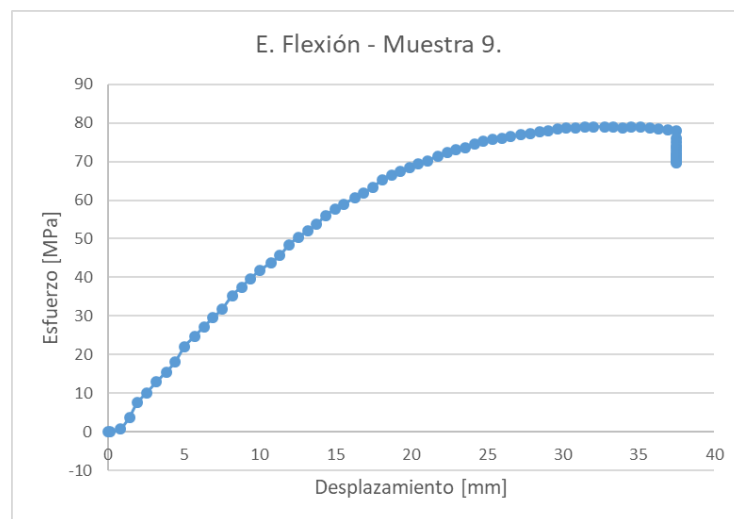
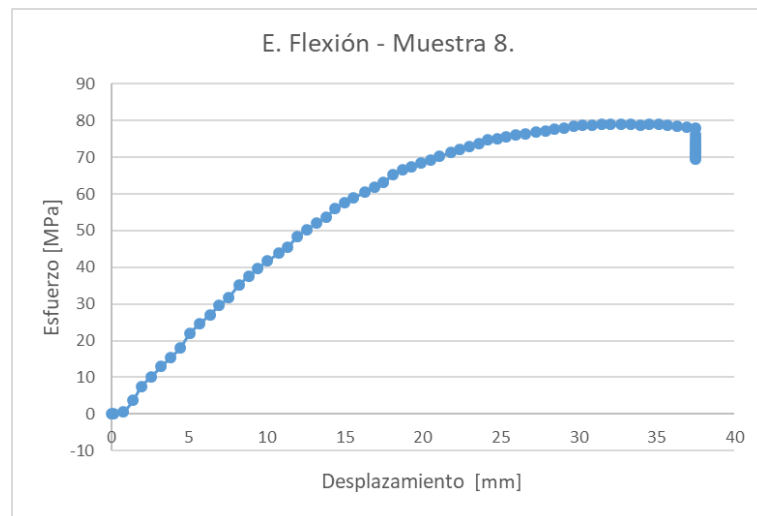
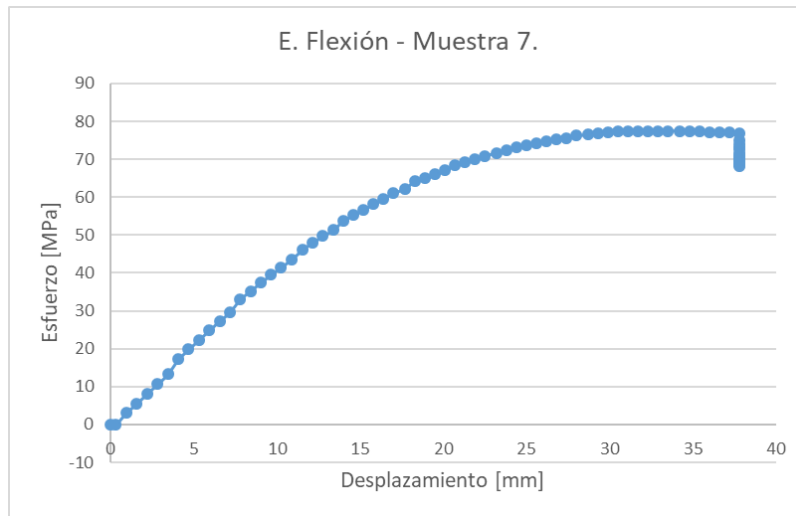


Figura 37. Diagrama esfuerzo – desplazamiento ensayo de flexión, muestra 7-9.

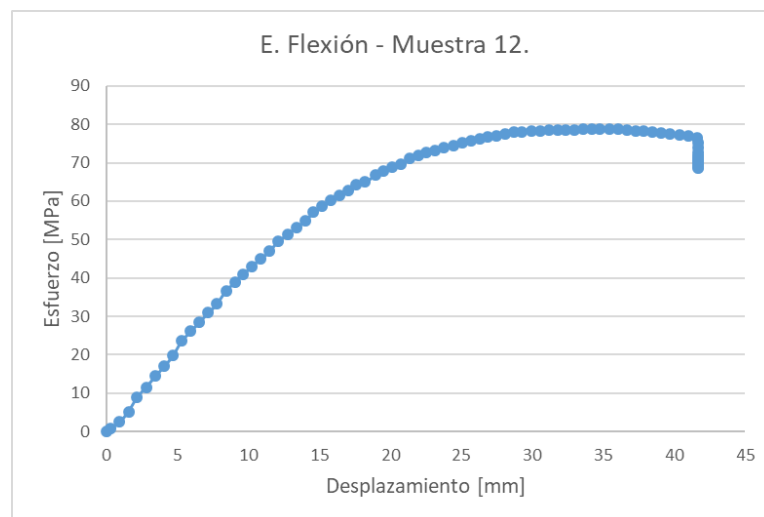
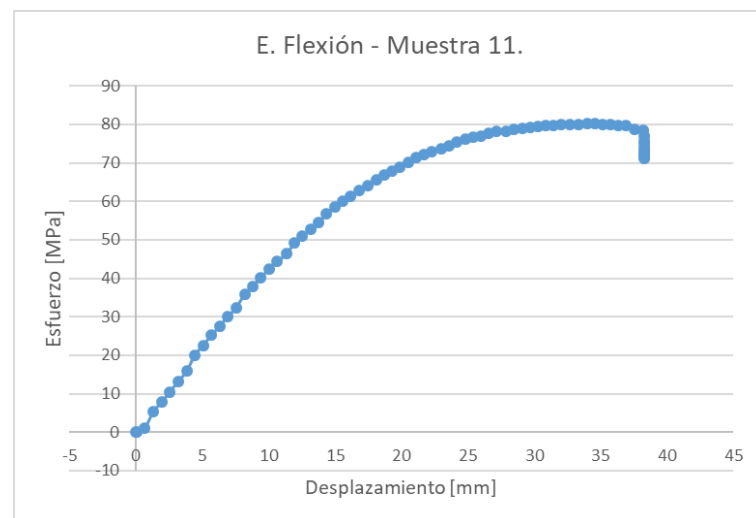
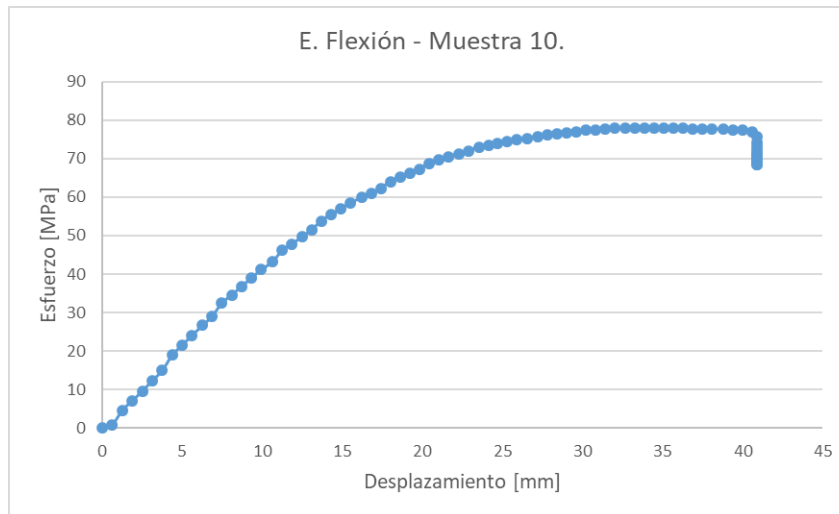


Figura 38. Diagrama esfuerzo – desplazamiento ensayo de flexión, muestra 10-12.

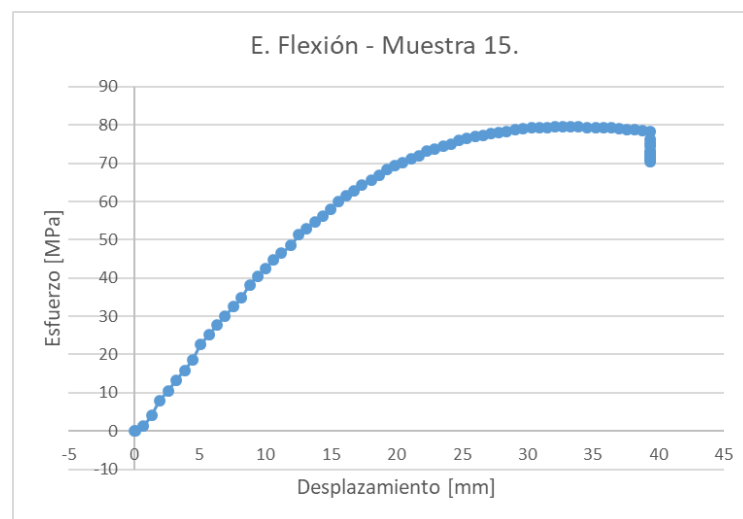
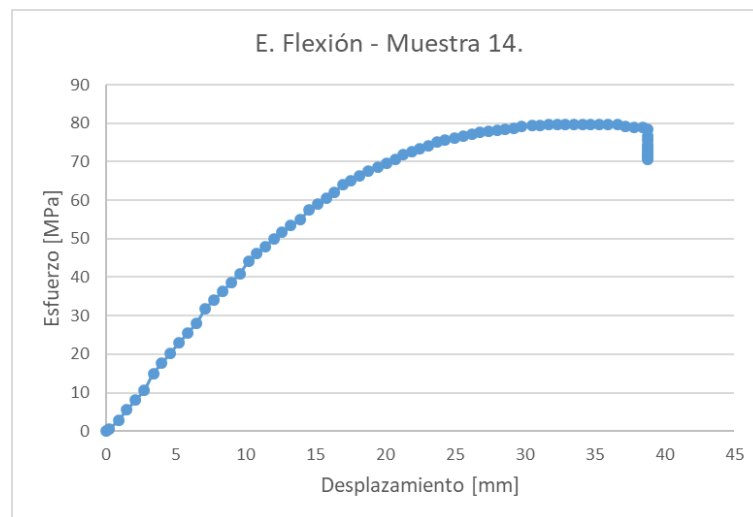
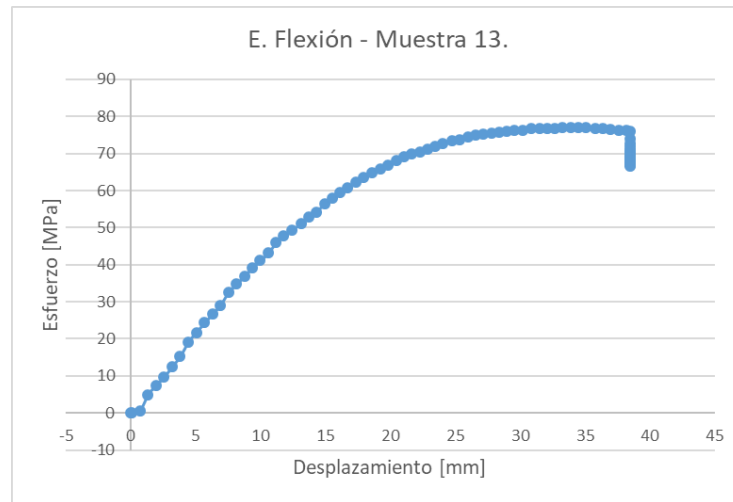


Figura 39. Diagrama esfuerzo – desplazamiento ensayo de flexión, muestra 13-15.

El límite de proporcionalidad es el punto donde el esfuerzo máximo aplicado se mantiene directamente proporcional a la deformación que sufre la muestra, y por lo tanto la curva (esfuerzo – deformación) permanece como una línea recta, como se observa en los diagramas este valor no es muy marcado debido al comportamiento del material durante los ensayos, así que su selección es de criterio único del autor.

A continuación, en la Figura 40 se presenta el diagrama esfuerzo – desplazamiento para la muestra 1, con el cual se realizó el análisis para la selección de dicho valor.

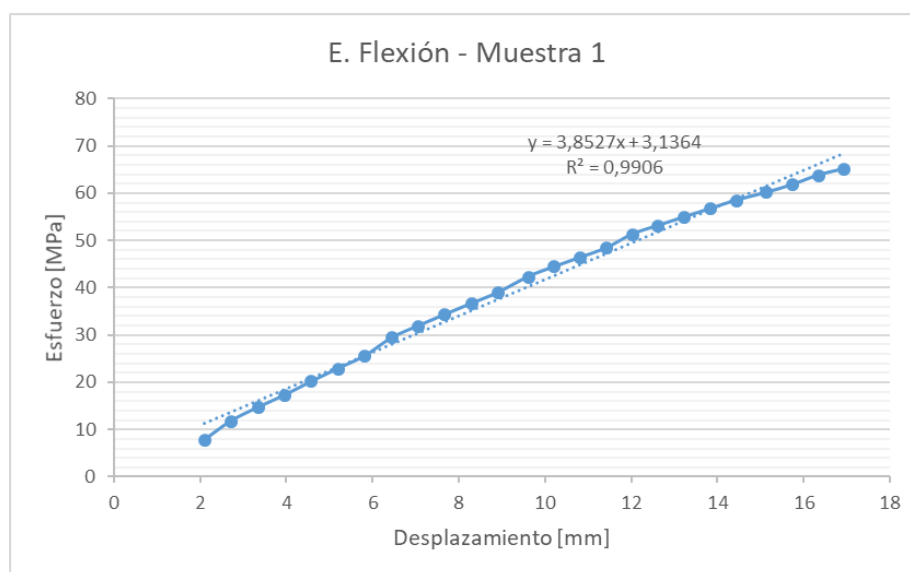


Figura 40. Análisis esfuerzo - desplazamiento para la muestra 1.

Para ubicar el límite de proporcionalidad se hizo el análisis con la ecuación de la recta de regresión que corresponde a los datos del diagrama esfuerzo – desplazamiento, el coeficiente de determinación R^2 indica que tan preciso es el ajuste lineal de la ecuación a la curva generada, mientras este valor se aproxime a 1 quiere decir que el ajuste lineal es más preciso y por lo tanto el diagrama formado por los datos se acerca más a una línea recta.

Así, los valores de esfuerzos que disminuyeron el coeficiente de determinación se los fue eliminando hasta llegar al punto en el que R^2 tenía el valor de 0,99 o aproximado, el esfuerzo máximo que se identifica en la curva es el valor que se asignó como el límite de proporcionalidad.

Como ya se mencionó este valor depende del criterio del diseñador ya que, si se elige un valor de R^2 menor, el resultado será un esfuerzo de proporcionalidad mayor.

De esta manera los resultados para el límite de proporcionalidad fueron los siguientes (Tabla 25):

Tabla 25
Esfuerzo Límite de Proporcionalidad a Flexión.

Muestra	Esfuerzo Límite de Proporcionalidad [MPa]
1	65,1
2	63,4
3	57,3
4	64,1
5	63,2
6	60,9
7	61,0
8	61,9
9	60,7
10	59,9
11	64,2
12	62,9
13	59,5
14	62,0
15	62,9

b) Módulo de Elasticidad

Primero, se realizó el cálculo de la pendiente en la porción de línea recta inicial de la curva carga – deflexión, para esto se hizo el mismo análisis realizado en la obtención del límite de proporcionalidad, de esta manera con ayuda del coeficiente de determinación R^2 , se fue eliminando los datos de carga – desplazamiento hasta que el coeficiente adquiría un valor de 0,997.

Con esto se obtuvo el diagrama con la porción de línea recta inicial más empinada, como se muestra en la siguiente figura.

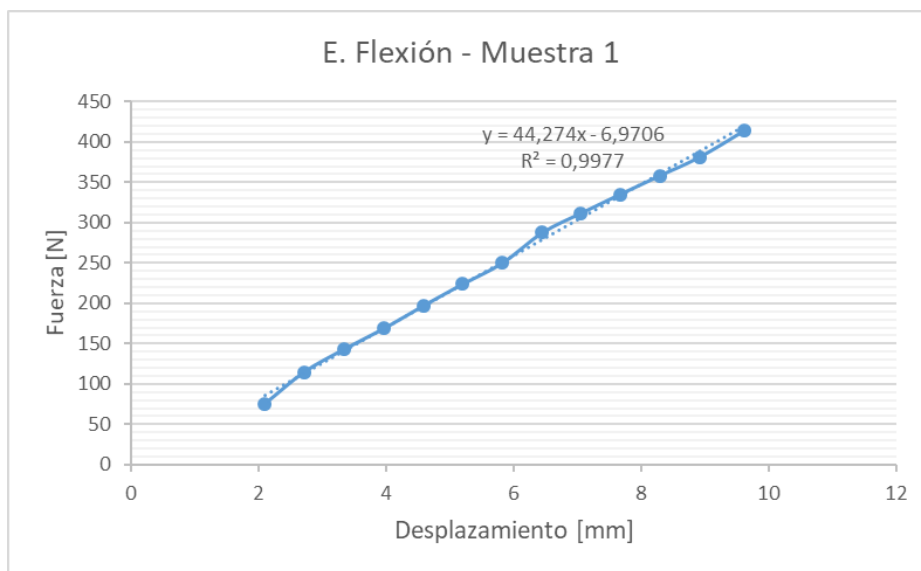


Figura 41. Diagrama Fuerza – Desplazamiento inicial para la muestra 1.

A continuación, se utilizó la ecuación de la recta de regresión que corresponde a la forma.

$$y = mx \pm b$$

Donde el valor de m , es la pendiente de la tangente que más se ajusta a los datos del diagrama carga – deflexión. Finalmente, se realizó el cálculo del módulo de elasticidad sustituyendo los valores necesarios en la ecuación 9.

Ejemplo: Cálculo del módulo de elasticidad para la muestra 1.

$$E_B = \frac{L^3 m}{4bd^3}$$

$$E_B = \frac{160^3 \times 44,274}{4 \times 21,11 \times 10,55^3}$$

$$E_B = 1829,0 \text{ [MPa]}$$

Este procedimiento descrito se repitió para las demás muestras, obteniendo los resultados de la Tabla 26.

Tabla 26

Módulo de Elasticidad a Flexión.

Muestra	m	E _B
1	44,274	1829,0
2	45,011	1846,4
3	44,83	1739,9
4	42,935	1755,7
5	42,086	1719,5
6	39,869	1746,6
7	40,038	1726,4
8	43,114	1737,8
9	42,338	1658,8
10	41,929	1702,3
11	44,169	1753,8
12	40,817	1771,3
13	40,421	1753,1
14	41,834	1795,3
15	42,729	1777,1

3.1.3. Ensayo Cortante (ASTM D 732)

A diferencia de las fuerzas de tracción y de compresión que son normales al plano en el que actúan, las fuerzas de corte son paralelas. Cuando en una sección o plano de un elemento solamente se aplica esfuerzo cortante y no hay la acción de tensiones axiales se dice que se trata de un esfuerzo cortante simple o puro.

El esfuerzo cortante está involucrado en muchas aplicaciones de plásticos, pero se realizan muy pocos ensayos, excepto para materiales con fibras reforzadas.

Existen varios métodos de carga que dan a lugar al esfuerzo cortante pueden ser cizalladura solapada, por perforación, torsión o por carga en cuatro puntos, dentro de las pruebas que se realizan lo más importante es que se someta a las muestras a esfuerzo cortante puro.

Los ensayos que realizan perforación son relativamente el método más popular para medir el esfuerzo cortante en plásticos, en este se trata de conseguir las condiciones de cortante simple, las mismas que van a depender del diámetro externo del punzón y el diámetro interno de la matriz base mientras más pequeña sea esta relación mejor condición de cortante simple se obtendrá. (Brown, 2002)

Teniendo en cuenta esta consideración se tomó como guía para realizar un correcto ensayo cortante la norma ASTM D 732 "Standard Test Method for Shear Strength of Plastics by Punch Tool". (American Society for Testing and Materials, 2002)

A continuación, se indicarán los parámetros con los que se realizó las pruebas, los mismos que se trataron de seguir a la norma en la manera más precisa posible.

3.1.3.1. Equipos

a) Máquina de Ensayo

Se utilizó la Máquina de Ensayos Universales que se encuentra en el Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

Las especificaciones técnicas de la misma se pueden observar en la Tabla 10. Dentro de sus características el único parámetro con el cual la máquina no sigue lo recomendado por la norma es la capacidad de mantener una velocidad constante durante el ensayo.

Esto como se indicó anteriormente se debe a que el funcionamiento de la máquina no lo permite.

b) Matriz Superior

Para realizar el ensayo cortante es necesario de los componentes matriz y punzón, mismos que fueron construidos en la empresa Santa Bárbara E.P., tomando como referencia las dimensiones recomendadas por la norma ASTM D-732 que se pueden observar en el Anexo 5.

El material base para la construcción de la matriz superior fue el acero A36, se maquinó en su totalidad en una fresadora marca Fritz Werner, siguiendo las dimensiones y tolerancias mostradas en el Anexo 6.

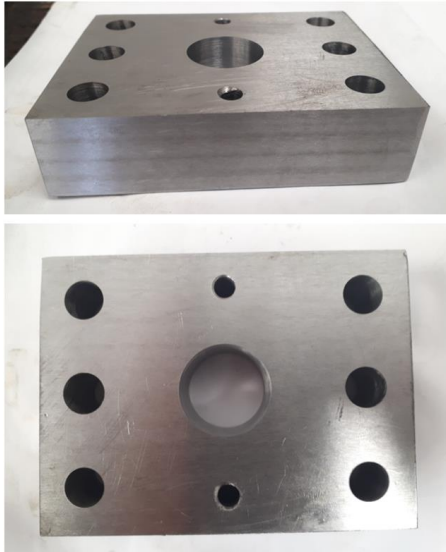


Figura 42. Matriz superior.

La matriz superior (Figura 42) cuenta con dos ejes guías (Figura 43), mismas que fueron maquinadas por torno en acero A36, estas guías son útiles para que en el momento de ensamblar las matrices estas queden alineadas, las dimensiones y tolerancias de esta pieza se las puede ver en el Anexo 7.



Figura 43. Guías Matriz Superior.

Es importante tener en cuenta las tolerancias de estas piezas ya que el ajuste que deben hacer con la matriz superior no es el mismo que cuando entran en la matriz inferior.

Así, el ajuste con la matriz superior fue H7/k6, su montaje como se observa en la Figura 44 se realizó con prensado y se aseguró que queden fijas en la matriz. Mientras que el ajuste cuando se monten las matrices fue H7/g6, ya que esta tolerancia permite el ingreso de las guías en la matriz inferior, pero sin que haya un juego apreciable.



Figura 44. Montaje de guías en matriz superior.

c) Matriz Inferior

La matriz inferior (Figura 45) fue maquinada en fresadora en acero A36, cuyas dimensiones y tolerancias se muestran en el Anexo 8.

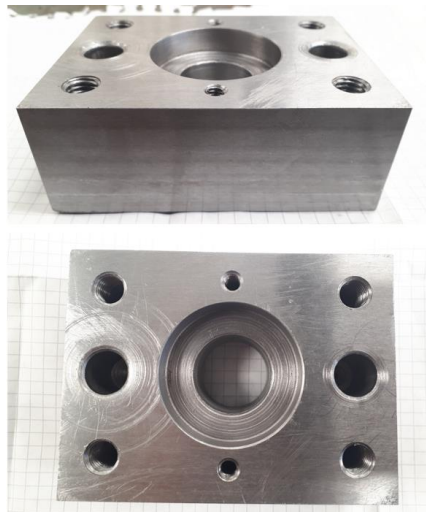


Figura 45. Matriz Inferior.

Un aspecto importante que debe tener la matriz es que en la zona que va a estar en contacto con la muestra, en especial los filos donde ocurrirán los mayores esfuerzos se debe mantener con sus dimensiones originales, para ello se maquino un anillo en acero DF-2. Sus dimensiones y tolerancias se encuentran en el Anexo 9.

Este acero DF-2 corresponde al AISI 01 o K460 el cual se utilizó porque tiene las siguientes características:

- Buena mecanibilidad.
- Buena estabilidad dimensional en el temple.
- Una buena combinación de gran dureza superficial y tenacidad tras el temple y revenido.

Así, a este anillo una vez maquinado se le realizó un tratamiento térmico superficial de temple y revenido como se observa en la Figura 46.



Figura 46. Anillo para matriz inferior.

Finalmente, se montó el anillo en la matriz inferior mediante prensado ya que el ajuste de este montado hace que las piezas se mantengan fijas, además para que la matriz

tenga un buen acabado superficial se realizó un proceso de rectificado superficial, obteniendo la pieza mostrada en la Figura 47.

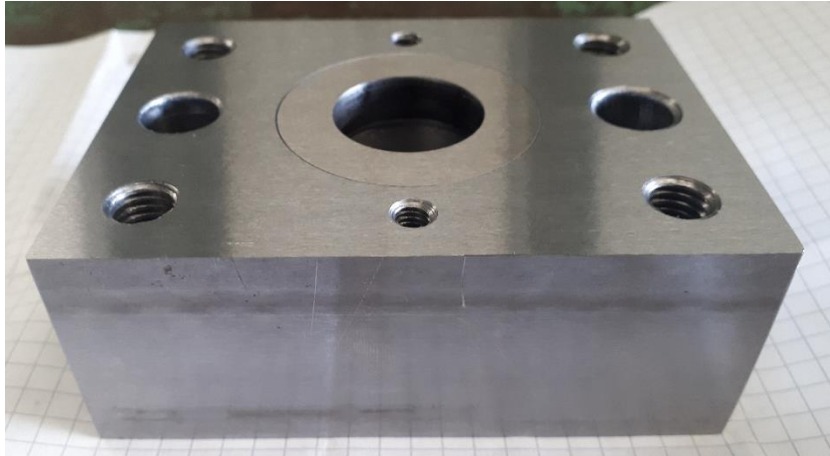


Figura 47. Matriz Inferior rectificada.

d) Punzón

El punzón al estar también en contacto con el material de prueba se mecanizó por torno en acero DF-2, posteriormente se le realizó un tratamiento térmico de temple y revenido para aumentar su dureza superficial, como se observa en la Figura 48.

Las dimensiones y tolerancias se encuentran en el Anexo 10.



Figura 48. Punzón.

Finalmente se maquinó en torno una arandela de 25,1 [mm] de diámetro exterior, 10 [mm] de diámetro interior y 6,40 [mm] de espesor que posteriormente será útil para el ajuste de la muestra al punzón.

3.1.3.2. Muestra de Prueba

El material utilizado para los ensayos cortante fue comprado a una de las empresas con más renombre en la Provincia de Pichincha (cuentan con ficha técnica del material), todas las muestras fueron obtenidas del mismo lote de venta del material que se comercializa bajo el nombre de Nylon 6A.

Todas las muestras se cortaron de una plancha cuyo espesor es de 10 [mm]; como no se maquinaron las caras originales, se aseguró que tanto las superficies superior e inferior sean paralelas entre sí.

Las dimensiones de las muestras se encuentran en la Figura 49 y fueron las siguientes.

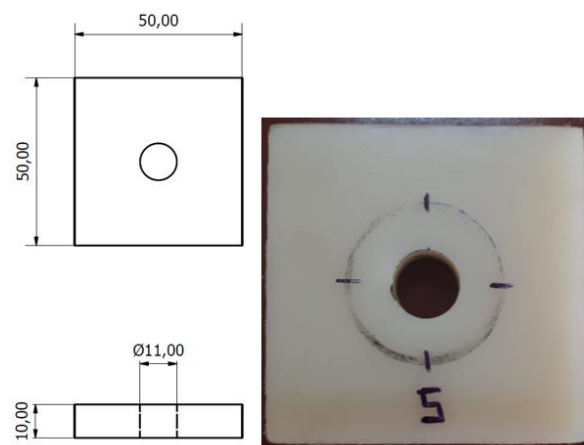


Figura 49. Dimensiones muestras para ensayo cortante.

3.1.3.3. Condiciones

Las pruebas fueron realizadas en condiciones atmosféricas estándar, cumpliendo con los valores que indica la norma que es 23 ± 2 °C y 50 ± 5 por ciento de humedad relativa.

De la misma manera el acondicionamiento de las muestras fue de 3 días (72 horas) con las mismas condiciones a las que se realizó las pruebas, este tiempo de acondicionamiento se empezó a contar a partir del momento en que las muestras se cortaron de la plancha.

3.1.3.4. Procedimiento

Primero, se realizaron 4 mediciones separadas por 90°, ubicando los puntos a una distancia de 12,7 [mm] desde el centro del agujero (Figura 39), estas mediciones se realizaron con un micrómetro cuyas especificaciones se muestran a continuación en la Tabla 27.

Tabla 27
Especificaciones Micrómetro Mitutoyo.

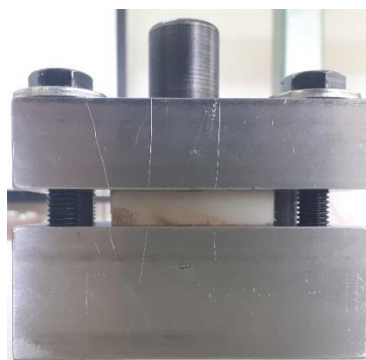
Micrómetro	
Marca	Mitutoyo
Alcance	0 - 25,4 [mm]
Apreciación	0,001 [mm]

Los valores de espesor fueron los siguientes (Tabla 28):

Tabla 28*Espesor de las muestras para Ensayo Cortante.*

Muestra	Espesor @ 0°	Espesor @ 90°	Espesor @ 180°	Espesor @ 270°
1	10,656	10,579	10,58	10,661
2	10,683	10,705	10,724	10,681
3	10,759	10,755	10,732	10,713
4	10,557	10,537	10,528	10,523
5	10,704	10,695	10,734	10,712
6	10,723	10,751	10,712	10,737
7	10,725	10,712	10,728	10,738
8	10,717	10,701	10,709	10,711
9	10,673	10,68	10,673	10,692
10	10,543	10,555	10,578	10,573
11	10,72	10,707	10,727	10,744
12	10,581	10,589	10,598	10,578
13	10,628	10,662	10,644	10,656
14	10,675	10,701	10,716	10,715
15	10,738	10,76	10,764	10,771

Segundo, se colocó la muestra sobre el punzón y se ajustó firmemente con la ayuda de la arandela maquinada y una tuerca, seguidamente se ensambló el punzón con las matrices superior e inferior y se realizó el apriete con sus respectivos pernos, como se muestra en la Figura 50.

**Figura 50.** Matrices y punzón ensamblado.

Finalmente se colocó el ensamble matriz - punzón en la Máquina de Ensayos Universales AMSLER y se empezó a aplicar la carga, como se observa en la Figura 51, esta debió continuar hasta que ocurra el corte de la muestra y esta pueda ser retirada fácilmente de la matriz.



Figura 51. Ensayo Cortante.

3.1.3.5. Cálculos

a) Para el cálculo del esfuerzo cortante se utilizó la siguiente expresión:

Ecuación 10 Esfuerzo Cortante.

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

Donde:

- τ es el esfuerzo cortante, en [MPa].
- F es la fuerza requerida para realizar el corte de la muestra, en [N].
- C es la circunferencia del punzón, en [mm].

- e es el espesor de la muestra, en [mm].

3.1.3.6. Reporte

Los valores de la fuerza máxima para cada muestra se indican a continuación (Tabla 29).

Tabla 29

Fuerza Máxima - Ensayo Cortante.

Muestra	Fuerza Máxima [kgf]
1	5008,2
2	5071,4
3	5203,6
4	5013,4
5	5035,9
6	4979,0
7	4674,5
8	4969,0
9	4930,4
10	4870,4
11	4875,1
12	4843,2
13	4838,5
14	4948,8
15	4917,4

Los demás datos que se obtuvieron durante los ensayos se muestran en el Anexo 11.

a) Esfuerzo Cortante

Para el cálculo del esfuerzo cortante se reemplazó los datos necesarios en la ecuación 10.

Ejemplo: Cálculo esfuerzo cortante para la muestra 1.

$$C = \pi \times d$$

$$C = \pi \times 25,1$$

$$C = 78,854 \text{ [mm]}$$

El valor de la circunferencia del punzón es constante para todos los cálculos.

Reemplazando los datos de la circunferencia, espesor y fuerza tenemos:

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

$$\tau = \frac{49113,9}{78,854 \times 10,619}$$

$$\tau = 58,7 \text{ [MPa]}$$

A continuación, se mostrará la Tabla 30 con el esfuerzo cortante de todas las muestras.

Tabla 30

Resultados Ensayo Cortante.

Muestra	Fuerza Máxima [N]	Espesor Promedio [mm]	Esfuerzo Cortante [MPa]
1	49113,9	10,619	58,7
2	49733,9	10,698	59,0
3	51030,2	10,740	60,3
4	49165,1	10,536	59,2
5	49385,4	10,711	58,5
6	48826,9	10,731	57,7
7	45841,3	10,726	54,2
8	48729,7	10,710	57,7
9	48350,5	10,680	57,4
10	47762,0	10,562	57,3
11	47808,1	10,725	56,5
12	47495,6	10,587	56,9
13	47449,5	10,648	56,5
14	48531,3	10,702	57,5
15	48223,2	10,758	56,8

Los diagramas de esfuerzo – desplazamiento obtenidos del comportamiento de cada muestra durante los ensayos se muestran en las Figuras 52 – 57 como se muestran a continuación:

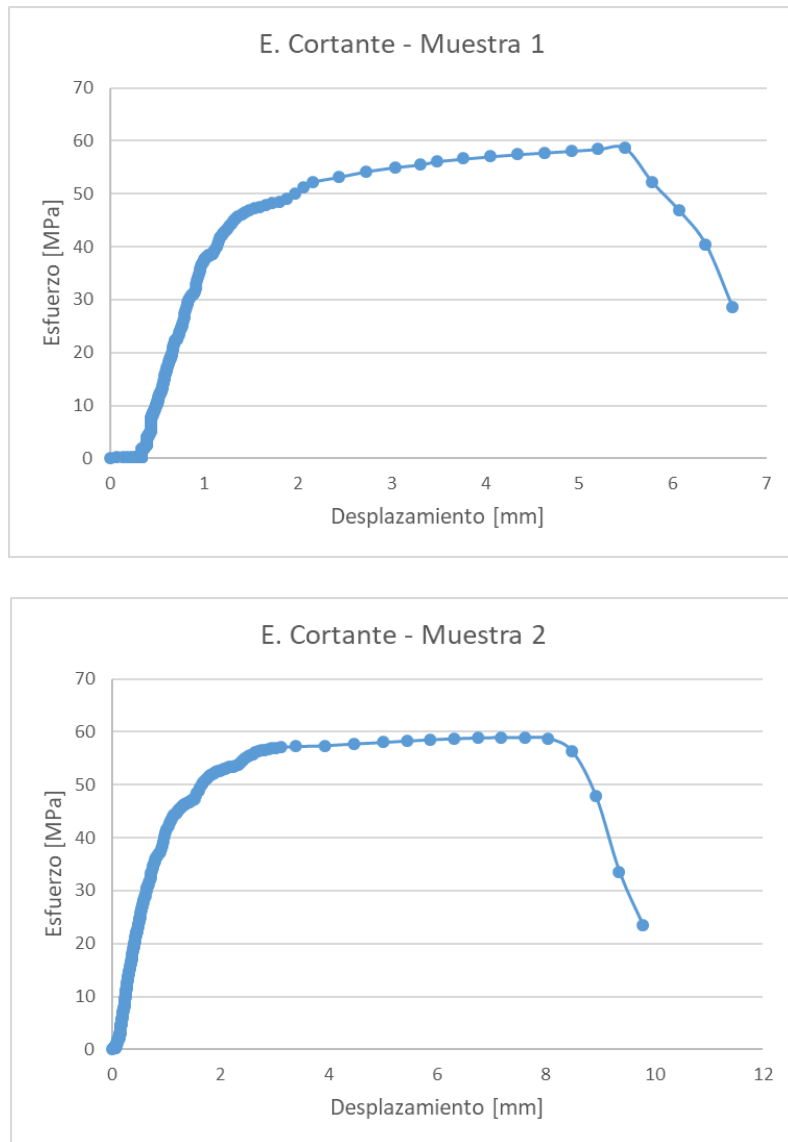


Figura 52. Diagrama esfuerzo – desplazamiento ensayo cortante, muestra 1-2.

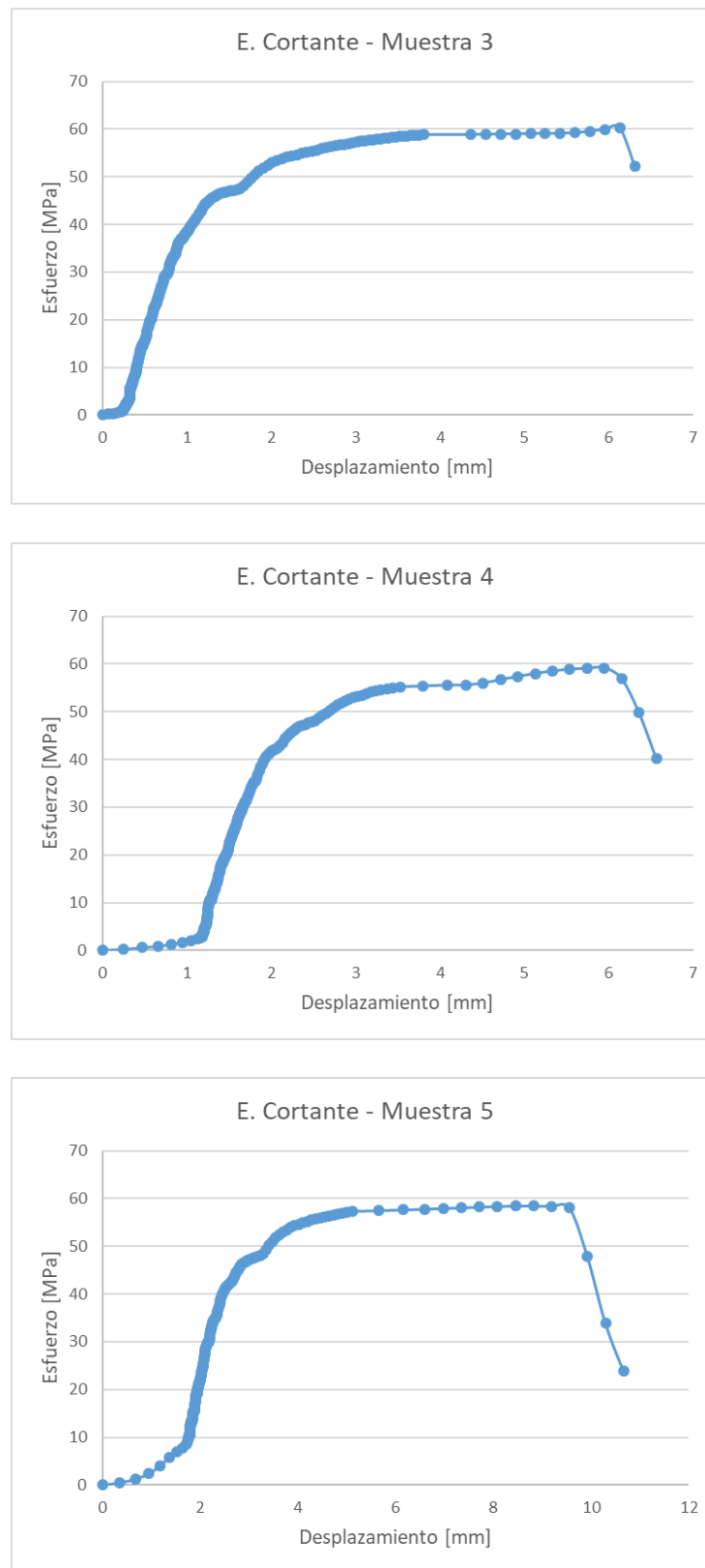


Figura 53. Diagrama esfuerzo – desplazamiento ensayo cortante, muestra 3-5.

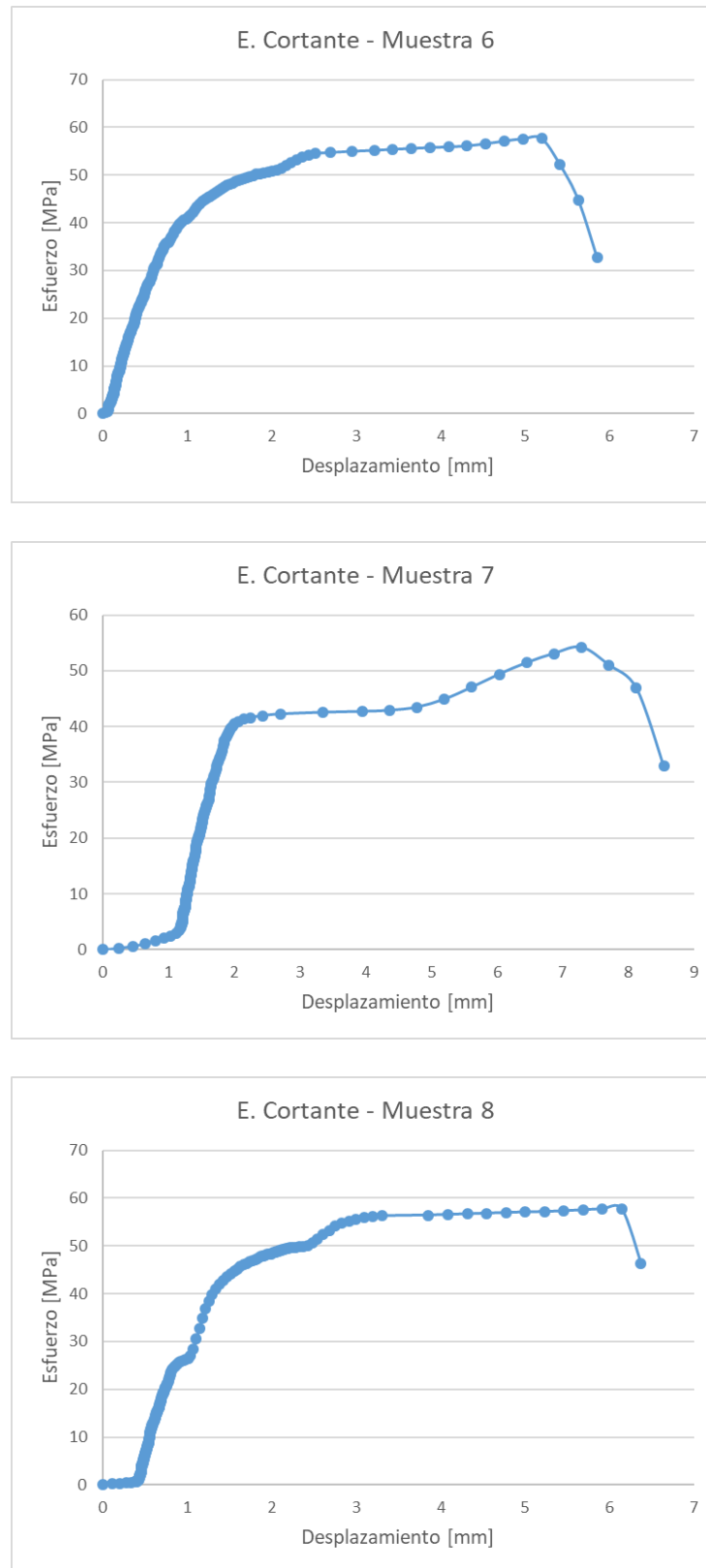


Figura 54. Diagrama esfuerzo – desplazamiento ensayo cortante, muestra 6-8.

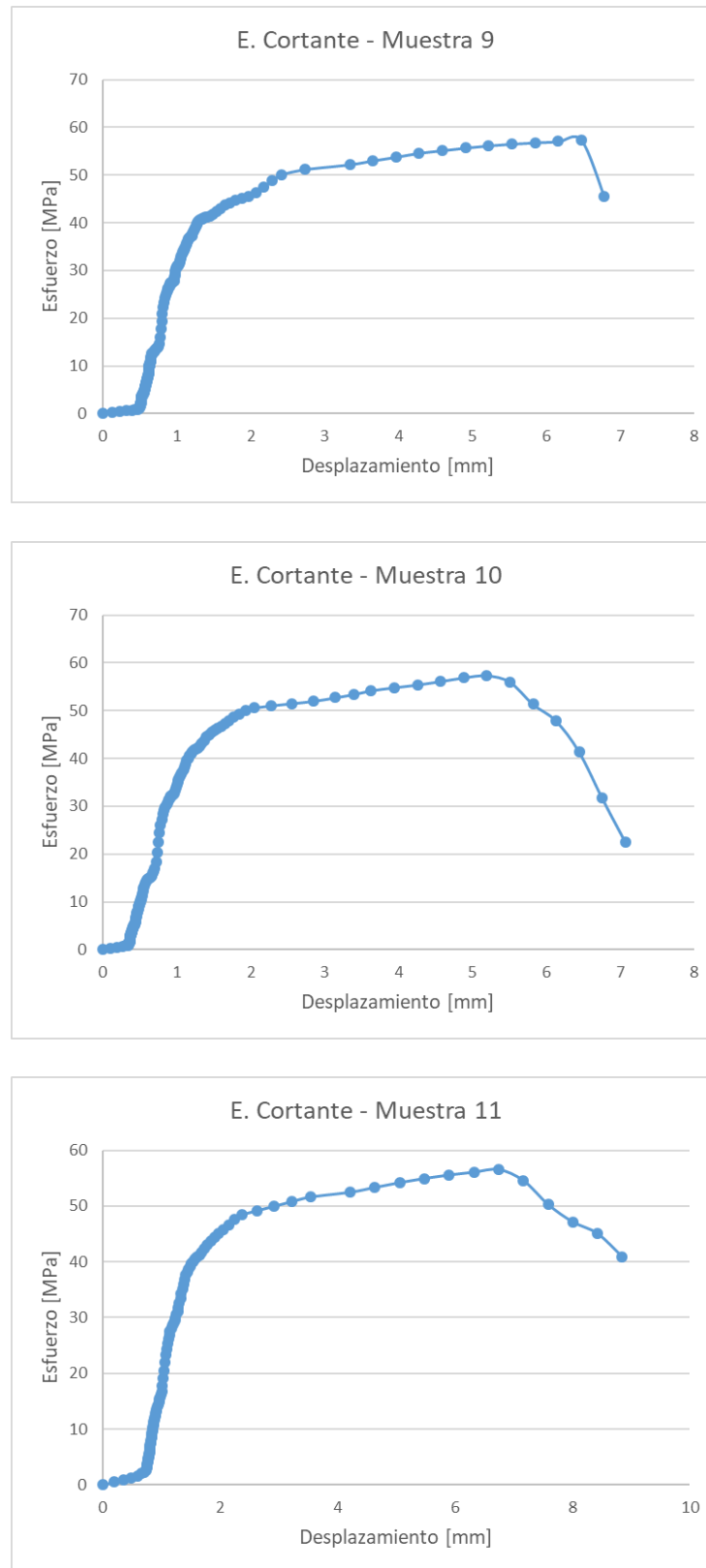


Figura 55. Diagrama esfuerzo – desplazamiento ensayo cortante, muestra 9-11.

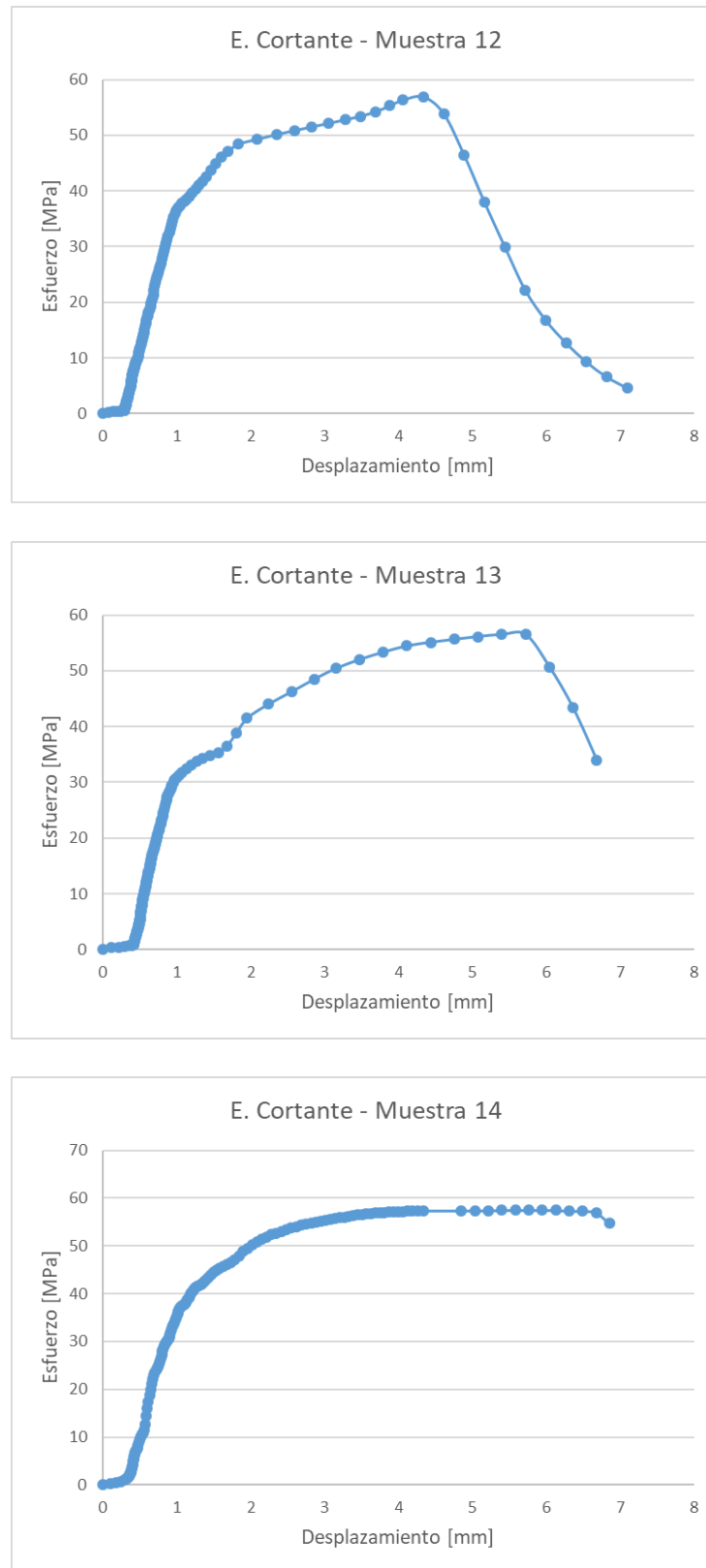


Figura 56. Diagrama esfuerzo – desplazamiento ensayo cortante, muestra 12-14.

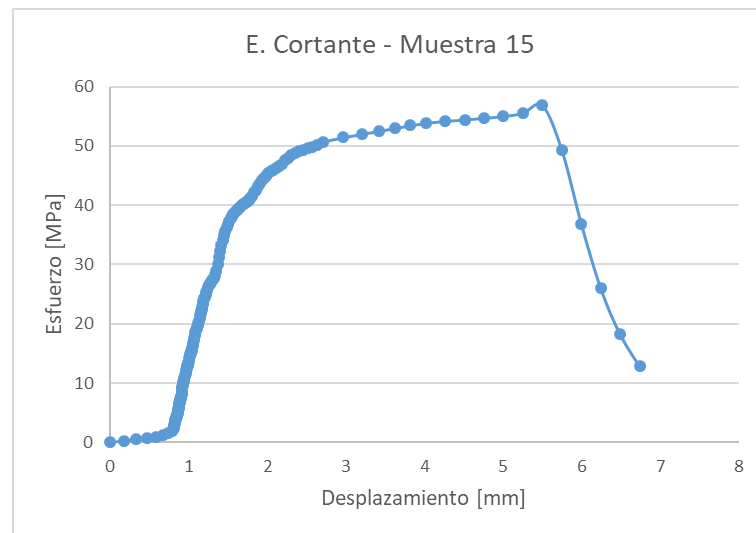


Figura 57. Diagrama esfuerzo – desplazamiento ensayo cortante, muestra 15.

A continuación, se procedió a encontrar al límite de proporcionalidad para el esfuerzo cortante, de la misma manera que en flexión este valor es el esfuerzo cortante máximo con el cual la muestra mantiene una deformación directamente proporcional.

Para obtener dicho valor se realizó el diagrama esfuerzo – desplazamiento (Figura 58), con la ayuda del coeficiente de determinación R^2 se fueron eliminando los valores que están sobre el límite de proporcionalidad que corresponden al comportamiento de la muestra cuando no está en su rango elástico.

Una vez que el coeficiente adquiere el valor de 0,99 es cuando el diagrama más se ajusta a una línea recta, lo que corresponde a la respuesta del material en su rango elástico.

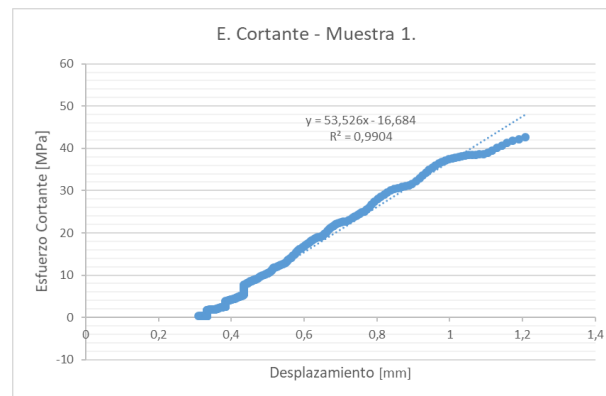


Figura 58. Diagrama esfuerzo cortante - desplazamiento.

Una vez se realizó este procedimiento el valor del esfuerzo cortante máximo del diagrama es el que se tomó como el límite de proporcionalidad, este valor como se mencionó anteriormente depende únicamente del criterio del autor y este puede variar de acuerdo a la decisión del diseñador.

El procedimiento descrito se realizó para el diagrama esfuerzo – desplazamiento de todas las muestras obteniendo los siguientes resultados (Tabla 31).

Tabla 31

Esfuerzo cortante correspondiente al límite de proporcionalidad.

Muestra	Esfuerzo Límite de Proporcionalidad [MPa]
1	42,6
2	35,2
3	39,3
4	36,9
5	36,2
6	38,2
7	39,7
8	38,5
9	35,1
10	38,9
11	37,6
12	38,5
13	30,3
14	37,5
15	38,7

3.2. Ensayo Dinámico

3.2.1. Ensayo de Fatiga

El objetivo de una prueba de fatiga generalmente es determinar la vida a fatiga o el punto crítico y la localización de la falla, de una muestra de prueba sometida a una secuencia prescrita de amplitud de esfuerzos.

Para tener una mejor apreciación de cómo actúa el material a fatiga se somete a varias muestras a diferentes niveles de esfuerzo durante un número determinado de ciclos, lo importante durante el ensayo es que la amplitud de esfuerzos se mantenga constante. (Weibull, 2013)

Dependiendo del nivel de esfuerzo aplicado, a las pruebas con amplitud constante se puede clasificar en tres categorías:

- i) Prueba de rutina: el esfuerzo aplicado es elegido de tal manera que se espera que las muestras fallen después de un número moderado de ciclos, esto es 10^4 a 10^7 .
- ii) Prueba de vida corta: donde los niveles de estrés están situados por encima del límite de fluencia y se espera que algunas de las muestras fallen estáticamente en la aplicación de la carga.
- iii) Prueba de vida larga: donde los niveles de estrés están situados por debajo o justo por encima del límite de fatiga y una fracción de las muestras no falla después de un número de ciclos pre-asignado (usualmente entre 10^6 y 10^7).

En los materiales poliméricos el conocimiento de las dislocaciones no es tan avanzado como en los metales, en los polímeros la estructura molecular hace que el inicio de la grieta en la fase de iniciación de la falla dependa de factores como el mecanizado de la muestra, si el material es obtenido por moldeo, de la estructura cristalina del material, etc.

Además, otro factor importante es conocer qué tipo de máquina se utilizará en los ensayos, esto es de mucha importancia ya que dependiendo del tipo de máquina va a depender la manera en la que se aplica la carga cíclica a las muestras.

Como se mencionó anteriormente en el Capítulo 3, un tipo de máquina son las que aplican flexión rotativa, la más utilizada dentro de esta clasificación es la máquina de Moore que es con la que se trabajó en el presente trabajo de titulación.

Por último, hay que tener en cuenta que al no existir un proceso que normalice el ensayo de fatiga en polímeros mediante el uso de la máquina de Moore, existen aspectos que se deben tener presente durante las pruebas.

Estos parámetros son la velocidad de deformación (o frecuencia), el nivel de carga, tipo de control (si es carga o deformación controlada), la forma de la onda cíclica y principalmente el aumento de temperatura en la muestra lo que origina falla por fatiga térmica.

De esta manera, las condiciones y parámetros con los que se trabajó se reportan a continuación.

3.2.1.1. Equipos

a) Máquina de Ensayo

Para el presente trabajo se utilizó la máquina de R.R. Moore de fatiga por flexión rotativa, con la cual se cuenta en el Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.



Figura 59. Máquina de R.R. Moore - Laboratorio de Mecánica de Materiales UFA - ESPE.

Las partes principales y su funcionamiento se describen en el Capítulo 3 en la sección 2.3.

Si se necesitan todas las especificaciones técnicas de la máquina, estas se pueden ver en el trabajo de titulación denominado “Automatización de la Máquina de Ensayos de Fatiga para el Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE”.

A continuación, se presentan la Tabla 32 con las especificaciones técnicas principales:

Tabla 32
Especificaciones técnicas - Máquina de Fatiga.
Máquina de Fatiga por Flexión Rotativa

Motor Eléctrico Trifásico	
Marca	Weg
Modelo	W22
Tensión nominal de operación	220/380 [V]
Frecuencia	60 [Hz]
Potencia	0,5 [HP]
Corriente nominal de operación	2,10/1,22 [A]
Celda de Carga Tipo S	
Alimentación	24 VDC
Tipo de Salida	Analógica en voltaje (0 - 10 [V])
Rango de Entrada	0 - 30 [kg]
Sensibilidad	333,33 [mV/kg]

A pesar de que la máquina de Moore fue diseñada para ensayos de fatiga a materiales metálicos existen estudios como “The influence of loading history on fatigue in engineering plastics”, publicado por Journal of Material Science en el cual se realiza pruebas utilizando dicha máquina.

Los autores aclaran que la máquina de Moore al trabajar con metales realiza deflexiones relativamente bajas comparado con las que se necesita para ensayar plásticos. (William A. Herman, Richard W. Hertzberg, John A. Manson, 1990)

Por ello para poder utilizar esta máquina se verificó que sea capaz de realizar mayores deflexiones estáticas que las que realiza en ensayos comunes, con el fin de que pueda mantener una condición de esfuerzo constante en la sección reducida de la muestra.

3.2.1.2. Muestra de Prueba

El material utilizado para los ensayos de fatiga fue comprado a una de las empresas con más renombre en la Provincia de Pichincha (cuentan con ficha técnica del material), todas las muestras fueron obtenidas del mismo lote de venta.

El duralón utilizado se comercializa bajo el nombre de Nylon 6A, las muestras se extrajeron de barras rígidas de 20 [mm] de diámetro por 1 [m] de largo mediante un proceso de mecanizado en torno.

Para las dimensiones se tomó en cuenta el estudio mencionado anteriormente y se utilizó la misma norma que es la ASTM E 466 – 96 (Reapproved 2002).

Así, para muestras con sección circular estas pueden ser de dos tipos, con filetes tangenciales o con radio continuo entre la sección de prueba, siendo esta última el tipo de muestra que se utilizó, cuyas condiciones son las siguientes:

- El radio de curvatura de la muestra no debe ser menos de 8 veces el diámetro mínimo de la sección de prueba para minimizar el factor de concentración de esfuerzos.
- La longitud de la sección reducida debe ser más grande que 3 veces el diámetro mínimo de la sección de prueba.

Las dimensiones también dependieron de la máquina, como el diámetro máximo que entra en las mordazas o la distancia entre las mismas la cual restringió la longitud de las muestras.

Tomando en cuenta estas restricciones y las condiciones que exige la norma las dimensiones de las muestras se observan en la Figura 60 y fueron las siguientes.

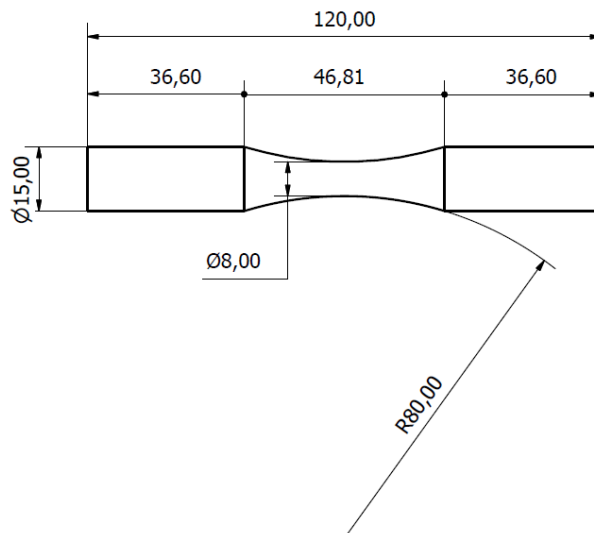


Figura 60. Dimensiones para muestras del Ensayo de Fatiga.

Para saber cuántas muestras y replicación de parámetros se deben realizar se recurrió a la norma ASTM E 739 – 10 “Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data”. (American Society for Testing and Materials, 2010)

Dicha norma indica el número mínimo de muestras requeridas en los ensayos S-N, las mismas que van a depender de acuerdo al tipo de prueba programado (Tabla 33).

Tabla 33

Número de muestras de acuerdo al tipo de prueba.

Tipo de Prueba	Número Mínimo de Muestras
Preliminar y exploratorio (investigación exploratoria y pruebas de desarrollo).	6 a 12
Pruebas de investigación y desarrollo de componentes y muestras.	6 a 12
Datos permitidos para diseño.	12 a 24
Datos de Confiabilidad.	12 a 24

Fuente: ASTM E 739.

El presente trabajo pretende diseñar datos permitidos, por ello se ensayaron a 15 muestras.

Otro factor importante es la repetición (pruebas de repetición), esto se refiere al número de veces que se va a ensayar diferentes muestras con los mismos parámetros (Tabla 34).

Tabla 34

Porcentaje de replicación de acuerdo al tipo de prueba.

Tipo de Prueba	Porcentaje de Replicación
Preliminar y exploratorio (investigación exploratoria y pruebas de desarrollo).	17 a 33 min
Pruebas de investigación y desarrollo de componentes y muestras.	33 a 50 min
Datos permitidos para diseño.	50 a 75 min
Datos de Confiabilidad.	75 a 88 min

Fuente: ASTM E 739.

Para obtener el porcentaje de replicación se obtiene mediante la siguiente expresión.

Ecuación 11 Porcentaje de Replicación - Ensayo de Fatiga.

$$\% \text{ Replicación} = 100 \left[1 - \frac{A}{N} \right]$$

Donde:

- A es el número total de diferentes niveles de esfuerzo o deformación usados en la prueba.
- N es el número total de muestras de prueba.

En el presente trabajo se ensayaron a 3 muestras con los mismos parámetros, lo que indica que se realizó 5 tipos de prueba con diferentes esfuerzos, con lo que se obtiene el siguiente porcentaje de replicación.

$$\% \text{ Replicación} = 100 \left[1 - \frac{5}{15} \right]$$

$$\% \text{ Replicación} = 66,66 \%$$

Cumpliendo también con el porcentaje de replicación, de esta manera se aseguró que el muestreo realizado sea el correcto aplicando la norma ASTM E 739.

Finalmente se maquinaron las probetas en torno y se realizó una inspección visual sin ayuda en todas las muestras, y se verificó que ninguna tenga imperfecciones superficiales ya que en estos ensayos las anomalías obvias como grietas, ralladuras, marcas de mecanizado, recortes, etc. No son aceptables, debido a su influencia sobre los resultados.

Los resultados fueron muestras que se observan en la Figura 61.

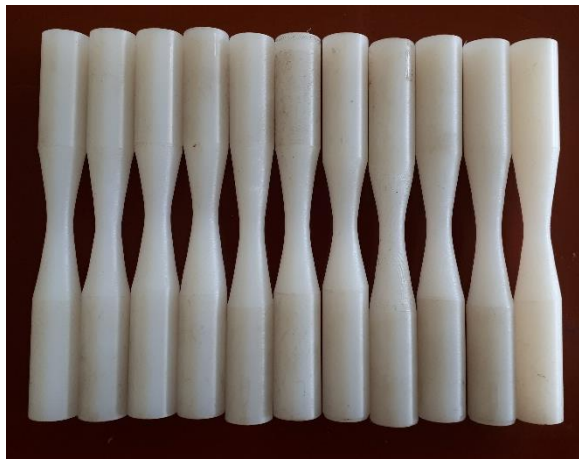


Figura 61. Muestras Ensayo de Fatiga.

3.2.1.3. Condiciones

Las condiciones y acondicionamiento de las muestras se las realizó utilizando la misma información dada por las normas anteriormente mencionadas para los ensayos de tracción, flexión y corte.

Por lo tanto, las pruebas fueron realizadas en condiciones atmosféricas estándar, cumpliendo con los valores que indica la norma que es 23 ± 4 °C y 50 ± 5 por ciento de humedad relativa.

De la misma manera el acondicionamiento de las muestras fue de 3 días (72 horas) con las mismas condiciones a las que se realizó las pruebas, este tiempo de acondicionamiento se empezó a contar a partir del momento en que las muestras se terminaron de maquinar.

3.2.1.4. Cálculos

Como se muestra en el capítulo 2 el funcionamiento de la máquina de Moore es la aplicación de flexión pura a una muestra que se comporta como viga simplemente apoyada, mediante la carga que se aplica entre los rodamientos libres.

Para este caso el cálculo de la flexión máxima se lo realiza mediante la siguiente expresión:

Ecuación 12 Esfuerzo máximo cuando ocurre flexión pura.

$$\sigma = \frac{My}{I}$$

Donde:

- σ es el esfuerzo a flexión, en [MPa].
- M es el momento a flexión máximo, en [N.mm].
- y es la distancia desde la línea neutra a la fibra más externa de la sección de prueba, en [mm].
- I es el momento de inercia de la sección de prueba, en [mm⁴].

En nuestro caso la sección de prueba es de forma circular, substituyendo en la ecuación 12 la fórmula de la I y de y , tenemos:

$$\sigma = \frac{M \times \frac{d}{2}}{\frac{\pi}{64} \times d^4}$$

Ecuación 13 Esfuerzo máximo a Flexión para muestras con sección circular.

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

Para el cálculo del momento máximo es necesario realizar un análisis del diagrama de cuerpo libre para la máquina, para lo cual se analizaron las cargas, reacciones y dimensiones con la ayuda de la Figura 62.

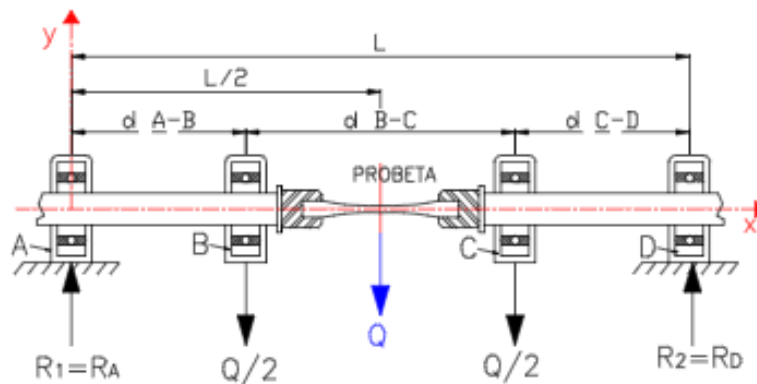


Figura 62. Diagrama de cuerpo libre para la Máquina de Moore.
Fuente: (Cuichán & Dueñas, 2008)

Las dimensiones de la máquina necesarias para el análisis se muestran a continuación en la Tabla 35.

Tabla 35*Dimensiones de la Máquina de Moore.*

Dimensiones Máquina de Moore para D.C.L.	
d_{A-B}	200 [mm]
d_{B-C}	330 [mm]
d_{C-D}	200 [mm]
L	730 [mm]
L/2	365 [mm]

El análisis se realiza asumiendo que el sistema se encuentra en equilibrio, para este caso se cumple que:

$$\sum F_y = 0$$

$$R_A - \frac{Q}{2} - \frac{Q}{2} + R_D = 0$$

$$R_A + R_D = Q \text{ (Ec. 1)}$$

$$\sum M_A = 0 \text{ (sentido horario positivo)}$$

$$Q \frac{L}{2} - R_D L = 0$$

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

$$R_D = \frac{Q}{2} \text{ (Ec. 2)}$$

Reemplazando Ec.2 en Ec.1 se obtiene:

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

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

Debido a que las distancias ($d_{A-B} = d_{C-D}$), en el caso de realizar la sumatoria de momentos en el punto B y haciendo la sustitución de Ec.2 en Ec.1 del análisis, se puede comprobar que las reacciones R_A y R_D son iguales.

Una vez resuelto el sistema los diagramas del cortante máximo y momento flector para una viga simplemente apoyada con una carga puntual en el centro, corresponden a (Figura 63 y 64):

- Cortante máximo:

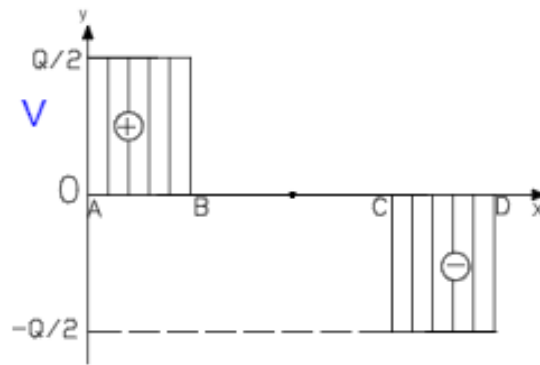


Figura 63. Diagrama fuerza cortante para el sistema.
Fuente: (Cuichán & Dueñas, 2008)

Donde:

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

Ecuación 14 Cortante máximo para viga simplemente apoyada con carga puntual en el centro.

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

- Momento flector:

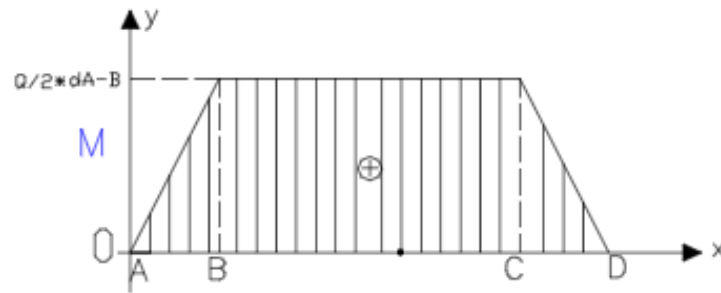


Figura 64. Diagrama momento flector para el sistema.
Fuente: (Cuichán & Dueñas, 2008)

Donde:

$$M_{m\acute{a}x} = R_A \times d_{A-B}$$

Ecuación 15 Momento flector máximo para viga simplemente apoyada con una carga puntual en el centro.

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{Q}{2} \times d_{A-B}$$

La máquina de Moore del laboratorio de Mecánica de Materiales no cuenta con un sistema de carga que evite que afecte el peso de los componentes libres como chumaceras, mordazas, la placa de fuerza y los mismos ejes, por ello este valor se calculó y se lo debe tomar en cuenta para las operaciones que se realizarán más adelante.

$$Precarga\ componentes = 21,13 [kgf]$$

3.2.1.5. Procedimiento

Primero, se realizó la medición del menor diámetro en la zona de prueba de cada muestra, se utilizó el calibrador electrónico pie de rey cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 13, los valores obtenidos se muestran a continuación (Tabla 36):

Tabla 36
Diámetro de las muestras de Fatiga.

Muestra	Do
1	8,80
2	8,78
3	8,72
4	9,14
5	9,36
6	9,46
7	9,04
8	9,28
9	9,52
10	9,10
11	9,58
12	9,72
13	9,66
14	9,34
15	9,48

Se verificó que la máquina tenga un correcto funcionamiento, siendo el aspecto más importante la capacidad de mantener constante la velocidad angular que se ingresa en el sistema.

Dependiendo del material se recomienda trabajar con frecuencias comprendidas entre 20 y 100 [Hz], por ello las pruebas que se realizaron se trabajó con velocidades angulares que variaron entre 1200 – 1800 [rpm].

A las chumaceras de la máquina se las realizó mantenimiento engrasándolas, con la experiencia adquirida durante los ensayos se recomienda realizar este mantenimiento cada 25000 revoluciones de trabajo, esto se debe a que las chumaceras van perdiendo

grasa durante las pruebas y la falta de esta hace que el movimiento de rotula sea friccionado.

En esta parte de las pruebas se tuvo un inconveniente ya que no se sabía que esfuerzo máximo aplicar a las muestras, esto con el fin de tener una condición de referencia inicial, útil para realizar los demás ensayos.

De esta manera se empezó aplicando la condición recomendada para el acero la cual indica que el límite a fatiga varía aproximadamente entre $(0,40 S_{ut} \leq S \leq 0,60 S_{ut})$, siendo S_{ut} el esfuerzo máximo a la tracción, esto aplica para materiales cuyos valores de S_{ut} sea menor a 1400 [MPa]. (Cuichán & Dueñas, 2008)

Se utilizó el valor de 84 [MPa] correspondiente al esfuerzo máximo a la tracción del Nylon 66, aplicando dicho valor al 60%, y un diámetro de la muestra de 8 [mm], en la ecuación 13 se obtuvo el siguiente valor de momento flector máximo.

$$0,60(84) = \frac{M \times 32}{\pi \times 8^3}$$

$$M = 2533,380 [N \cdot mm]$$

Una vez se obtuvo el momento máximo se aplicó en la ecuación 15, para saber cuál es la carga que se debe aplicar en el sistema.

$$2533,380 = \frac{Q}{2} \times 200$$

$$Q = 25,334 [N]$$

$$Q = 2,583 [kgf]$$

Debido a que esta carga es mucho menor a la precarga que se aplica por el peso de los componentes, se diseñó y construyó un soporte que ayudara a controlar dicho peso

y con el cuál se realizaron los primeros ensayos aplicando la carga de 2,583 [kgf], como se muestra en la Figura 65.



Figura 65. Ensayo de Fatiga con soporte de precarga.

Los resultados obtenidos se presentan a continuación (Tabla 37):

Tabla 37

Valores obtenidos ensayo de Fatiga con soporte.

Do	Temperatura Inicial	Velocidad angular	Carga	Número revoluciones
8 [mm]	19 [°C]	1200 [rpm]	2,547 [kgf]	91780

Una vez se comprobó que la muestra resiste dicha carga se procedió a realizar más ensayos aumentando el peso y por lo tanto los esfuerzos. Esto se realizó hasta el punto en el cual se agregó un peso de 31,061 [kgf], muy superior al de 21,13 [kgf] de precarga de los componentes.

Debido a que las muestras soportaron un peso mayor que el de los componentes se procedió a realizar los siguientes ensayos sin el soporte, en estas pruebas se tuvo el inconveniente de que una vez se montaba las muestras estas con el solo peso de los componentes ya sufrían excesiva deflexión.

Esta deflexión hace que cuando la máquina funciona a bajas revoluciones entre 200 y 600 [rpm], se produzcan vibraciones excesivas, por ello fue necesario mantener toda la carga sin aplicarse y mantener así hasta cuando el motor haya llegado a la velocidad ingresada (esto demora alrededor de 2 segundos), mientras mayor fue la velocidad angular del motor menor fueron las vibraciones.

Así, se procedió a encontrar la carga máxima la cual fue de 55,144 [kgf], que es a la que las muestras se rompieron en el menor número de ciclos, con este valor como referencia las demás pruebas se las realizó a 50,144 [kgf], 44,051 [kgf], 40,958 [kgf] y 35,271 [kgf] que corresponden aproximadamente al (90, 80, 70 y 60 % respectivamente) de la carga máxima.

Una vez concluidos los ensayos se procedió a medir la temperatura de las muestras, con el fin de observar el incremento de la temperatura a medida que los esfuerzos cíclicos actúan sobre la zona de prueba, obteniendo los siguientes datos (Tabla 38).

Tabla 38

Datos Ensayo de Fatiga.

Muestra	Carga [kgf]	Velocidad Angular [rpm]	Temperatura Inicial [°C]	Ciclos	Temperatura Final [°C]
1	55,144	1700	19	2490	103
2	55,144	1700	19	2420	96
3	55,144	1700	19	2683	98
4	50,144	1700	19	4095	114
5	50,144	1700	19	6340	128

CONTINÚA

6	50,144	1700	19	5747	124
7	44,051	1700	19	12759	120
8	44,051	1700	19	10636	120
9	44,051	1700	19	11268	103
10	40,958	1700	19	20645	130
11	40,958	1700	19	22729	116
12	40,958	1700	19	21596	123
13	35,271	1700	19	100181	76
14	35,271	1700	19	100029	75
15	35,271	1700	19	100185	72

3.2.1.6. Reporte

Los cálculos analizados anteriormente no se los puede aplicar y reportar como resultados debido a que no toman en cuenta la diferencia de materiales entre la probeta y los ejes de la máquina, estos cálculos se los puede utilizar siempre y cuando las muestras sean de acero, en ese caso se asume que la viga es de un solo material.

Al estar las muestras hechas de nylon estas tienen una diferencia de rigidez considerable siendo mucho menor que la del acero, como muestra de esta diferencia podemos ver en el siguiente análisis donde se hace una comparación entre la rigidez flexional para ambos materiales.

Ecuación 16 Rigidez Flexional para secciones circulares.

$$k = \frac{EI}{L}$$

$$n = \frac{k_{acero}}{k_{nylon}}$$

Asumiendo que las secciones estudiadas son iguales se tiene que:

$$n = \frac{E_{acero}}{E_{nylon}}$$

$$n = \frac{210000 \text{ [MPa]}}{3000 \text{ [MPa]}}$$

$$n = 70$$

Como se puede observar el acero tiene un módulo de elasticidad 70 veces mayor que el del nylon, lo que provoca que cuando se aplica un esfuerzo de flexión a una muestra de nylon esta opone mucha menor resistencia a los esfuerzos de flexión que el acero.

Por lo tanto, en los ensayos de fatiga por flexión rotativa los esfuerzos aplicados por una carga determinada afectan mucho más a las muestras de acero que a las de nylon, razón por la cual el nylon soporta mayores cargas durante los ensayos, más no mayores esfuerzos.

Para determinar un aproximado de los esfuerzos reales que soportaron las muestras de nylon se diseñó y realizó una simulación estática para un análisis no lineal de las cargas aplicadas en una viga compuesta (acero y nylon), este procedimiento se lo realizó con software CAE (Figura 66).

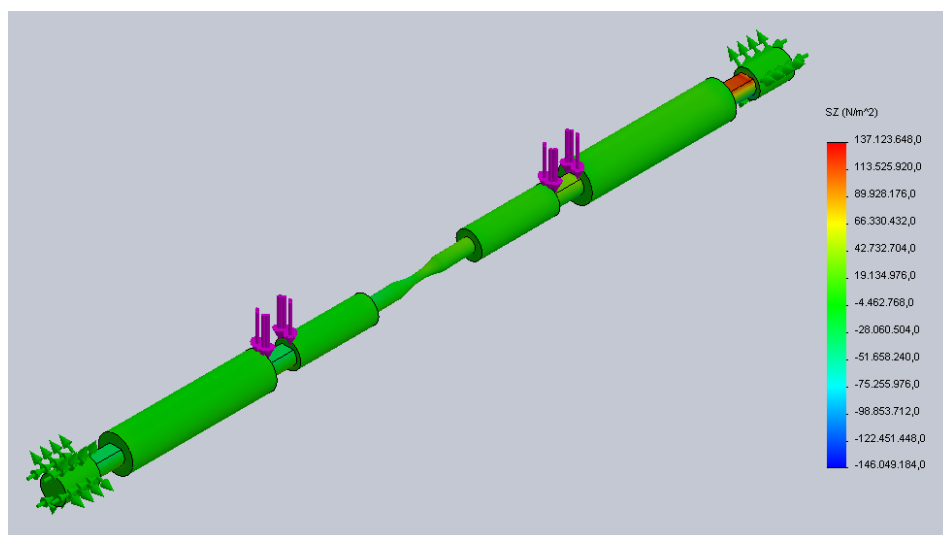


Figura 66. Ejemplo de simulación realizada en CAE.

Se simuló para las diferentes cargas que se aplican sobre las muestras de duralón durante los ensayos, obteniendo los siguientes resultados (Tabla 39).

Tabla 39

Resultados Ensayo de Fatiga.

Muestra	Carga [N]	Esfuerzo Aplicado [MPa]	Ciclos
1	540,8	79,5	2490
2	540,8	79,5	2420
3	540,8	79,5	2683
4	491,7	72,7	4095
5	491,7	72,7	6340
6	491,7	72,7	5747
7	432,0	64,1	12759
8	432,0	64,1	10636
9	432,0	64,1	11268
10	401,7	59,8	20645
11	401,7	59,8	22729
12	401,7	59,8	21596
13	345,9	51,7	100181
14	345,9	51,7	100029
15	345,9	51,7	100185

También es necesario reportar que cuando se aplicó los esfuerzos al 75 y 65% de la carga máxima, las muestras antes de romperse sufrieron un tipo de falla de fatiga que se conoce como fallo térmico.

Cuando la velocidad de transferencia de calor a los alrededores sea por conducción, convección o radiación, es menor a la velocidad con que se genera el calor, se alcanzan las condiciones de inestabilidad térmica. En este caso la temperatura del material aumenta lo que provoca que las propiedades mecánicas del material disminuyan produciéndose la falla sea por deformación o rotura. (Casado Del Prado, 2001)

En este caso la velocidad con que se genera el calor en la muestra se debe a la variación del estado tensional en cortos lapsos de tiempo, esta variación depende de la magnitud de las tensiones impuestas y por la frecuencia a la que son aplicadas.

Por otro lado, las poliamidas tienen baja conductividad térmica lo que provoca que gran parte de la energía producida en forma de calor no se disipe teniendo así un incremento de la temperatura, esto hace que el material se torne demasiado débil precediendo a la propagación de la fisura que conduce al fallo.

Como se puede observar en Antecedentes, autores como M.G. Wyzgoski, G.E. Novak, D.L. Simon concluyen que durante el comportamiento a fatiga de las poliamidas se produce un fuerte calentamiento térmico de histéresis, por lo cual la falla puede considerarse de origen termodinámico.

Este fenómeno de fatiga por falla térmica ocurrió entre los (16000 - 19000) ciclos para el caso de 59,8 [MPa], y para el caso de 51,1 [MPa] las muestras nunca se rompieron solo fallaron por deformación entre (65000 - 70000) ciclos.

Es necesario reportar este fenómeno debido a que las muestras sufren una gran deformación plástica y para que suceda esto las vibraciones en la máquina fueron excesivas, esto en un diseño es un factor muy importante a tomar en cuenta, ya que no hace falta que las muestras se rompan para que su geometría se altere considerablemente.

Los datos obtenidos para el número de ciclos para la falla térmica son un aproximado (apreciación del autor), tomados en el momento en el que las vibraciones dejaron de ser excesivas (Tabla 40).

Tabla 40

Reporte de esfuerzos y número de ciclos para fallo térmico.

Muestra	Carga [N]	Esfuerzo	Ciclos Fatiga
		Aplicado [MPa]	Térmica
10	401,7	59,8	18660
11	401,7	59,8	17070
12	401,7	59,8	16827
13	345,9	51,7	65929
14	345,9	51,7	68669
15	345,9	51,7	66173

A continuación, se puede observar en la Figura 67 la diferencia entre muestras en las cuales el fallo térmico produjo deformación y en el otro caso rotura.



Figura 67. Muestras ensayo de fatiga, fallo por deformación y por rotura.

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presentan todos los resultados obtenidos durante los ensayos de tracción, flexión, corte y fatiga por flexión rotativa realizados al duralón, a los mismos que se realizó un análisis estadístico con el uso del software Minitab, y finalmente una comparación con datos de otras fuentes.

Las normas ASTM recomiendan realizar las pruebas a por lo menos 5 muestras, pero para obtener un valor medio más preciso en el presente trabajo se utilizó 15 muestras para cada ensayo.

Generalmente los datos para obtener la media de una población se ajustan a una distribución normal o casi normal, pero esto no siempre se cumple por lo que se utilizó el ajuste de varias distribuciones (Normal, Weibull, Log-Normal y Log-Logística), con el fin de observar cuál de estas se adapta mejor a los datos de los ensayos, para ello se comparó el estadígrafo Anderson-Darling, y se eligió la que tenía el menor valor de este estadístico.

Una vez se eligió la distribución que más se ajusta a los datos se reportó los parámetros estadísticos que se requieren, que son la media aritmética, desviación estándar y el intervalo de confianza para la media obtenida, esto con un nivel de confianza del 95% de probabilidad.

4.1. Análisis de Resultados Ensayo de Tracción

4.1.1. Esfuerzo de Tracción Máximo

Tabla 41

Datos esfuerzo de tracción máximo.

No. Muestra	Esfuerzo Máximo [MPa]
1	78,0
2	77,8
3	73,4
4	76,1
5	74,6
6	77,7
7	75,3
8	77,9
9	76,8
10	74,1
11	78,0
12	76,8
13	76,2
14	75,6
15	76,5

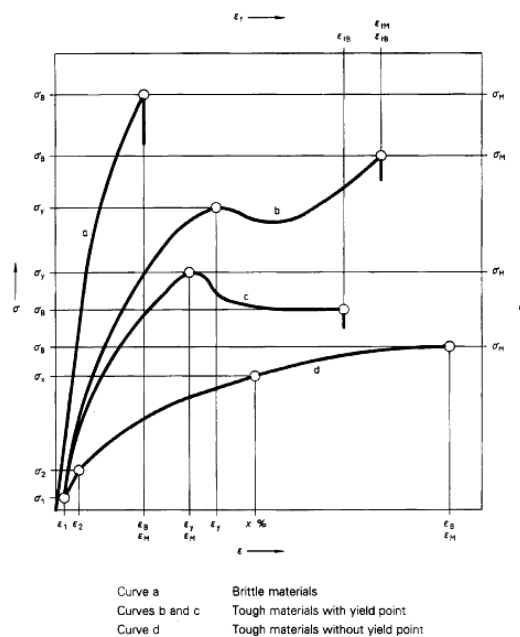


Figura 68. Curvas típicas esfuerzo/deformación, Ensayo de Tracción.

Fuente: ISO 527-1.

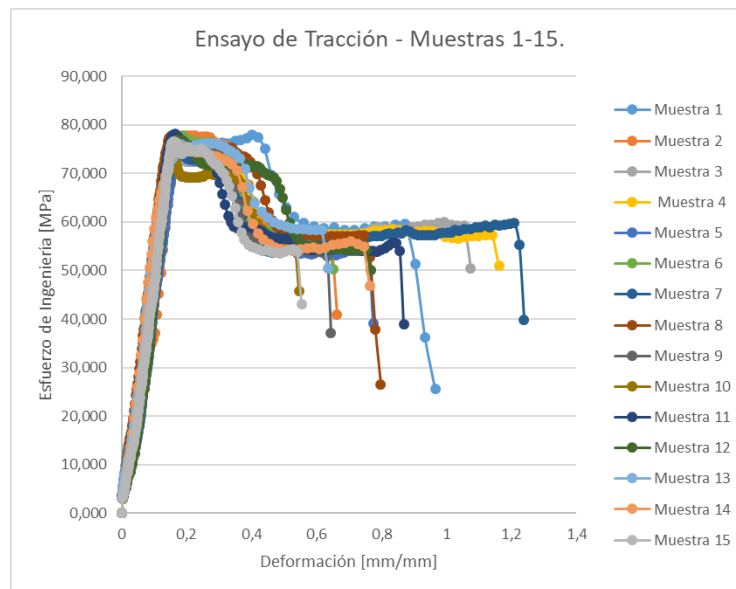


Figura 69. Diagrama esfuerzo de ingeniería - deformación unitaria muestras 1-15.

Como se puede comparar al observar las Figuras 68 y 69, el comportamiento de las muestras a tracción corresponde a las curvas típicas de esfuerzo – deformación de materiales plásticos duros con límite elástico, por lo tanto más adelante será posible obtener el esfuerzo de fluencia.

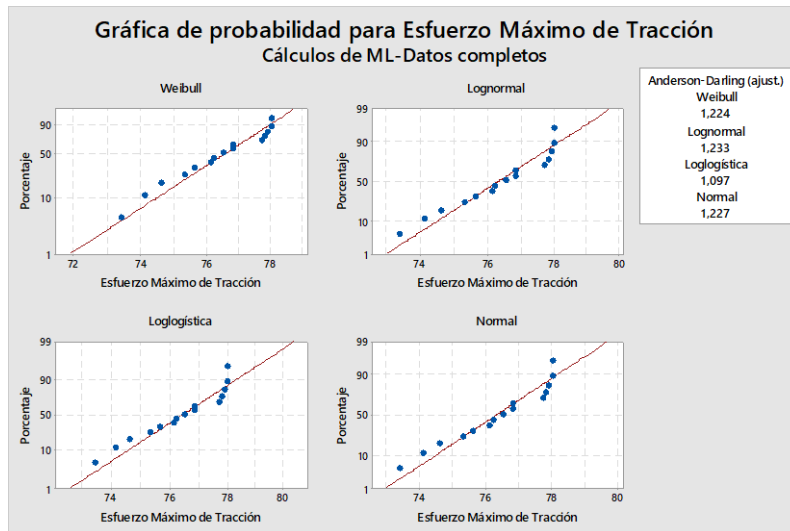


Figura 70. Distribuciones de Probabilidad para los datos de Esfuerzo Máximo a Tracción.

Como se puede observar en la Figura 70 el menor estadígrafo Anderson-Darling corresponde a la distribución Log-Logística, esto indica que esta distribución se ajustó más a los datos de esfuerzo máximo.

Seguidamente se realizó un mejor análisis utilizando la distribución Log-Logística, para obtener el valor de la media de la muestra y de la desviación estándar (Figura 71).

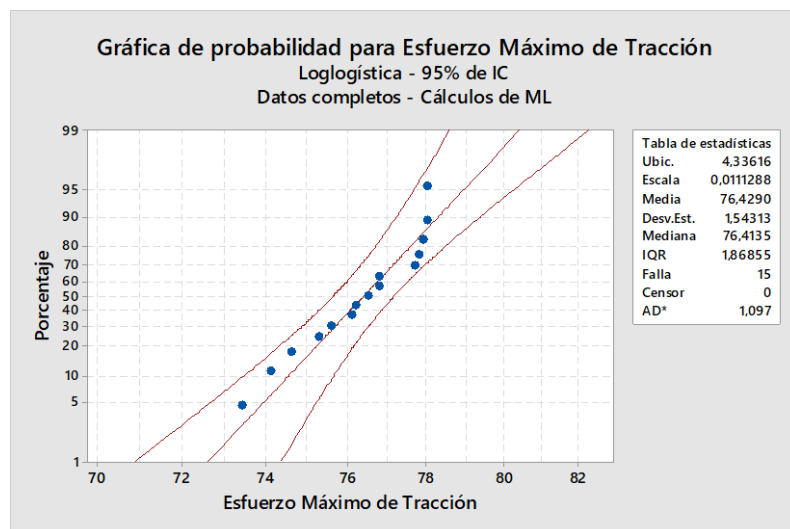


Figura 71. Distribución Log-Logística para datos de Esfuerzo Máximo a Tracción.

Finalmente, se obtiene el intervalo de confianza para tener un estimado del rango de valores que puede adquirir la media poblacional utilizando la distribución t-Student (Tabla 41).

Tabla 42
Resultados del Esfuerzo Máximo a Tracción.

Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
15	76,429	1,543	0,398	(75,574; 77,284)

μ : media de Muestra

Por lo tanto, el valor medio de la muestra del Esfuerzo Máximo a tracción es 76,429 [MPa], con una desviación estándar de 1,543 [MPa], y con un 95% de confiabilidad se puede decir que la media poblacional puede variar entre [75,574; 77,284] [MPa].

Debido a que el material con el que se trabajó se comercializa como Nylon 6, las propiedades del ensayo de tracción se compararon con los valores correspondientes para dicho material.

Los materiales de comparación son el Zytel 7301 NC010 y el Nylatron NSM, los cuales son poliamidas sin refuerzos, fabricado por la empresa DuPont y Quadrant respectivamente. (Anexo 12 y 13)

Tabla 43
Esfuerzo Máximo a Tracción - Varias fuentes.

Material	Esfuerzo Máximo a Tracción [MPa]	
	Valor [MPa]	Fuente
Nylon 6A	75,6 – 77,3	Francisco Velásquez
Zytel 7301 NC010	80	DuPont Company Web Site
Nylatron NSM	75,8	Quadrant

Como se puede observar en la Tabla 42 los valores varían entre ± 4 [MPa], por lo tanto, se puede concluir que el material ensayado si cumple con el valor del esfuerzo a tracción máximo.

4.1.2. Esfuerzo de Fluencia

Tabla 44

Datos esfuerzo de fluencia a tracción.

No. Muestra	Esfuerzo Fluencia [MPa]
1	75,5
2	77,7
3	72,2
4	75,9
5	72,6
6	76,3
7	72,9
8	75,3
9	74,2
10	69,2
11	75,6
12	76,7
13	76,1
14	75,6
15	74,3

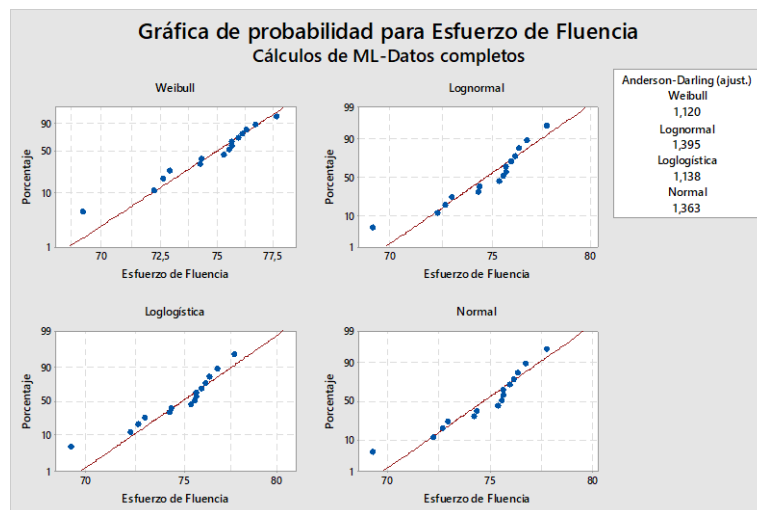


Figura 72. Distribuciones de Probabilidad para los datos de Esfuerzo de Fluencia a Tracción.

Como se puede observar en la Figura 72 el menor estadígrafo Anderson-Darling corresponde a la distribución Weibull, esto indica que esta distribución se ajustó más a los datos de esfuerzo a la fluencia.

Seguidamente se realizó un mejor análisis utilizando la distribución Weibull, para obtener el valor de la media de la muestra y de la desviación estándar (Figura 73).

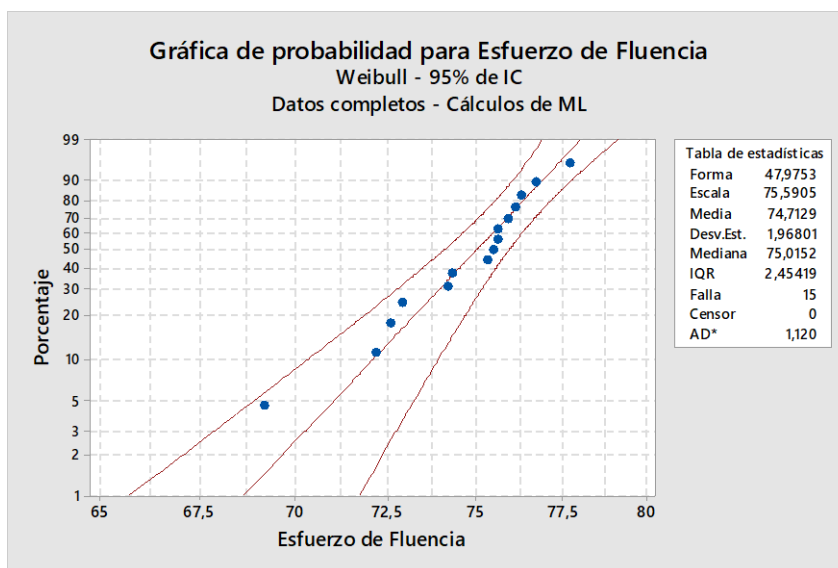


Figura 73. Distribución Weibull para datos de Esfuerzo de Fluencia a Tracción.

Finalmente, se obtiene el intervalo de confianza para tener un estimado del rango de valores que puede adquirir la media poblacional utilizando la distribución t-Student (Tabla 43).

Tabla 45
Resultados del Esfuerzo de Fluencia a Tracción.

Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
15	74,713	1,968	0,508	(73,623; 75,803)

μ : media de Muestra

El valor medio de la muestra del Esfuerzo de fluencia a tracción es 74,713 [MPa], con una desviación estándar de 1,968 [MPa], y con un 95% de confiabilidad se puede decir que la media poblacional puede variar entre [73,623; 75,803] [MPa].

4.1.3. Módulo de Elasticidad a Tracción

Tabla 46

Datos Módulo de elasticidad a tracción.

Muestra	Módulo de Elasticidad [MPa]
1	3005,0
2	2968,6
3	3071,3
4	3394,6
5	3158,3
6	3087,3
7	3131,0
8	3049,9
9	3104,6
10	3153,0
11	3087,2
12	3129,0
13	3085,2
14	2986,3
15	3158,4

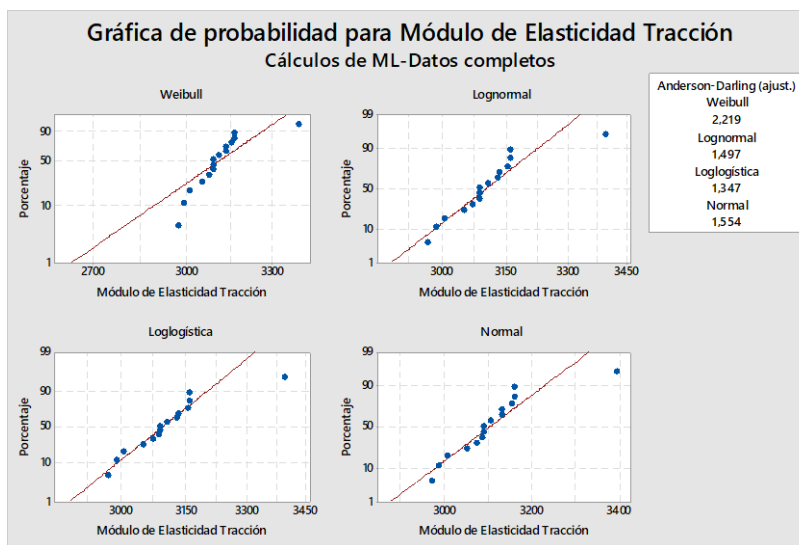


Figura 74. Distribuciones de Probabilidad para los datos de Módulo de Elasticidad a Tracción.

Como se puede observar en la Figura 74 el menor estadígrafo de Anderson-Darling corresponde a la distribución Log-Logística, esto indica que esta distribución se ajustó más a los datos de módulo de elasticidad a tracción.

Seguidamente se realizó un mejor análisis utilizando la distribución Log-Logística, para obtener el valor de la media de la muestra y de la desviación estándar (Figura 75).

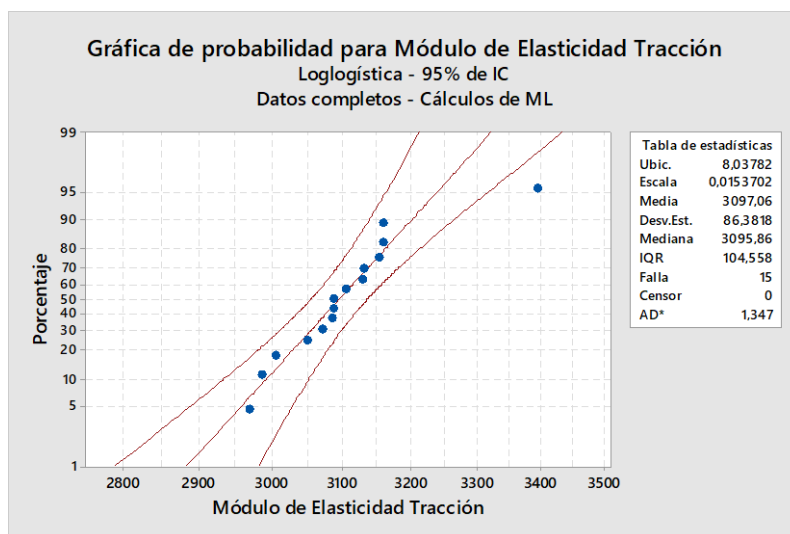


Figura 75. Distribución Log-Logística para datos de Módulo de Elasticidad a Tracción.

Finalmente, se obtiene el intervalo de confianza para tener un estimado del rango de valores que puede adquirir la media poblacional utilizando la distribución t-Student (Tabla 44).

Tabla 47
Resultados del Módulo de Elasticidad a Tracción.

Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
15	3097,1	86,4	22,3	(3049,2; 3144,9)

μ : media de Muestra

Por lo tanto, el valor medio de la muestra para el módulo de elasticidad a tracción es 3097,1 [MPa], con una desviación estándar de 86,4 [MPa], y con un 95% de confiabilidad se puede decir que la media poblacional puede variar entre [3049,2; 3144,9] [MPa].

Tabla 48

Módulo de Elasticidad a Tracción - Varias fuentes.

Módulo de Elasticidad a Tracción [MPa]

Material	Valor [MPa]	Fuente
Nylon 6A	3049,2 - 3144,9	Francisco Velásquez
Zytel 7301 NC010	2900	DuPont Company Web Site
Nylatron NSM	2830	Quadrant

Como se puede observar en la Tabla 45, los valores varían entre ± 219 [MPa] por lo tanto se puede concluir que el material ensayado si cumple con el valor del módulo de elasticidad a la tracción.

4.1.4. Porcentaje de Elongación

Tabla 49

Datos porcentaje de elongación a tracción.

No. Muestra	Porcentaje Elongación [%]
1	46,3
2	34,7
3	60,9
4	68,8
5	45,1
6	36,4
7	77,3
8	43,4
9	35,3
10	30,8
11	53,7
12	42,8
13	35,3
14	45,3
15	30,1

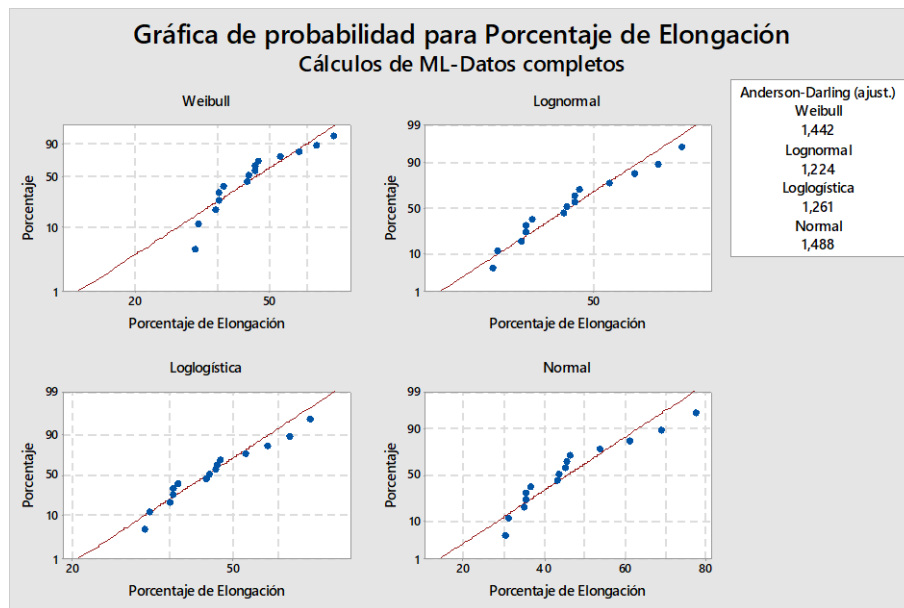


Figura 76. Distribuciones de Probabilidad para los datos de Porcentaje de Elongación a Tracción.

Como se puede observar en la Figura 76 el menor estadístico de Anderson-Darling corresponde a la distribución Log-Normal, esto indica que esta distribución se ajustó más a los datos del porcentaje de elongación a la tracción.

Seguidamente se realizó un mejor análisis utilizando la distribución Log-Normal, para obtener el valor de la media de la muestra y de la desviación estándar (Figura 77).

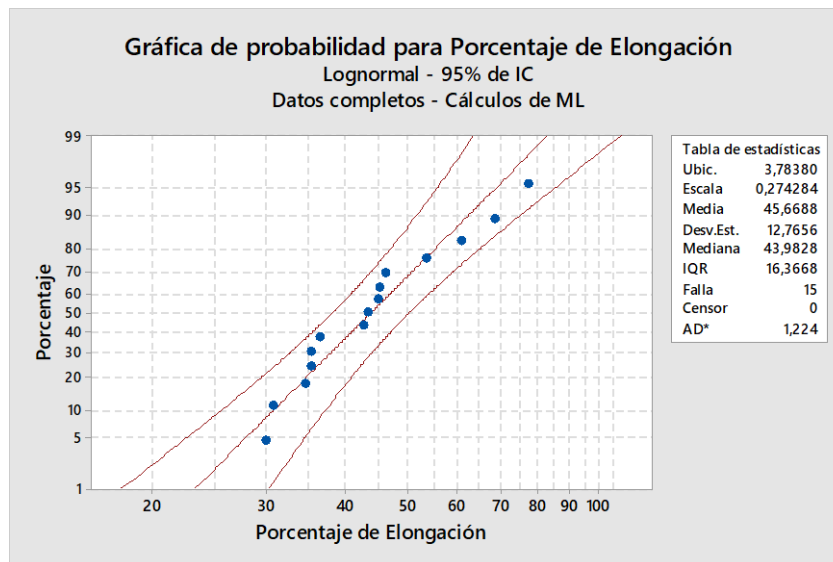


Figura 77. Distribución Log-Normal para datos de Porcentaje de Elongación a Tracción.

Finalmente, se obtiene el intervalo de confianza para tener un estimado del rango de valores que puede adquirir la media poblacional utilizando la distribución t-Student (Tabla 46).

Tabla 50

Resultados del Porcentaje de Elongación a Tracción.

Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
15	45,67	12,77	3,30	(38,60; 52,74)

μ : media de Muestra

Por lo tanto, el valor medio de la muestra para el porcentaje de elongación a tracción es 45,67%, con una desviación estándar de 12,77%, y con un 95% de confiabilidad se puede decir que la media poblacional puede variar entre [38,60 – 52,74] %.

Tabla 51*Porcentaje de Elongación a Tracción.*

Porcentaje de Elongación a Tracción [%]		
Material	Valor [%]	Fuente
Nylon 6A	36,6 – 52,74	Francisco Velásquez
Zytel 7301 NC010	50	DuPont Company Web Site

Como se puede observar en la Tabla 47, el valor del porcentaje de elongación se encuentra dentro del rango esperado para la media poblacional, pero cabe aclarar que el porcentaje de desviación estándar puede estar muy alto, por lo cual sería recomendado realizar más ensayos para tener una mejor precisión de los datos.

4.2. Análisis de Resultados Ensayo de Flexión

4.2.1. Esfuerzo de Flexión máximo

Tabla 52*Datos esfuerzo de flexión máximo.*

Muestra	Esfuerzo de Flexión [MPa]
1	74,0
2	81,9
3	79,6
4	81,2
5	79,5
6	78,1
7	77,5
8	79,0
9	77,4
10	77,9
11	80,1
12	78,8
13	76,9
14	79,8
15	79,5

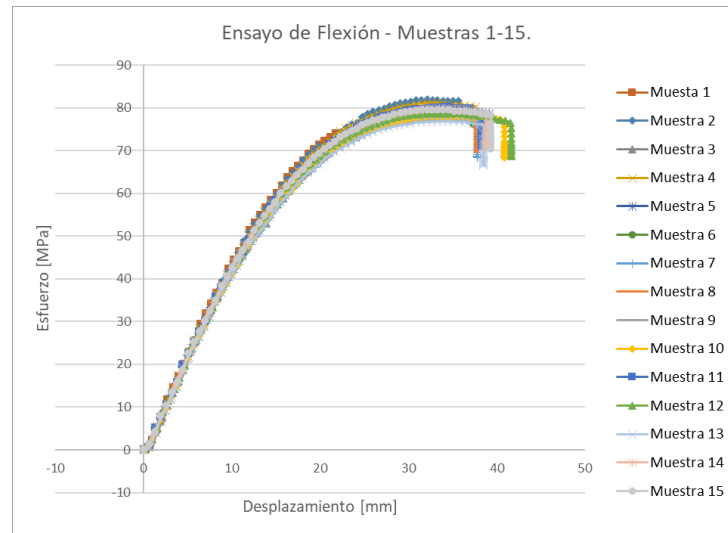


Figura 78. Diagrama esfuerzo - desplazamiento - Muestras 1-15.

A pesar de que la Figura 68 corresponde a las curvas típicas de esfuerzo – deformación para ensayos de tracción, se puede realizar una comparación con la figura 78 y observar que el comportamiento de las muestras a flexión corresponde a los materiales poliméricos duros sin punto de fluencia, razón por la cual no se calculó el esfuerzo de fluencia sino el límite de proporcionalidad.

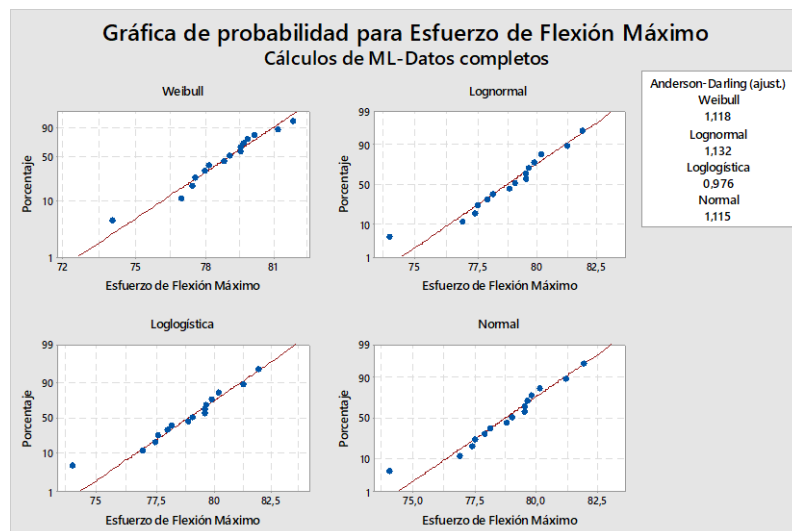


Figura 79. Distribuciones de Probabilidad para los datos de Esfuerzo Máximo a Flexión.

Como se puede observar en la Figura 79 el menor estadígrafo Anderson-Darling corresponde a la distribución Log-Logística, esto indica que esta distribución se ajustó más a los datos de esfuerzo máximo a flexión.

Seguidamente se realizó un mejor análisis utilizando la distribución Log-Logística, para obtener el valor de la media de la muestra y de la desviación estándar (Figura 80).

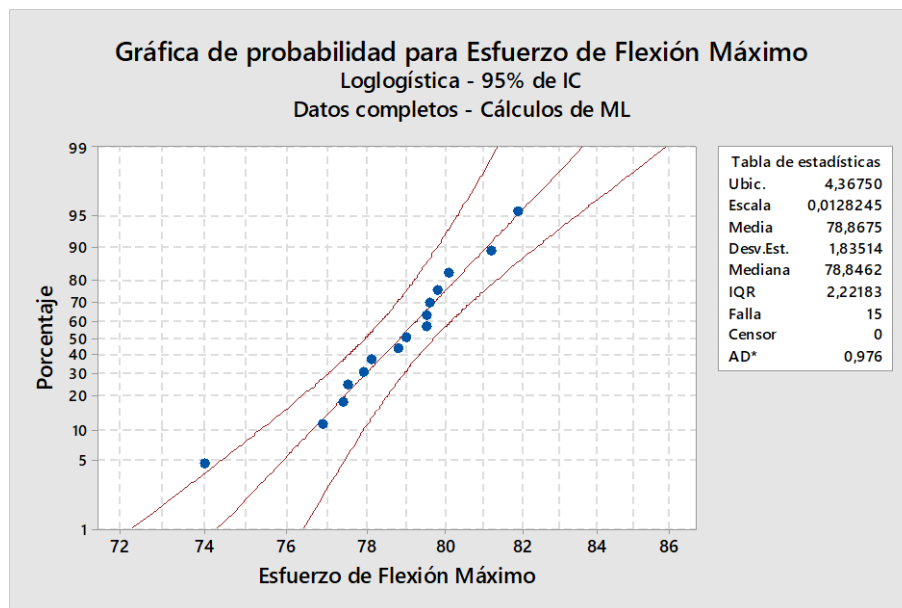


Figura 80. Distribución Log-Logística para datos de Esfuerzo Máximo a Flexión.

Finalmente, se obtiene el intervalo de confianza para tener un estimado del rango de valores que puede adquirir la media poblacional utilizando la distribución t-Student (Tabla 48).

Tabla 53*Resultados del Esfuerzo Máximo a Flexión.***Estadísticas descriptivas**

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
15	78,868	1,835	0,474	(77,851; 79,884)

 μ : media de Muestra

Por lo tanto, el valor medio de la muestra del Esfuerzo Máximo a flexión es 78,868 [MPa], con una desviación estándar de 1,835 [MPa], y con un 95% de confiabilidad se puede decir que la media poblacional puede variar entre [77,851; 79,884] [MPa].

Debido a que el material con el que se trabajó se comercializa como Nylon 6, las propiedades del ensayo de flexión se compararon con los valores correspondientes para dicho material (Tabla 49).

Tabla 54*Esfuerzo máximo a Flexión.***Esfuerzo Máximo a Flexión [MPa]**

Material	Valor [MPa]	Fuente
Nylon 6A	77,85 – 79,88	Francisco Velásquez
Nylatron NSM	110	Quadrant

4.2.2. Esfuerzo límite de proporcionalidad por flexión**Tabla 55***Datos esfuerzo límite de proporcionalidad a flexión.*

Muestra	Esfuerzo Límite de Proporcionalidad [MPa]
1	65,1
2	63,4
3	57,3
4	64,1

CONTINÚA

5	63,2
6	60,9
7	61,0
8	61,9
9	60,7
10	59,9
11	64,2
12	62,9
13	59,5
14	62,0
15	62,9

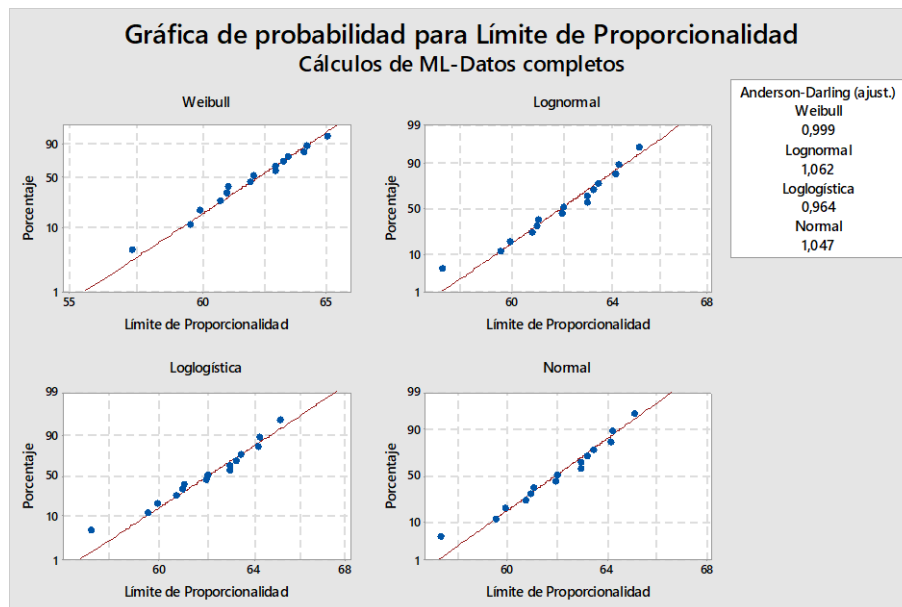


Figura 81. Distribuciones de Probabilidad para datos del Límite de proporcionalidad a Flexión.

Como se puede observar en la Figura 81 el menor estadígrafo Anderson-Darling corresponde a la distribución Log-Logística, esto indica que esta distribución se ajustó más a los datos de esfuerzo límite de proporcionalidad por flexión.

Seguidamente se realizó un mejor análisis utilizando la distribución Log-Logística, para obtener el valor de la media de la muestra y la desviación estándar (Figura 82).

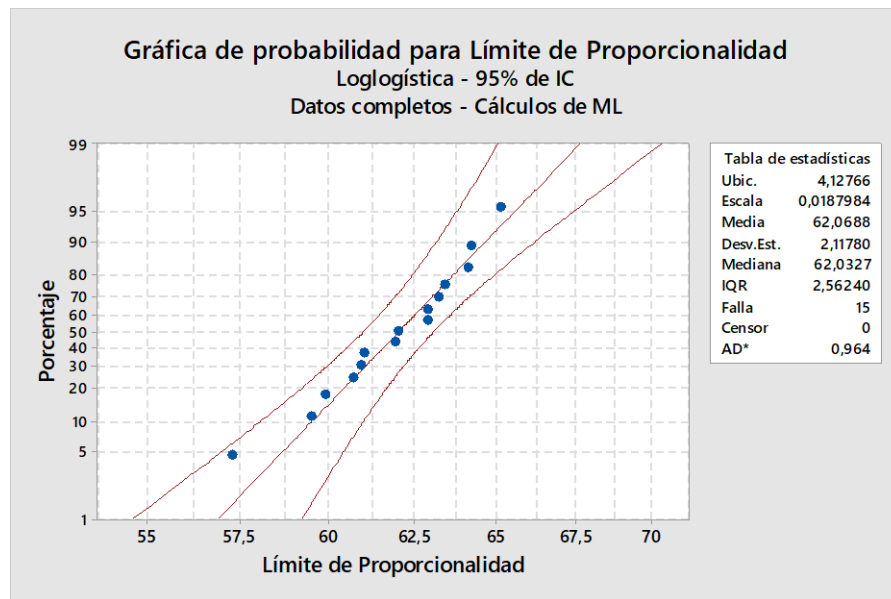


Figura 82. Distribución Log-Logística para datos de Esfuerzo Límite de Proporcionalidad.

Finalmente, se obtiene el intervalo de confianza para tener un estimado del rango de valores que puede adquirir la media poblacional utilizando la distribución t-Student (Tabla 50).

Tabla 56

Resultados del Esfuerzo Límite de proporcionalidad a Flexión.

Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
15	62,069	2,118	0,547	(60,896; 63,242)

μ : media de Muestra

Por lo tanto, el valor medio de la muestra del Esfuerzo límite de proporcionalidad a flexión es 62,069 [MPa], con una desviación estándar de 2,118 [MPa], y con un 95% de confiabilidad se puede decir que la media poblacional puede variar entre [60,896; 63,242] [MPa].

4.2.3. Módulo de Elasticidad por flexión

Tabla 57

Datos módulo de elasticidad a flexión.

Muestra	E_B
1	1829,0
2	1846,4
3	1739,9
4	1755,7
5	1719,5
6	1746,6
7	1726,4
8	1737,8
9	1658,8
10	1702,3
11	1753,8
12	1771,3
13	1753,1
14	1795,3
15	1777,1

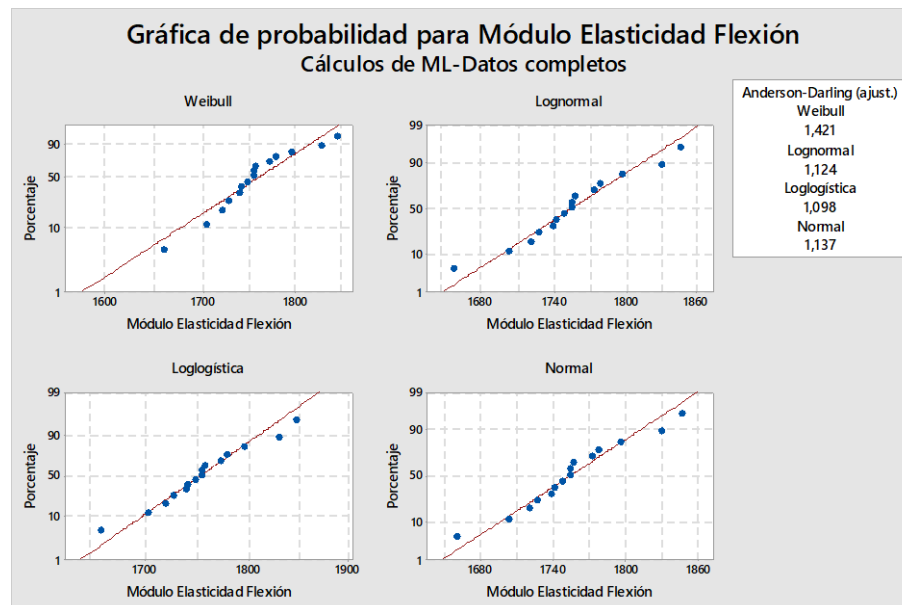


Figura 83. Distribuciones de Probabilidad para los datos del Módulo de Elasticidad a Flexión.

Como se puede observar en la Figura 83 el menor estadígrafo Anderson-Darling corresponde a la distribución Log-Logística, esto indica que esta distribución se ajustó más a los datos del módulo de elasticidad a flexión.

Seguidamente se realizó un mejor análisis utilizando la distribución Log-Logística, para obtener el valor de la media de la muestra y de la desviación estándar (Figura 84).

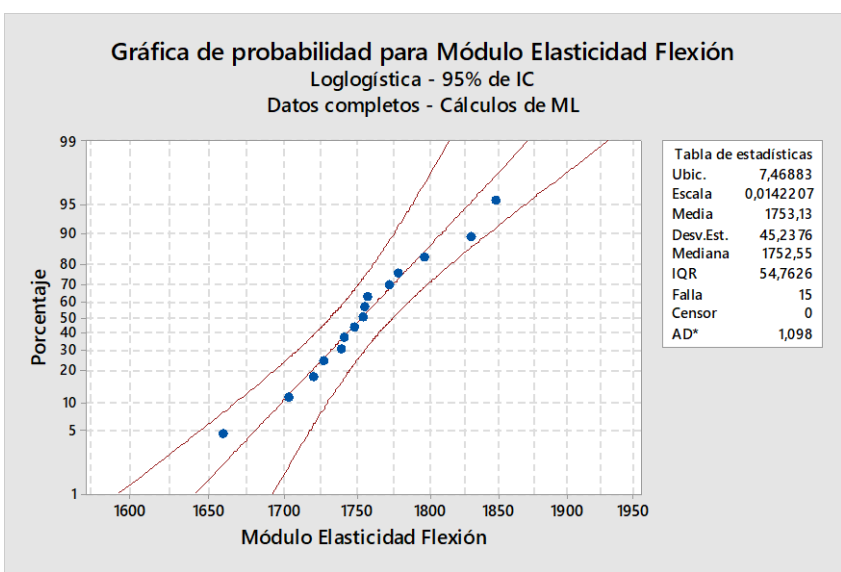


Figura 84. Distribución Log-Logística para datos del Módulo de Elasticidad a Flexión.

Finalmente, se obtiene el intervalo de confianza para tener un estimado del rango de valores que puede adquirir la media poblacional utilizando la distribución t-Student (Tabla 51).

Tabla 58
Resultados del Módulo de Elasticidad a Flexión.

Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
15	1753,1	45,2	11,7	(1728,1; 1778,2)

μ : media de Muestra

Por lo tanto, el valor medio de la muestra para el Módulo de Elasticidad a Flexión es 1753,1 [MPa], con una desviación estándar de 45,2 [MPa], y con un 95% de confiabilidad se puede decir que la media poblacional puede variar entre [1728,1; 1778,2] [MPa].

Tabla 59

Módulo de Elasticidad a Flexión - Varias fuentes.

Módulo de Elasticidad a Flexión [MPa]

Material	Valor [MPa]	Fuente
Nylon 6A	1728,1 – 1778,2	Francisco Velásquez
Nylatron NSM	3280	Quadrant

Como se puede observar en la Tabla 52, los valores del esfuerzo máximo y módulo de elasticidad no se aproximan a los obtenidos dando a entender que el material o no cumple con sus propiedades a flexión, o que se trate de otro tipo de poliamida que no sea el nylon 6.

Además, haciendo una comparación entre el módulo de elasticidad obtenido a tracción (3097,1 [MPa]) y flexión (1753,1 [MPa]), varían significativamente, siendo este otro motivo que da entender que el material ensayado no corresponde al nylon 6. Esto se verificará más adelante con los resultados del ensayo cortante ya que estas fueron extraídas de la misma plancha de duralón.

4.3. Análisis de Resultados Ensayo Cortante

4.3.1. Esfuerzo Cortante Máximo

Tabla 60

Datos esfuerzo cortante máximo.

Muestra	Esfuerzo Cortante [MPa]
1	58,7
2	59,0
3	60,3
4	59,2
5	58,5
6	57,7
7	54,2
8	57,7
9	57,4
10	57,3
11	56,5
12	56,9
13	56,5
14	57,5
15	56,8

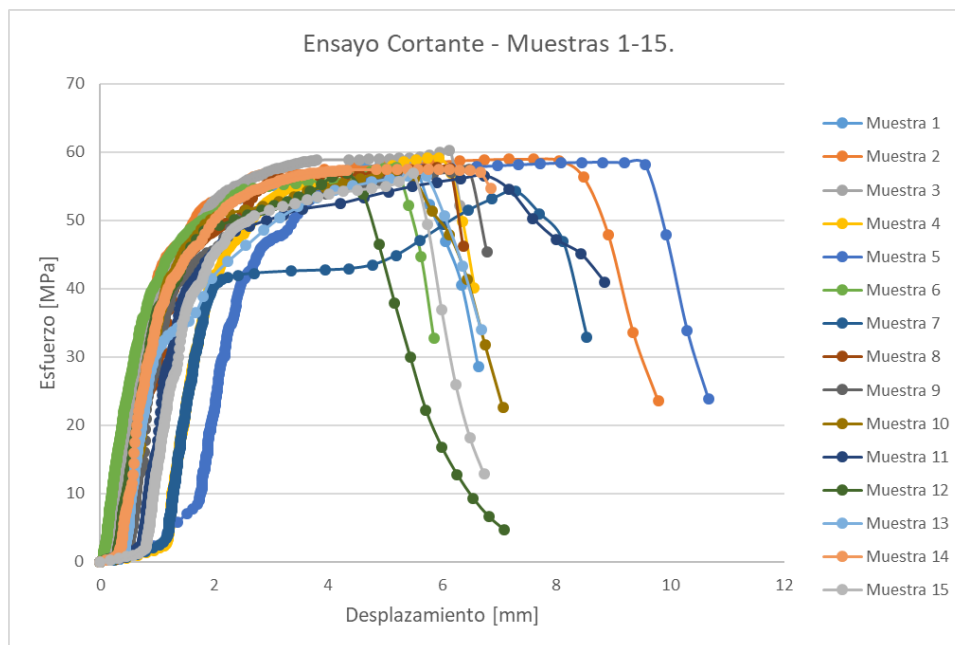


Figura 85. Diagrama esfuerzo - desplazamiento, muestras 1-15.

De la misma manera que ocurrió en el ensayo de flexión, como se observa en la Figura 85 del diagrama esfuerzo – desplazamiento, el comportamiento de las muestras corresponde a la curva típica de materiales poliméricos duros sin punto de elasticidad, razón por la cual se calculó el límite de proporcionalidad mas no el esfuerzo de fluencia.

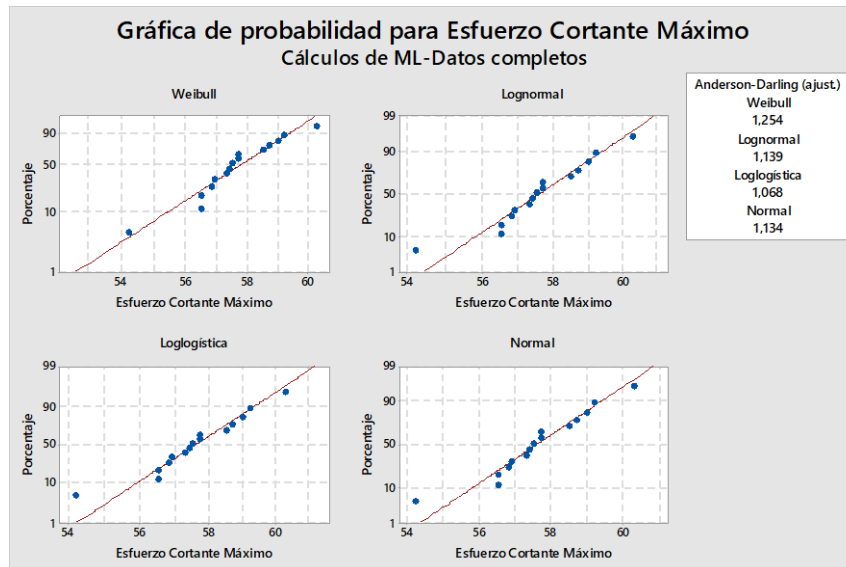


Figura 86. Distribuciones de Probabilidad para los datos de Esfuerzo Máximo Cortante.

Como se puede observar en la Figura 86 el menor estadígrafo Anderson-Darling corresponde a la distribución Log-Logística, esto indica que esta distribución se ajustó más a los datos de esfuerzo máximo cortante.

Seguidamente se realizó un mejor análisis utilizando la distribución Log-Logística, para obtener el valor de la media de la muestra y de la desviación estándar (Figura 87).

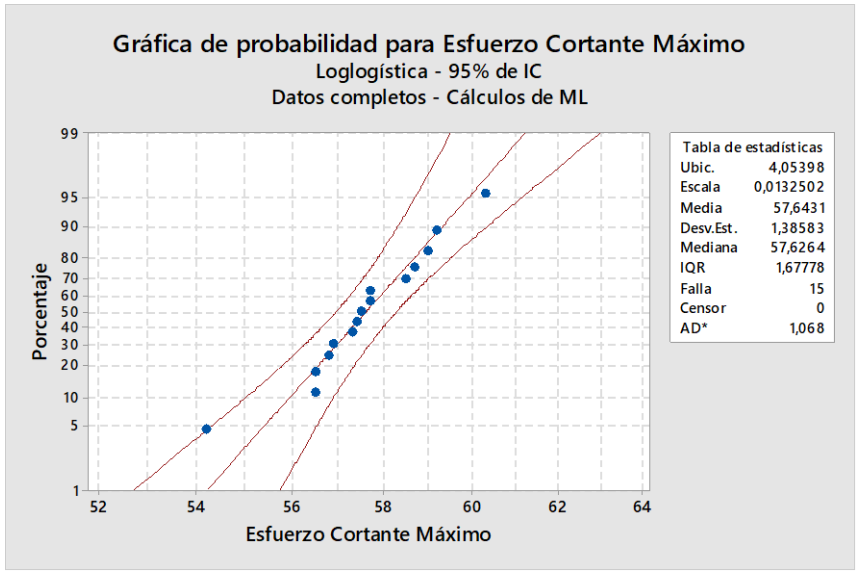


Figura 87. Distribución Log-Logística para datos de Esfuerzo Máximo Cortante.

Finalmente, se obtiene el intervalo de confianza para tener un estimado del rango de valores que puede adquirir la media poblacional utilizando la distribución t-Student (Tabla 53).

Tabla 61
Resultados del Esfuerzo Máximo Cortante.

Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
15	57,643	1,386	0,358	(56,876; 58,411)

μ : media de Muestra

Por lo tanto, el valor medio de la muestra del Esfuerzo Máximo Cortante es 57,643 [MPa], con una desviación estándar de 1,386 [MPa], y con un 95% de confiabilidad se puede decir que la media poblacional puede variar entre [56,876; 58,411] [MPa].

Debido a que el material con el que se trabajó se comercializa como Nylon 6, las propiedades del ensayo cortante se compararon con los valores correspondientes para dicho material (Tabla 54).

Tabla 62

Esfuerzo Cortante Máximo.

Esfuerzo Cortante Máximo [MPa]		
Material	Valor [MPa]	Fuente
Nylon 6A	56,88 – 58,41	Francisco Velásquez
Nylatron NSM	68,9	Quadrant

Por lo tanto, en comparación con los resultados obtenidos del ensayo de flexión y cortante se puede observar que el material no cumple con los valores recomendados por otras empresas que comercializan el mismo material. Por lo tanto, se puede confirmar que la plancha de duralón no es Nylon 6.

4.3.2. Límite de proporcionalidad esfuerzo cortante

Tabla 63

Datos límite de proporcionalidad esfuerzo cortante.

Muestra	Esfuerzo Límite de Proporcionalidad [MPa]
1	42,6
2	35,2
3	39,3
4	36,9
5	36,2
6	38,2
7	39,7
8	38,5
9	35,1
10	38,9
11	37,6
12	38,5
13	30,3
14	37,5
15	38,7

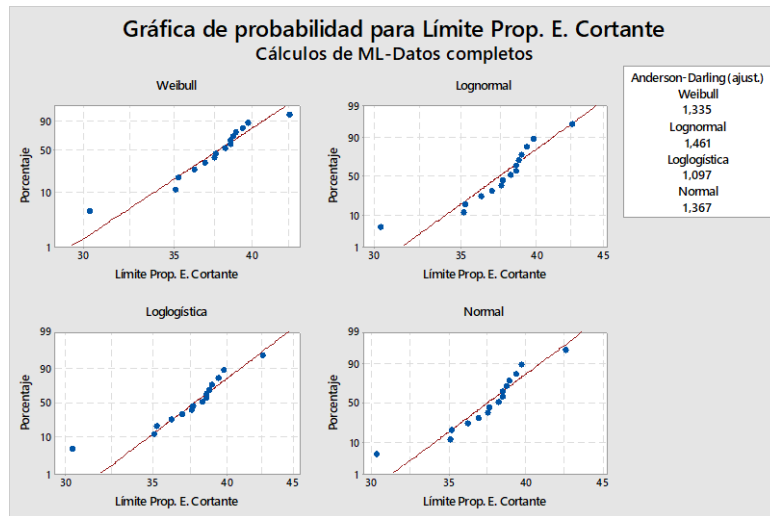


Figura 88. Distribuciones de Probabilidad para los datos de Límite de Proporcionalidad Cortante.

Como se puede observar en la Figura 88 el menor estadígrafo Anderson-Darling corresponde a la distribución Log-Logística, esto indica que esta distribución se ajustó más a los datos de esfuerzo máximo cortante.

Seguidamente se realizó un mejor análisis utilizando la distribución Log-Logística, para obtener el valor de la media de la muestra y de la desviación estándar (Figura 89).

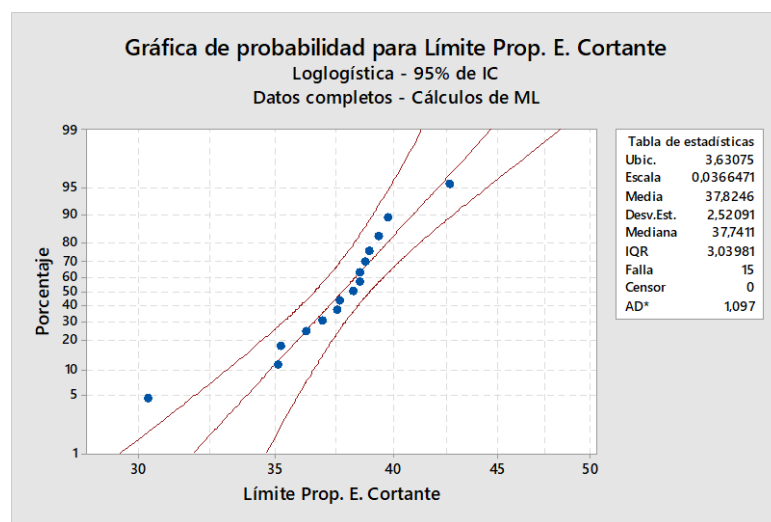


Figura 89. Distribución Log-Logística para datos de Esfuerzo Límite de Proporcionalidad Cortante.

Finalmente, se obtiene el intervalo de confianza para tener un estimado del rango de valores que puede adquirir la media poblacional utilizando la distribución t-Student (Tabla 55).

Tabla 64

Resultado del Esfuerzo Límite de Proporcionalidad Cortante.

Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
15	37,825	2,521	0,651	(36,429; 39,221)

μ : media de Muestra

Por lo tanto, el valor medio de la muestra del Esfuerzo Límite de Proporcionalidad a Cortante es 37,825 [MPa], con una desviación estándar de 2,521 [MPa], y con un 95% de confiabilidad se puede decir que la media poblacional puede variar entre [36,429; 39,221] [MPa].

4.4. Análisis de Resultados Ensayo de Fatiga

4.4.1. Curva S-N

Tabla 65

Datos para curva S-N.

Muestra	Esfuerzo Aplicado [MPa]	Ciclos
1	79,5	2490
2	79,5	2420
3	79,5	2683
4	72,7	4095
5	72,7	6340
6	72,7	5747
7	64,1	12759
8	64,1	10636
9	64,1	11268

CONTINÚA

10	59,8	20645
11	59,8	22729
12	59,8	21596
13	51,7	100181
14	51,7	100029
15	51,7	100185

Tabla 66

Datos fatiga S-N (falla térmica).

Muestra	Esfuerzo Aplicado [MPa]	Ciclos Fatiga Térmica
10	59,8	18660
11	59,8	17070
12	59,8	16827
13	51,7	65929
14	51,7	68669
15	51,7	66173

Se procedió a graficar el diagrama de dispersión S-N para los dos tipos de falla ya sea por los esfuerzos o por fatiga térmica.

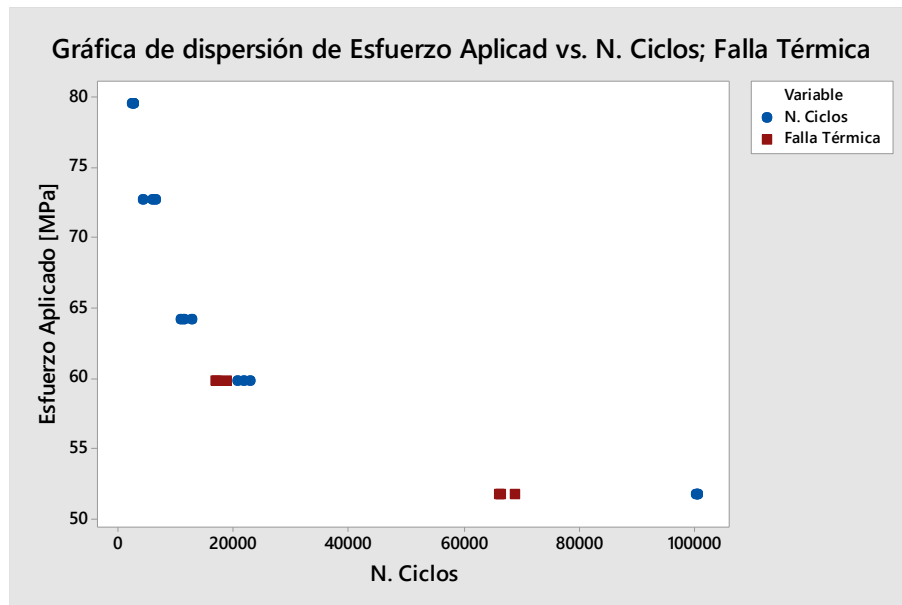


Figura 90. Diagrama S-N Ensayo de Fatiga.

Como se puede observar en la Figura 90, los puntos en color rojo corresponden al número de ciclos al que ocurrió la falla por fatiga térmica para un determinado esfuerzo cíclico aplicado, estos datos no se los tomará en cuenta para la regresión no lineal presentada a continuación.

Las condiciones y argumentos para realizar la siguiente regresión no lineal se basaron en la norma ASTM E739-10 “Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ε -N) Fatigue Data”. (American Society for Testing and Materials, 2010)

La ecuación que más se ajusta para este tipo de datos corresponde a la ecuación exponencial de la forma:

Ecuación 17 Ecuación exponencial.

$$N = aS^b$$

Aplicando las propiedades de logaritmos con base 10 nos queda la siguiente ecuación:

$$\log N = \log a + b \log S$$

La cual por facilidad se la puede expresar de la siguiente manera:

$$Y = \hat{A} + \hat{b}X$$

Donde:

Ecuación 18 Fórmula para el estimador b.

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

Ecuación 19 Fórmula para el estimador A.

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

$$X_i = \log S_i$$

$$Y_i = \log N_i$$

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

$$\bar{X} = 1,812$$

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

$$\bar{Y} = 4,105$$

Tabla 67
Log Si – Log Yi.

X_i	Y_i
1,900	3,396
1,900	3,384
1,900	3,429
1,862	3,612
1,862	3,802
1,862	3,759
1,807	4,106
1,807	4,027
1,807	4,052
1,777	4,315
1,777	4,357
1,777	4,334
1,713	5,001
1,713	5,000
1,713	5,001

Sustituyendo los valores necesarios en las ecuaciones 18 y 19 tenemos:

$$\hat{b} = -8,334$$

$$\hat{A} = 19,205$$

$$\log N = 19,205 - 8,334 \log S$$

$$\log S = 2,304 - 0,120 \log N$$

$$S = 201,520N^{-0,120}$$

Una vez se obtuvo la ecuación exponencial que más se ajusta a los datos se procedió a graficar la curva S-N (Figura 91 y 92), para tener una mejor idea de cómo es el comportamiento a fatiga del Nylon 6 bajo cargas cíclicas.

Tabla 68

Datos S-N (función exponencial).

S	N
78,855	2490
79,125	2420
78,152	2683
74,286	4095
70,490	6340
71,326	5747
64,817	12759
66,248	10636
65,790	11268
61,180	20645
60,478	22729
60,851	21596
50,618	100181
50,627	100029
50,618	100185

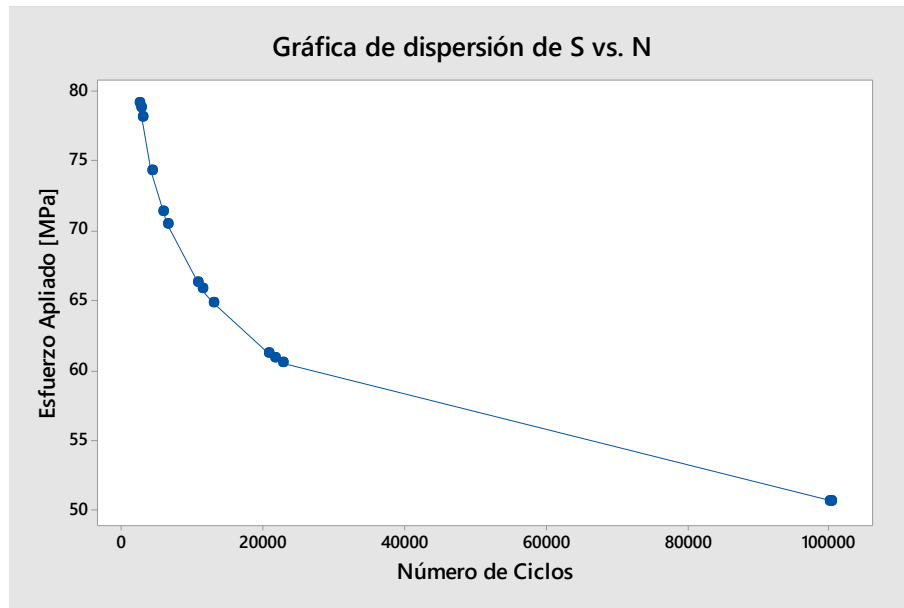


Figura 91. Curva S-N ensayo de fatiga por flexión rotativa. (Minitab)

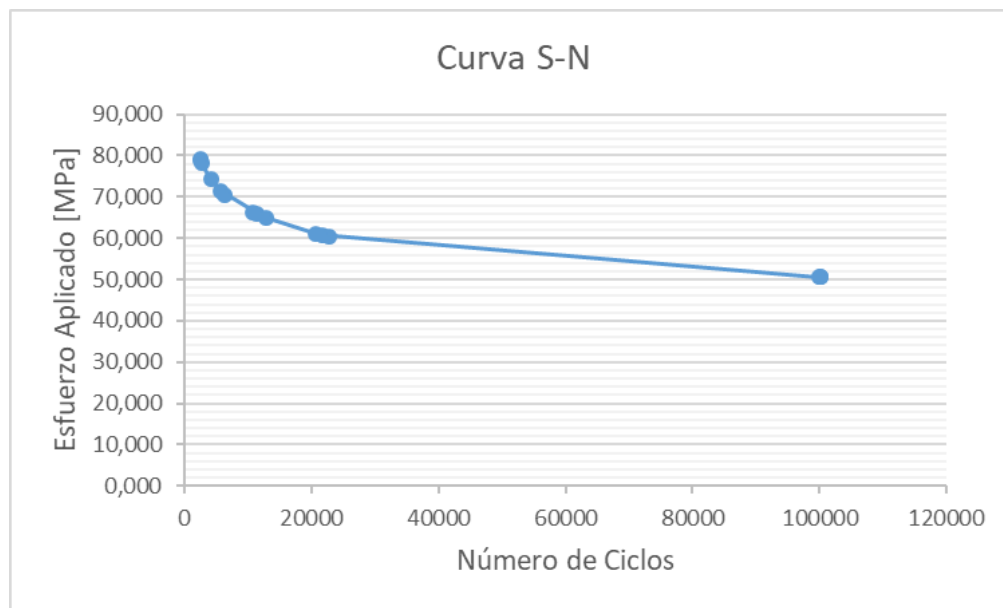


Figura 92. Curva S-N ensayo de fatiga por flexión rotativa. (Excel)

CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS ECONÓMICO

El análisis económico tiene como finalidad proporcionar a estudiantes, docentes o personas en particular una referencia económica de cuánto cuesta realizar cada uno de los 4 tipos de ensayos realizados. Para esto se proporcionará un análisis por separado de los costos autofinanciados y de los costos financiados por la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

5.1. Análisis Costos Autofinanciados

Los costos autofinanciados corresponden a los gastos realizados durante el presente trabajo los cuales el estudiante debe cubrirlos, se basan principalmente en los costos de mano de obra y proveedores del mercado nacional.

A continuación, se muestra una tabla detallando los gastos que se realizaron.

Tabla 69
Costos Autofinanciados.

Costos Autofinanciados			
Ensayo de Tracción			
Cantidad	Descripción	P. Unitario (\$)	P. Total (\$)
1,79	Barra Nylon 6A	12	21,48
15	Maquinado muestra E. Tracción	15	225
Ensayo de Flexión			
1,07	Lámina Nylon 6A	12	12,84
15	Corte muestras E. Flexión	2	30
			CONTNÚA

Ensayo Cortante

0,51	Lámina Nylon 6A	12	6,12
15	Corte muestras E. Cortante	2	30
1	Matriz y punzón E. Cortante	372,3	372,3
Ensayo de Fatiga			
1,07	Barra Nylon 6A	12	12,84
15	Maquinado muestra E. Fatiga	15	225
1	Acople Flexible tipo Cruceta	55	55
		Total (\$)	990,58

Cabe aclarar que el nylon se comercializa por kilogramo de venta, para obtener dichos valores se calculó el volumen ya sea de las barras o de la plancha necesarios para obtener 15 muestras para cada ensayo y se multiplicó por 1.14 gr/cm³, que es la densidad del material utilizado.

Por ejemplo: Cálculo del costo del nylon utilizado para el Ensayo de Tracción.

$$Volumen\ barra = \frac{\pi}{4} \times d^2 \times L$$

$$Volumen\ barra = \frac{\pi}{4} \times 2^2 \times 100 = 314,159 [cm^3]$$

$$Volumen\ 5\ barras = 1570,796 [cm^3]$$

$$masa\ total = 1570,796 \times 1,14 = 1790,707 [gr] = 1,79 [kg]$$

$$Costo\ total\ muestras\ E.Tracción = 1,79 [kg] \times 12,00 [$/kg]$$

$$Costo\ total\ muestras\ E.Tracción = 21,48 [\$]$$

5.2. Análisis costos financiados por la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE

Los costos financiados por la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, corresponden principalmente al valor que se genera por el uso de los equipos del

Laboratorio de Mecánica de Materiales, Metrología y Procesos de Manufactura, además del costo que genera el tiempo utilizado de cada Ingeniero o Laboratorista.

Para esto se tomó como referencia las tarifas de ensayos y servicios técnicos que presta el INEN, a continuación se muestran los costos generados a detalle.

Tabla 70
Costos Financiados por UFA - ESPE.

Costos Financiados por UFA - ESPE.			
Ensayo de Tracción			
Cantidad	Descripción	P. Unitario	P. Total (\$)
12 hr	Laboratorista Mecánica de Materiales	20 \$/hr	240
15 muestras	Utilización Máquina de Ensayos Universales AMSLER	30 \$/muestra	450
4 hr	Laboratorista Metrología	20 \$/hr	80
4 hr	Utilización Microscopio de Herramientas	20 \$/hr	80
6 hr	Director del proyecto	20 \$/hr	120
Ensayo de Flexión			
7,5 hr	Laboratorista Mecánica de Materiales	20 \$/hr	150
15 muestras	Utilización Máquina Ensayos Universales MTS	11 \$/muestra	165
6 hr	Director del proyecto	20 \$/hr	120
Ensayo Cortante			
12 hr	Laboratorista Mecánica de Materiales	20 \$/hr	240
3 hr	Utilización Taladro	10 \$/hr	30
15 muestras	Utilización Máquina de Ensayos Universales	11 \$/muestra	165
6 hr	Director del proyecto	20 \$/hr	120
Ensayo de Fatiga			
40 hr	Laboratorista Mecánica de Materiales	20 \$/hr	800
15 muestras	Utilización Máquina de Moore	30 \$/muestra	450
6 hr	Director del proyecto	20 \$/hr	120
		Total (\$)	2884

El costo total del presente trabajo fue de \$3874,58 del cual el mayor costo asumió la UFA – ESPE, este valor puede variar de acuerdo al tipo de ensayo que se requiera,

mientras más compleja sea la prueba mayor será dicho costo, como fue el caso de los ensayos de tracción y fatiga.

Así también, podemos comparar los costos entre el acero y el duralón. El kilogramo de acero en el Ecuador cuesta alrededor de \$1,15 mientras que el duralón cuesta \$12, siendo el acero mucho más barato, pero la ventaja del duralón es el volumen de material que se adquiere siendo esta mucho más favorable que la del acero.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- Duralón es el nombre comercial que se le da a los nylons, por lo tanto este es un polímero termoplástico que pertenece a la familia de las poliamidas alifáticas, las cuales se caracterizan por tener en común el enlace amida en forma repetida en su composición, que hace que sus propiedades mecánicas sea muy favorables en el diseño y uso de elementos de máquinas.
- Se realizó el ensayo de tracción aplicando la norma ASTM D-638, en el diagrama esfuerzo – deformación se observó que el duralón se comporta como un material polimérico resistente con un límite elástico muy marcado después de que llega a su máxima resistencia, en este ensayo se obtuvo el esfuerzo máximo 76,43 [MPa], módulo de elasticidad 3097,1 [MPa], esfuerzo de fluencia 74,71 [MPa] y porcentaje de elongación 45,67 [%], cumpliendo con los valores recomendados para el nylon 6.
- El ensayo de flexión se realizó aplicando la norma ASTM D-790, en el diagrama esfuerzo – desplazamiento se observó que el duralón se comportó como un material polimérico resistente sin un punto de fluencia apreciable, para lo cual

el cálculo del límite de proporcionalidad a flexión se eligió por criterio único del autor, durante el ensayo se obtuvo el esfuerzo máximo 78,87 [MPa], límite de proporcionalidad 62,07 [MPa] y módulo de elasticidad de 1753,1 [MPa], en este caso el material comercializado como nylon 6 no cumplió con los valores especificados para dicho material.

- El ensayo de cortante se realizó utilizando la norma ASTM D-732, con las pruebas se obtuvo el esfuerzo máximo 57,64 [MPa] y el límite de proporcionalidad 37,83 [MPa], en un análisis del diagrama esfuerzo – desplazamiento se observó que antes de llegar a la resistencia máxima las muestras tienen un comportamiento que se podría decir que es su límite a la fluencia, pero esto no ocurre en forma tan marcada para todas las muestras por ello se optó por reportar el límite de proporcionalidad, además se confirmó con los resultados obtenidos a flexión que la plancha de duralón no corresponden al Nylon 6.
- Se realizó el ensayo de fatiga por flexión rotativa con el uso de la máquina de R.R. Moore, con estas pruebas se obtuvo la curva S-N, en la cual se puede observar el comportamiento a fatiga del duralón (Nylon 6), en este se observa que a 50 [MPa], aproximadamente al 60 % del esfuerzo máximo a la tracción, el material soporta dicha tensión el mayor número de ciclos sin llegar a la falla por rotura, por lo tanto, se puede decir que este valor es su límite de resistencia a la fatiga.

- Durante los ensayos de fatiga cuando se aplicó cargas de 59,8 y 51,7 [MPa], las muestras sufrieron fatiga por falla térmica esto hizo que las vibraciones durante el ensayo sean excesivas durante un cierto período (5000 revoluciones aproximadamente), las muestras sufrieron deformaciones plásticas que si sucede durante el funcionamiento de algún elemento de máquina esto no sería aceptable, por ello para un correcto diseño se debe tener en cuenta los factores de corrección de la resistencia a la fatiga.
- El costo de los ensayos depende totalmente del tipo de prueba que se requiera realizar, mientras más compleja sea mayor costo va a tener, pero como referencia para estudiantes el mayor gasto que se requiere es la compra y maquinada del nylon, este material se comercializa por peso de venta siendo este valor de \$12 dólares el kilo aproximadamente, en comparación con el acero que es \$1,15 el kilo este es mucho más caro pero la ventaja esta en el volumen de material que se puede adquirir.

6.2. Recomendaciones

- Durante el ensayo de tracción para obtener valores del porcentaje de elongación más precisos es recomendable utilizar extensómetros que midan el alargamiento del material únicamente en la zona de prueba, despreciando el

movimiento de los brazos móviles de la máquina, esto debido a que la desviación estándar es de 12,77 [%], la cual se considera muy excesiva.

- En el ensayo de flexión la norma recomienda terminar la prueba cuando la superficie externa de la muestra ha alcanzado una deformación del 5% lo que equivalió a una deflexión de 21,33 [mm], pero para el duralón esta condición no es recomendada ya que este material sufre grandes deformaciones antes de llegar a su resistencia máxima, por lo tanto, la prueba debe continuar hasta el punto en el que la resistencia del material empieza a disminuir.
- El éxito del ensayo cortante depende mucho de la precisión y de la resistencia de las herramientas de corte ya que se debe evitar en lo máximo que en las muestras actúen cargas diferentes como flexión, por ello el ensamble entre la matriz, punzón y muestra debe ser el adecuado, esto también para evitar que haya contacto entre el punzón y las matrices para evitar que sufra daños.
- Durante los ensayos de fatiga las vibraciones son un parámetro que afectó de gran manera a las pruebas, muestra de esto fue que cuando la unión semi-rígida del acople flexible de la máquina empezó a fallar, todas las muestras ensayadas fueron descartadas por ofrecer valores equivocados, por ello también es recomendable realizar un mantenimiento a las chumaceras cada 25000 ciclos si las deformaciones durante las pruebas son grandes.

BIBLIOGRAFÍA

- American Society for Testing and Materials. (2002). *ASTM D 732 - 02 "Standard Test Method for Shear Strength of Plastics by Punch Tool"*. West Conshohocken : ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2002). *ASTM E 466 - Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Test of Metallic Materials*. West Conshohocken: ASTM International .
- American Society for Testing and Materials. (2003). *ASTM D 638 - 03 "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics"*. West Conshohocken: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2003). *ASTM D 790 - 03 "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials"*. West Conshohocken : ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2010). *Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data*. West Conshohocken: ASTM International.
- Askeland, D. R. (2012). *Ciencia e ingeniería de materiales* . México DF: Cengage Learning Editores S.A.
- Blanco, F. (8 de Octubre de 2012). *Poliolefinas*. Obtenido de <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/AP.T8.1-MPyC.Tema8.MaterialesPolimericosInteresIndustrial.pdf>

Brown, R. (2002). *Handbook of Polymer Testing* . Shawbury: Rapra Technology Limited.

Callister, W. D. (2007). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales 2*. Barcelona: Reverté.

Casado Del Prado, J. A. (Abril de 2001). Comportamiento en Fatiga de Poliamidas Reforzadas con Fibra de Vidrio Corta. Santander, Cantabria, España.

Cuichán, F., & Dueñas, W. (Abril de 2008). Rediseño y Construcción de la Máquina de Viga Rotatoria Sometida a Flexión para Ensayos de Resistencia a la Fatiga. Quito, Pichincha, Ecuador.

Du Pont Company . (Agosto de 2018). Obtenido de DuPont Web Site:

<http://www.dupont.com/>

Guamanquispe, J. (2012). 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. Ambato, Tungurahua, Ecuador.

Luis Bilurbina, F. L. (1990). *Materiales no metálicos resistentes a la corrosión*. Barcelona: Marcombo, S.A.

M.G. Wyzgoski, G.E. Novak, D.L. Simon. (1990). Fatigue fracture of nylon polymers. *Journal of Materials Science*, 4501 - 4510.

Maldonado, F., & Proaño, G. (2015). La Industria en Ecuador. *Ekos*, 62.

Marcilla Gomis, A., & Beltrán Rico, M. (2012). *Tecnología de Polímeros* . Alicante: Publicaciones de la Universidad de Alicante.

Margolis, J. (1985). *Engineering Thermoplastics*. New York: Marcel Dekker .

McIntyre, J. E. (2000). *Synthetic fibres: nylon, polyester, acrylic, polyolefin*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.

Pro Ecuador. (25 de Noviembre de 2015). *Perfil sectorial de plásticos para el inversionista, 2015*. Obtenido de <http://www.proecuador.gob.ec/pubs/perfil-sectorial-de-plastico-para-el-inversionista-2015/>

Seymour, R. B. (2002). *Introducción a la Química de los Polímeros*. Barcelona: Reverté S.A.

Shackelford, J. F. (2005). *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*. Madrid: Pearson Educación, S.A.

Shah, V. (2007). *Handbook of Plastics Testing and Failure Analysis*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.

Siza, R., & Chango, D. (Marzo de 2012). Diseño y Construcción de una Máquina para realizar Ensayo de Fatiga por Flexión Rotativa utilizando PC. Latacunga, Cotopaxi, Ecuador.

Weibull, J. W. (2013). *Fatigue Testing and Analysis of Results*. Belfast: Pergamon Press.

Weissermel, K. (1981). *Química orgánica industrial*. Barcelona: Reverté.

William A. Herman, Richard W. Hertzberg, John A. Manson. (1990). The influence of loading history on fatigue in engineering plastics. *Journal of Material Science* , 434-440.

William F. Smith, J. H. (2006). *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*. México D.F.: McGraw Hill S.A.

Wolfe, A. J. (2008). *Science History Institute*. Obtenido de Nylon: A Revolution in Textiles: <https://www.sciencehistory.org/>

Yoshitsugu Kojima, Arimitsu Usuki, Masaya Kawasumi, Akane Okada, Yoshiaki Fukushima, Toshio Kurauchi, Osami Kamigaito. (1993). Mechanical properties of nylon 6-clay hybrid. . *Journal of Materials Research*, 1185 - 1189.