



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

TEMA:

Análisis de las propiedades mecánicas de tracción y flexión de materiales poliméricos comerciales utilizados en componentes mecánicos

Trabajo de Titulación, Modalidad Trabajo Experimental previo a la obtención del título de ingeniero mecánico, otorgado por la Universidad Técnica de Ambato

AUTOR: Paul David Tamayo Pozo

TUTOR: Ing. Wilson Henry Vaca Ortega, Mg.

Ambato - Ecuador

Junio-2026

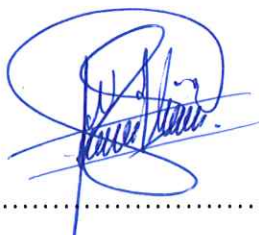
APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor del trabajo experimental, previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, con el tema: **"ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE TRACCIÓN Y FLEXIÓN DE MATERIALES POLIMÉRICOS COMERCIALES UTILIZADOS EN COMPONENTES MECÁNICOS "**, elaborado por el estudiante Paul David Tamayo Pozo, portador de la cédula de ciudadanía número 1805468517, estudiante de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente trabajo experimental es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Está concluido en su totalidad.

Ambato, junio 2026



.....
Ing. Wilson Henry Vaca Ortega, Mg.

C.C. 1803729126

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Paul David Tamayo Pozo**, con C.C. 1805468517 declaro que todos los contenidos y actividades expuestos en el desarrollo del presente trabajo experimental con el tema: **“ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE TRACCIÓN Y FLEXIÓN DE MATERIALES POLIMÉRICOS COMERCIALES UTILIZADOS EN COMPONENTES MECÁNICOS ”**, así como también los análisis estadísticos, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del trabajo experimental, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, junio 2026



Paul David Tamayo Pozo

C.C. 1805468517

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

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

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi trabajo experimental, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, junio 2026



.....

Tamayo Pozo Paul David

C.C. 1805468517

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del trabajo experimental, realizado por el estudiante **Paul David Tamayo Pozo**, de la Carrera de Ingeniería Mecánica bajo el tema: **"ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE TRACCIÓN Y FLEXIÓN DE MATERIALES POLIMÉRICOS COMERCIALES UTILIZADOS EN COMPONENTES MECÁNICOS "**.

Ambato, junio 2026

Para constancia firma:



Ing. Diego Fernando Núñez Núñez,
MSc.

C.C. 1803367729

MIEMBRO CALIFICADOR



Ing. Vanessa Fernanda Morales
Rovalino, MSc.

C.C. 1804606810

MIEMBRO CALIFICADOR

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, Amparo y Richard, quienes con su esfuerzo, amor y apoyo incondicional me ayudaron a seguir adelante y alcanzar este importante momento de mi vida. A mi madre, por ser mi apoyo moral y emocional en cada etapa del camino; y a mi padre, por sus consejos, su rectitud y las enseñanzas que me guiaron hacia mis metas. Este logro también les pertenece a ellos, pues juntos me brindaron la oportunidad de llegar hasta aquí. Asimismo, dedico este trabajo a mis abuelitas, Rita y Mariana, quienes con su calidez, ternura y cariño me alentaron a no rendirme. Sus sonrisas, palabras de ánimo y confianza en mis capacidades fueron una fuente constante de motivación para dar siempre lo mejor de mí. También quiero dedicar este trabajo a mis abuelos, Pancho y Carmela, quienes ya no se encuentran físicamente conmigo, pero cuya presencia permanece en mi corazón. Sé que desde el cielo me acompañan y cuidan cada día, y estoy seguro de que se sentirían profundamente orgullosos de este logro. Finalmente, dedico este trabajo a mis hermanos y primos, especialmente a Ricardo, quien ha sido mi mentor, mi guía y un gran ejemplo a seguir. Gracias por enseñarme a valorar las cosas más importantes y hermosas de la vida. De igual manera, agradezco a Andrea y Valeria por su apoyo incondicional, por estar siempre presentes y por hacerme sentir acompañado en todo momento. Su cariño, consejos y confianza han sido fundamentales para alcanzar esta meta.

Paul David Tamayo Pozo

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por permitirme llegar a este momento tan importante de mi vida, por cuidarme, protegerme e iluminar mi camino en cada paso que he dado. Gracias por brindarme la fortaleza y la fe necesarias para superar los desafíos y perseguir mis metas con determinación. Expreso mi más profundo agradecimiento a mis padres, quienes con su sacrificio, esfuerzo, amor y apoyo incondicional han sido el pilar fundamental de mi formación personal y profesional. Gracias por creer en mí, acompañarme en cada logro y motivarme a alcanzar mis objetivos. Este logro también les pertenece a ustedes. Agradezco de igual manera a mis hermanos, por su apoyo constante en los momentos difíciles y por ayudarme a encontrar soluciones ante los obstáculos que se presentaron en el camino. Su compañía y confianza fueron esenciales durante este proceso. A mis primos, les agradezco por su alegría, amistad y apoyo, los cuales me ayudaron a sobrellevar situaciones adversas y a mantener una actitud positiva en los momentos de mayor exigencia. También quiero expresar mi gratitud a mis tíos, quienes a través de sus consejos y experiencias de vida me enseñaron valiosas lecciones que me han permitido comprender la importancia de tomar decisiones con responsabilidad y sabiduría. A mis abuelos, les agradezco profundamente por su cariño, alegría y palabras de aliento, que siempre fueron una fuente de motivación para seguir adelante y esforzarme por alcanzar mis metas. Finalmente, agradezco a mis amigos, compañeros y personas que he conocido en el transcurso de la carrera, con quienes compartí innumerables experiencias, desafíos y aprendizajes a lo largo de esta etapa. Gracias por el apoyo mutuo, la amistad y los momentos vividos, tanto en las dificultades como en los éxitos, que hicieron de este camino una experiencia enriquecedora e inolvidable.

Paul David Tamayo Pozo

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO

APROBACIÓN DEL TUTOR.....	2
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	3
DERECHOS DE AUTOR.....	4
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	5
DEDICATORIA.....	6
AGRADECIMIENTO	7
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO	8
ÍNDICE DE FIGURAS	11
ÍNDICE DE TABLAS.....	17
RESUMEN EJECUTIVO	19
ABSTRACT	20
CAPÍTULO I.....	21
MARCO TEÓRICO	21
1.1. Antecedentes investigativos.....	21
1.1.2. Justificación.....	36
1.1.3. Fundamentación teórica	41
1.1.3.1 Los polímeros técnicos como materiales de ingeniería.....	41
1.1.3.2. Descripción referencial de los materiales poliméricos comerciales en estudio y sus aplicaciones en componentes mecánicos.....	43
1.1.3.3 Fundamentos de propiedades mecánicas en polímeros.	48
1.1.3.4 Normativa aplicada	58
1.1.3.5 Diagrama esfuerzo-deformación: interpretación comparativa para los cuatro polímeros	61
1.1.3.6 Selección de materiales poliméricos en ingeniería mecánica	64
1.2. OBJETIVOS.....	65

1.2.1. Objetivo general.....	65
1.2.2. Objetivos específicos	66
CAPÍTULO II.....	67
METODOLOGÍA.....	67
2.1. Equipos y materiales	67
2.1.1 Ubicación	67
2.1.2 Materiales.....	68
2.1.3 Equipos.....	70
2.2. Métodos	77
2.2.1 Tipo de investigación	77
2.2.2 Definición de variables	77
2.2.3 Hipótesis.....	78
2.2.4 Población y muestra	79
2.2.5 Recolección de información.....	81
2.2.6 Variables respuesta o resultados esperados.....	98
CAPÍTULO III	99
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	99
3.1. Análisis y discusión de los resultados.....	99
3.1.1 Justificación de la norma ASTM D638-22	99
3.1.2 Ensayo de tracción	100
3.1.3 Análisis de las curvas fuerza-desplazamiento	114
3.1.4 Análisis comparativo: Ensayo de tracción	126
3.1.5 Justificación de la norma ASTM D790-25	131
3.1.6 Ensayo de flexión.....	132
3.1.7 Análisis técnico de las curvas fuerza-deflexión	143
3.2. Verificación de hipótesis	159
3.2.1 Discusión de resultados.....	162

3.2.2 Implicaciones prácticas para la industria ecuatoriana	163
CAPÍTULO IV	166
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	166
4.1. Conclusiones	166
4.2. Recomendaciones	168
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	169
ANEXOS.....	174

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Curvas fuerza-desplazamiento para ensayos de tracción a velocidades de 25 y 5 mm/min. [8].....	25
Fig. 2. Mapas de deformación axial real para un ensayo de tensión de 25 mm/min obtenidos a partir de DIC en diferentes momentos. [8].....	25
Fig. 3. Diagramas de resistencia al desgaste de poliamidas para cojinetes (MP). [14]	27
Fig. 4. Diagramas de resistencia al desgaste para engranajes metal-polímero. [14] .	27
Fig. 5. Morfologías de los cuatro tipos de rellenos usados en los compuestos PTFE: bronce (a), fibra de vidrio (b), coque (c) y grafito (d). [15]	28
Fig. 6. Curvas esfuerzo-deformación del PTFE a 25°C, 50°C y 100°C. [16].....	29
Fig. 7. Micrografías SEM de fractura del PTFE. [16].....	29
Fig. 8. Propiedades mecánicas de los compuestos de PA 66 con el aumento de la cantidad de relleno híbrido. [21]	31
Fig. 9. Un vehículo que muestra numerosas piezas producidas por PMC. [24]	32
Fig. 10. Regiones cristalizadas en un polímero: a) moléculas largas que forman cristales al azar mezcladas con material amorfo; y b) cadena plegada en forma de lámina, forma común de una región cristalizada. [31]	42
Fig. 11. Comportamiento de los polímeros como función de la temperatura. [31]	42
Fig. 12. Curva de tracción. [34]	43
Fig. 13. Fotografías de cojinetes planos y engranajes metal-polímero de PA6. [14].	44
Fig. 14. Morfología real de las partículas de PTFE. [17].....	45
Fig. 15. Curvas de esfuerzo/deformación de tracción de PA12 y PA12/PTFE nanocompuestos y de PLA y PLA/PTFE a diferentes cargas. [17]	46
Fig. 16. Curvas de esfuerzo/deformación de flexión de PA12/PTFE y PLA/PTFE nanocompuestos. [17].....	47
Fig. 17. Transición de fase II–IV y IV–I del PTFE. [16]	47
Fig. 18. Tensión o tracción: fuerzas aplicadas en sentidos opuestos para elongar la muestra. [35].....	49
Fig. 19. Flexión o plegado: fuerzas aplicadas en sentidos opuestos para plegar la muestra. [35].....	49
Fig. 20. Esquema de deslizamiento de cadenas poliméricas en un termoplástico. [34]	50

Fig. 21. Curva de comportamiento a largo plazo de un material plástico. [34]	50
Fig. 22. Ensayo de fluencia estacionario en función del tiempo a tensión constante. [34]	51
Fig. 23. Ensayo de relajación tensional en función del tiempo a deformación constante. [34]	51
Fig. 24. Curva típica de tensión-deformación de un material polimérico. [34]	53
Fig. 25. Esquema de flexión. [34]	55
Fig. 26. Esquema del ensayo de flexión en 3 puntos (viga simplemente apoyada). [30]	55
Fig. 27. Categorías de ensayos de materiales. [35]	59
Fig. 28. Probeta Tipo I: dimensiones nominales para ensayo de tracción. [13]	59
Fig. 29. Esquema de dimensiones en una probeta de tracción. [34]	59
Fig. 30. Módulo de elasticidad de POLIAMIDA 6pura y PA6/GF a distintas fracciones volumétricas. [22]	62
Fig. 31. Curvas de tracción de plásticos con diferente comportamiento. [34]	64
Fig. 32. Planchas de los polímeros comerciales adquiridos: Nylon, Grilon, Teflón, Duralón. Fuente: Elaboración propia	70
Fig. 33. Máquina de Corte por Chorro de Agua Flow International Corporation, modelo Mach 3, utilizada para la fabricación de probetas en ALUVID GLASS CIA. LTDA., Ambato. Fuente: Elaboración propia	71
Fig. 34. Diseño tridimensional de probeta Tipo I para ensayo de tracción según ASTM D638-22 elaborado en SolidWorks Fuente: Elaboración propia	72
Fig. 35. Diseño tridimensional de probeta rectangular para ensayo de flexión según ASTM D790-25 elaborado en SolidWorks. Fuente: Elaboración propia	72
Fig. 36. Calibrador pie de rey digital Tronic Digital Caliper con resolución de 0,01 mm utilizado para la medición dimensional de las probetas. Fuente: Elaboración propia.	73
Fig. 37. Medición dimensional con vernier de las probetas del Duralón comercial: (a) probeta de flexión, (b) probeta de tracción. Fuente: Elaboración propia	73
Fig. 38. Medición dimensional con vernier de las probetas del Grilon comercial: (a) probeta de flexión, (b) probeta de tracción. Fuente: Elaboración propia	73
Fig. 39. Medición dimensional con vernier de las probetas del Nylon comercial: (a) probeta de flexión, (b) probeta de tracción. Fuente: Elaboración propia	74

Fig. 40. Medición dimensional con vernier de las probetas del Teflón comercial: (a) probeta de flexión, (b) probeta de tracción. Fuente: Elaboración propia	74
Fig. 41. Máquina Universal de Ensayos Shimadzu AGS-X de 50 kN disponible en el CIDIIE, Universidad Central del Ecuador.....	76
Fig. 42. Registro fotográfico de etiqueta de calibración de la máquina universal de ensayos	76
Fig. 43. Diagrama de flujo del proceso experimental de caracterización mecánica de los materiales poliméricos comerciales. Fuente: Elaboración propia.....	84
Fig. 44. Planchas de los polímeros comerciales adquiridos: (a) Nylon, (b) Grilon, (c) Teflón, (d) Duralón. Fuente: Elaboración propia	85
Fig. 45. Probetas del Grilon comercial , después del proceso de corte por chorro de agua: (a) probetas de tracción Tipo I, (b) probetas de flexión rectangulares. Fuente: Elaboración propia	86
Fig. 46. Probetas del Duralón comercial, después del proceso de corte por chorro de agua: (a) probetas de tracción Tipo I, (b) probetas de flexión rectangulares. Fuente: Elaboración propia	86
Fig. 47. Probetas del Teflón comercial, después del proceso de corte por chorro de agua: (a) probetas de tracción Tipo I, (b) probetas de flexión rectangulares. Fuente: Elaboración propia	87
Fig. 48. Probetas del Nylon comercial, después del proceso de corte por chorro de agua: (a) probetas de tracción Tipo I, (b) probetas de flexión rectangulares. Fuente: Elaboración propia	87
Fig. 49. Probetas de Nylon comercial identificadas con el código de ensayo, material y número de probeta.	88
Fig. 50. Probetas de Duralón comercial identificadas con el código de ensayo, material y número de probeta.	88
Fig. 51. Probetas de Teflón comercial identificadas abreviando el nombre del ensayo, el nombre del material y número de probeta para su trazabilidad durante los ensayos.	88
Fig. 52. Probetas de Grilon comercial identificadas abreviando el nombre del ensayo, el nombre del material y número de probeta para su trazabilidad durante los ensayos.	89
Fig. 53. Monitoreo de temperatura en el laboratorio. Fuente: Elaboración propia	90

Fig. 54. Control de temperatura durante el ensayo en el laboratorio. Fuente: Elaboración propia	90
Fig. 55. Configuración de los parámetros de ensayo en el software Trapezium X....	92
Fig. 56. Control de los parámetros de velocidad en la máquina Shimadzu AGS-X.	92
Fig. 57. Ejecución de los ensayos de tracción: (a) Duralón comercial, (b) Teflón comercial.	94
Fig. 58. Ejecución de los ensayos de tracción: (a) Grilon comercial, (b) Nylon comercial.	94
Fig. 59. Ejecución de los ensayos de flexión en tres puntos: (a) Teflón comercial , (b) Nylon comercial	95
Fig. 60. Ejecución de los ensayos de flexión en tres puntos: (a) Duralón comercial, (b) Grilon comercial.	95
Fig. 61. Curva fuerza-desplazamiento y esfuerzo-deformación de las seis probetas del Duralón comercial obtenida del ensayo de tracción ASTM D638-22.....	115
Fig. 62. Probetas de Duralón comercial de la 1 a la 3, después del ensayo de tracción mostrando la zona de cuello y fractura.....	116
Fig. 63. Probetas de Duralón comercial de la 4 a la 6, después del ensayo de tracción mostrando la zona de cuello y fractura.....	117
Fig. 64. Curva fuerza-desplazamiento y esfuerzo-deformación de las seis probetas del Grilon comercial obtenida del ensayo de tracción según ASTM D638-22.	118
Fig. 65. Probetas de Grilon comercial de la 1 a la 3, después del ensayo de tracción mostrando la zona de cuello y fractura. Fuente: Elaboración propia	120
Fig. 66. Probetas de Grilon comercial de la 4 a la 6, después del ensayo de tracción mostrando la zona de cuello y fractura. Fuente: Elaboración propia	120
Fig. 67. Curva fuerza-desplazamiento y esfuerzo-deformación de las seis probetas del Teflón comercial obtenida del ensayo de tracción según ASTM D638-22.	121
Fig. 68. Probetas de Teflón comercial de la 1 a la 3, después del ensayo de tracción mostrando la zona de cuello y fractura. Fuente: Elaboración propia	123
Fig. 69. Probetas de Teflón comercial de la 4 a la 6, después del ensayo de tracción mostrando la zona de cuello y fractura. Fuente: Elaboración propia	123
Fig. 70. Curva fuerza-desplazamiento y esfuerzo-deformación de las seis probetas del Nylon comercial obtenida del ensayo de tracción según ASTM D638-22.....	124

Fig. 71. Probetas de Nylon comercial de la 1 a la 3, después del ensayo de tracción mostrando la zona de cuello y fractura. Fuente: Elaboración propia	126
Fig. 72. Probetas de Nylon comercial de la 4 a la 6, después del ensayo de tracción mostrando la zona de cuello y fractura. Fuente: Elaboración propia	126
Fig. 73. Diagrama radiales individuales de las propiedades de tracción de cada polímero comercial ensayado. Fuente: Elaboración propia.	128
Fig. 74. Diagrama radial comparativo de las propiedades mecánicas de tracción de los cuatro polímeros comerciales: Duralón comercial, Grilon comercial, Teflón comercial y Nylon comercial . Fuente: Elaboración propia.....	128
Fig. 75. Comparativa de la resistencia a la tracción (Sut) de los cuatro polímeros comerciales ensayados con barras de error representando la desviación estándar	129
Fig. 76. Comparativa del límite de fluencia (Sy) de los cuatro polímeros comerciales ensayados con barras de error representando la desviación estándar	129
Fig. 77. Comparativa del módulo de elasticidad (E) de los cuatro polímeros comerciales ensayados con barras de error representando la desviación estándar	130
Fig. 78. Comparativa del porcentaje de elongación (%El) de los cuatro polímeros comerciales ensayados con barras de error representando la desviación estándar	130
Fig. 79. Curva fuerza-deflexión y esfuerzo-deformación de las seis probetas del Duralón comercial obtenida del ensayo de flexión en tres puntos a 2,56 mm/min según ASTM D790-25.....	144
Fig. 80. Probetas del Duralón comercial durante el ensayo de flexión en tres puntos mostrando la deflexión característica sin fractura	145
Fig. 81. Curva fuerza-deflexión y esfuerzo-deformación de las seis probetas del Grilon comercial obtenida del ensayo de flexión en tres puntos a 2,56 mm/min según ASTM D790-25.....	146
Fig. 82. Probetas del Grilon comercial durante el ensayo de flexión en tres puntos.	147
Fig. 83. Curva fuerza-deflexión y esfuerzo-deformación de las seis probetas del Teflón comercial obtenida del ensayo de flexión en tres puntos a 25,6 mm/min según ASTM D790-25 Procedimiento B.....	148
Fig. 84. Probetas del Teflón comercial durante el ensayo de flexión en tres puntos mostrando la alta flexibilidad característica de este material.	149

Fig. 85. Curva fuerza-deflexión y esfuerzo-deformación de las seis probetas del Nylon comercial obtenida del ensayo de flexión en tres puntos a 2,56 mm/min según ASTM D790-25.....	150
Fig. 86. Probetas del Nylon comercial durante el ensayo de flexión en tres puntos.	151
Fig. 87. Diagramas radiales individuales de las propiedades de flexión de cada polímero comercial ensayado. Fuente: Elaboración propia.	153
Fig. 88. Diagrama radial comparativo de las propiedades mecánicas de flexión de los cuatro polímeros comerciales: Duralón, Grilon, Teflón y Nylon. Fuente: Elaboración propia.....	154
Fig. 89. Comparativa de la resistencia a la flexión (σ_f) de los cuatro polímeros comerciales ensayados con barras de error representando la desviación estándar	154
Fig. 90. Comparativa del módulo flexural (E_f) de los cuatro polímeros comerciales ensayados con barras de error representando la desviación estándar.....	155
Fig. 91. Comparativa de la deformación de flexión (ϵ_f) de los cuatro polímeros comerciales ensayados con barras de error representando la desviación estándar	155
Fig. 92. Diagrama radial general comparativo de las propiedades mecánicas de tracción y flexión de los cuatro polímeros comerciales: Duralón, Grilon, Teflón y Nylon. Fuente: Elaboración propia.	159
Fig. 93. Comparación de propiedades mecánicas de los materiales poliméricos comerciales evaluados. Los valores corresponden a las medias obtenidas de seis probetas por material. Fuente: Elaboración propia.....	162

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I. Fabricantes de automóviles y piezas producidas a partir de compuestos de matriz polimérica.[24]	33
TABLA II. Análisis comparativo entre PMC, MMC y CMC.[25]	34
TABLA III. Comparación de la presente investigación [26].....	36
TABLA IV. Componentes mecánicos fabricados con polímeros comerciales en diversos sectores industriales. [6], [27], [29].	38
TABLA V. Propiedades mecánicas de referencia de los polímeros comerciales objeto de estudio [30].	39
TABLA VI . Dimensiones de la probeta tipo I para ensayo de tracción según ASTM D638-22. [13].	60
TABLA VII. Dimensiones de probeta para ensayo de flexión en 3 puntos según ASTM D790-25. [30].	60
TABLA VIII. Normativa aplicada en la presente investigación.[12], [13], [30], [32], [33]	61
TABLA IX. Clasificación de plásticos según su comportamiento a tracción.[34]	63
TABLA X. Especificaciones de los materiales poliméricos comerciales.....	68
TABLA XI. Especificaciones del proceso de fabricación de probetas.	70
TABLA XII. Resumen dimensional de las probetas empleadas en los ensayos.....	74
TABLA XIII. Operacionalización de variables.	78
TABLA XIV. Resumen de probetas fabricadas y ensayadas.	79
TABLA XV. Velocidades de ensayo aplicadas por material	91
TABLA XVI. Parámetros empleados para el cálculo del intervalo de confianza al 95 %.....	97
TABLA XVII. Variables respuesta y resultados esperados.	98
TABLA XVIII. Resultados del ensayo de tracción: Duralón comercial.	100
TABLA XIX. Resultados del ensayo de tracción: Grilon comercial.	104
TABLA XX. Resultados del ensayo de tracción: Teflón comercial.	107
TABLA XXI. Resultados del ensayo de tracción: Nylon comercial.....	111
TABLA XXII. Comparativa de propiedades de tracción de los 4 polímeros.	126
TABLA XXIII. Resultados del ensayo de flexión: Duralón comercial.	132
TABLA XXIV. Resultados del ensayo de flexión: Grilon comercial.	135
TABLA XXV. Resultados del ensayo de flexión: Teflón comercial.	138

TABLA XXVI. Resultados del ensayo de flexión: Nylon comercial.	141
TABLA XXVII. Comparativa de propiedades de flexión: los 4 polímeros.....	152
TABLA XXVIII. Resumen general de propiedades mecánicas: tracción y flexión.	156
TABLA XXIX. Comparación referencial entre resultados experimentales y valores de literatura.....	157
TABLA XXX. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) de las propiedades mecánicas.	160

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación analiza las propiedades mecánicas de tracción y flexión de cuatro materiales poliméricos comerciales utilizados en la industria mecánica ecuatoriana: Duralón, Grilon, Teflón y Nylon. El problema central es la ausencia de estas propiedades en las fichas técnicas de los distribuidores locales, obligando a los ingenieros a recurrir a valores internacionales que pueden no corresponder al material adquirido, generando riesgos de sobredimensionamiento o falla prematura del componente.

Se fabricaron 56 probetas normalizadas mediante un proceso de corte que no afecta térmicamente las propiedades del material: 28 probetas Tipo I para tracción (ASTM D638) y 28 probetas rectangulares para flexión (ASTM D790). De estas, 48 fueron ensayadas 6 por material en cada tipo de ensayo y 8 quedaron como probetas de respaldo, garantizando trazabilidad y control dimensional del proceso. Las probetas fueron acondicionadas, garantizando condiciones controladas previas al ensayo.

Los ensayos se ejecutaron en un laboratorio de ensayo de materiales, utilizando una máquina universal de ensayos de 50 kN bajo las condiciones normalizadas establecidas por las normas ASTM D638 y ASTM D790, garantizando la validez y trazabilidad de los resultados obtenidos.

El presente trabajo genera una base de datos experimental local de referencia sobre propiedades mecánicas de tracción y flexión para los materiales ensayados, bajo las condiciones específicas de suministro, geometría y ensayo empleadas, constituyendo un aporte técnico para la selección de materiales poliméricos en componentes mecánicos de la industria.

Palabras clave: TRACCIÓN, FLEXIÓN, POLÍMEROS, ASTM, PROPIEDADES MECÁNICAS.

ABSTRACT

This research analyzes the tensile and flexural mechanical properties of four commercial polymeric materials widely used in the Ecuadorian mechanical industry: Duralón, Grilon, Teflón, and Nylon. The central problem is the absence of these properties in the technical data sheets provided by local distributors, forcing engineers to rely on international reference values that may not correspond to the locally acquired material, generating risks of overdesign or premature failure.

A total of 56 standardized specimens were manufactured using a cutting process that does not thermally affect the material properties: 28 Type I specimens for tensile testing (ASTM D638-22) and 28 rectangular specimens for flexural testing (ASTM D790-25), with 6 specimens tested per material per test type, from a total of 56 manufactured specimens, 8 of which were kept as backup to ensure dimensional control and traceability. The specimens were conditioned for 70 hours at 23.6 °C and 50% relative humidity in accordance with ASTM D618, ensuring controlled pre-test conditions.

The tests were carried out in a certified materials testing laboratory using a 50 kN universal testing machine under the standardized conditions established by ASTM D638 and ASTM D790, ensuring the validity and traceability of the results obtained.

This work generates a local experimental reference dataset of tensile and flexural mechanical properties for the tested materials, under the specific supply, geometry and testing conditions employed, providing a verifiable technical contribution for the selection of polymeric materials in mechanical components of the Ecuadorian industry.

KEYWORDS: TENSILE, FLEXURAL, POLYMERS, ASTM, MECHANICAL PROPERTIES.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes investigativos

En la presente investigación, los materiales se identifican principalmente por su denominación comercial: Duralón, Grilon, Teflón y Nylon. Para fines de revisión bibliográfica y comparación preliminar, estos materiales se asocian referencialmente con familias poliméricas comúnmente relacionadas en la literatura técnica, como polioximetileno, politetrafluoroetileno y poliamidas comerciales. No obstante, debido a que las denominaciones comerciales pueden variar según proveedor, lote, fabricante o presentación del material, dichas asociaciones no constituyen una identificación química concluyente. En consecuencia, los resultados de esta investigación se interpretan como correspondientes a los materiales comerciales ensayados bajo las condiciones específicas de suministro, geometría, acondicionamiento y ensayo aplicadas.

Los materiales poliméricos se han convertido en una parte esencial de la ingeniería, siendo uno de los grupos con mayor influencia en la industria manufacturera a nivel global durante las últimas décadas. Su bajo peso específico, sus propiedades mecánicas favorables, su resistencia química, la facilidad de mecanizado y su competitividad económica los han posicionado como una alternativa relevante frente a los materiales metálicos (acero, fundición, bronce y aluminio) que por generaciones han sido empleados frecuentemente en múltiples aplicaciones de la ingeniería mecánica [1]. En este contexto, los materiales poliméricos comerciales denominados Duralón (generalmente asociado a polioximetileno), Grilon (asociado a poliamida 6), Teflón (politetrafluoroetileno) y Nylon (asociado a poliamida 66) desempeñan un papel importante en aplicaciones industriales, siendo utilizados en diversos componentes mecánicos tales como engranajes, bujes, rodillos, levas, sellos, guías lineales y mecanismos de transmisión, gracias a su costo competitivo y sus propiedades técnicas. Sin embargo, la denominación comercial de los materiales no garantiza su composición exacta, por lo que las referencias poliméricas polioximetileno, poliamida 6, poliamida 66 y politetrafluoroetileno se utilizan únicamente como guía técnica, sin constituir una verificación absoluta de la identidad del material.

La problemática central que aborda la presente investigación es la limitada disponibilidad o inconsistencia de información técnica detallada sobre las propiedades mecánicas de tracción y flexión en las fichas técnicas proporcionadas por algunos distribuidores sobre estos materiales, las cuales el comprador recibe al momento de adquirir el material. Esta situación genera que los ingenieros mecánicos y afines diseñen componentes basándose en valores referenciales consultados en fuentes diversas, lo que provoca que el material adquirido pueda o no corresponder con las necesidades del cliente, generando riesgos de sobredimensionamiento o falla prematura del componente, lo que en ambos casos genera pérdidas económicas y operativas, entre otras consecuencias. La presente investigación busca cubrir esta brecha de información técnica mediante la obtención de datos experimentales bajo condiciones normalizadas ASTM para los cuatro polímeros mencionados.

Duralón

El material comercial denominado Duralón, generalmente asociado al polioximetileno, ha sido objeto de diversas investigaciones en los últimos años, con especial énfasis en la caracterización de sus propiedades mecánicas, evaluadas bajo diferentes condiciones de procesamiento y ensayo.

Un trabajo publicado en 2024 analizó cómo las variables del proceso de moldeo por inyección convencional: temperatura del molde, temperatura de fusión y velocidad de inyección afectan la cristalinidad local, la orientación molecular y el módulo de Young del homopolímero, aplicando un diseño de experimentos [2]. Los valores de módulo de elasticidad oscilaron entre 2999 y 3278 MPa, la resistencia a la tracción entre 69,9 y 74,3 MPa, y el porcentaje de deformación a la rotura entre 36,7 y 64,4%, con fuerte dependencia de las condiciones del molde. Un hallazgo clave fue que los ensayos de tracción resultaron mucho más sensibles a los cambios morfológicos del procesamiento que los ensayos de fractura. Esto refuerza la necesidad de caracterizar el Duralón comercial tal como se adquiere en el mercado, sin asumir condiciones de fabricación controladas.

En la misma línea, otra investigación de 2024 estudió la relación entre el peso molecular, las propiedades mecánicas y la morfología del POM fabricado por microinyección [3]. Reportando módulos de Young entre 1,7 y 2,5 GPa en función del peso molecular y los parámetros de proceso. Puesto que el Duralón comercial proviene

de un proceso de fabricación distinto al de laboratorio, extrapolar directamente estos datos introduciría errores significativos en el diseño de componentes; de ahí que la presente investigación opte por ensayar el material en su estado real de suministro.

Por otro lado, un estudio de 2022 examinó el comportamiento tribológico, mecánico y térmico del POM modificado con PTFE en dos configuraciones, fibrilar y particulada [4]. Los menores valores de coeficiente de fricción y tasa de desgaste se obtuvieron con el compuesto POM/PTFE particulado al 20% en peso, lo que se atribuye a la formación de una película de transferencia homogénea en la interfaz de contacto. El estudio también evidenció que la adición de PTFE reduce las propiedades de tracción del POM, aunque incrementa notablemente su resistencia al impacto, dato relevante para el diseño de piezas sometidas a cargas dinámicas en el sector metalmecánico de Tungurahua.

Mediante un análisis experimental publicado en 2023, se estudiaron las propiedades mecánicas, tribológicas y de resistencia al desgaste del POM en su estado no reforzado y sus variantes modificadas con PTFE, fibra de carbono (CF) y grafito, sometido a condiciones de rectificado abrasivo libre [5]. Los resultados indican un módulo de elasticidad hasta 5 000 MPa, en tanto que los rellenos de PTFE y grafito producen una reducción tanto del módulo de elasticidad como de la dureza del POM. El coeficiente de fricción promedio del POM no reforzado registró un valor de 0,254, reduciéndose aproximadamente un 41% con la incorporación de PTFE o grafito, alcanzando valores de 0,15. En cuanto a la resistencia al desgaste, el orden de desempeño obtenido fue CF-POM, POM, PTFE-POM, C-POM, siendo la velocidad de deslizamiento y la carga aplicada los factores de mayor incidencia sobre el volumen de material removido. Los datos anteriores constituyen una referencia técnica útil para los ingenieros de la provincia de Tungurahua que trabajan con POM en el diseño y selección de componentes mecánicos.

En cuanto a las aplicaciones del POM en componentes mecánicos, investigaciones recientes documentaron en 2023 que el polioximetileno (POM/acetal) y la poliamida son los dos materiales más utilizados en engranajes industriales, identificando seis grados de poliamida empleados en su fabricación (PA6, PA66, PA12, PA46, PA618 y PA645), con contenidos de refuerzo de fibra de vidrio comprendidos entre 20 y 35% y de fibra de carbono entre 15 y 30% [6]. El estudio documentó además el desgaste

superficial, el comportamiento térmico y la fatiga mecánica como los modos de falla de mayor incidencia en este tipo de componentes, señalando aplicaciones directas en transmisiones de maquinaria textil, equipos agroindustriales, automatización industrial y carrocerías, sectores representativos de la industria de la provincia de Tungurahua. De acuerdo con investigaciones realizadas en 2021, los pares POM/PA evidencian una marcada interdependencia entre sus propiedades térmicas y su comportamiento en durabilidad, estableciendo mediante ensayos de fatiga y diagramas de Wöhler que las condiciones térmicas desarrolladas en la zona de contacto determinan directamente la vida útil del sistema de engranajes [7].

Grilon

El material comercial denominado Grilon, asociado a la poliamida 6 (PA6), es uno de los materiales poliméricos más estudiados en la literatura científica actual, con especial énfasis en sus propiedades mecánicas evaluadas bajo condiciones variables de velocidad de ensayo, temperatura y humedad.

Investigaciones recientes publicadas en 2024 estudiaron las propiedades termomecánicas de la poliamida 6 pura, cubriendo un rango de temperatura de -60 a $+200$ °C y tasas de deformación de $0,001$ a 3000 s⁻¹, incluyendo ensayos de tracción cuasiestáticos con correlación de imagen digital (DIC) [8]. Bajo condiciones de referencia según la norma ASTM D638 (23 °C, 50 %HR, velocidad cuasiestática), se reportó una resistencia a la tracción de 70 a 85 MPa y un módulo de elasticidad de 2,5 a 3,3 GPa para la poliamida 6 en condiciones secas. El estudio indica que las propiedades presentan una fuerte dependencia con la tasa de deformación, de modo que el módulo de elasticidad puede incrementarse hasta un 300% al pasar de condiciones cuasiestáticas a dinámicas; en cuanto a la temperatura, el módulo disminuye aproximadamente un 60% al pasar de 23 °C a 80 °C. Estos valores sirven como referencia para la interpretación de los resultados que se obtendrán al caracterizar el Grilon en la presente investigación.

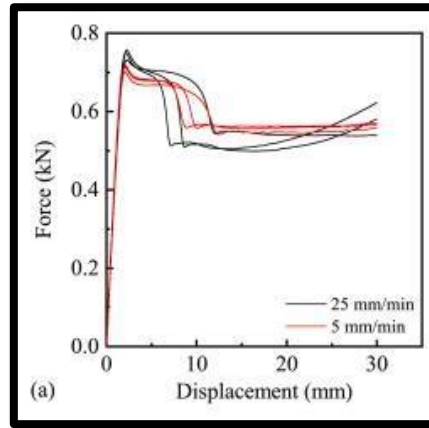


Fig. 1. Curvas fuerza-desplazamiento para ensayos de tracción a velocidades de 25 y 5 mm/min. [8]

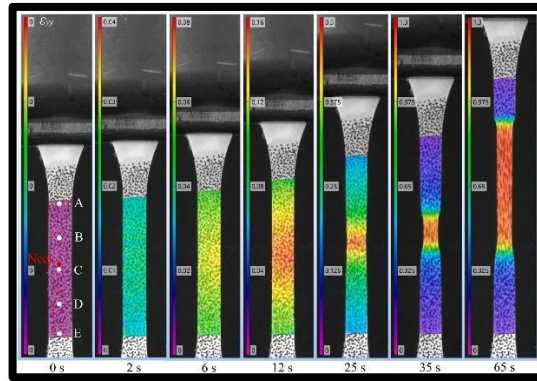


Fig. 2. Mapas de deformación axial real para un ensayo de tensión de 25 mm/min obtenidos a partir de DIC en diferentes momentos. [8]

Un segundo trabajo de 2024 complementó la caracterización anterior estudiando el comportamiento termomecánicas y los mecanismos de daño del compuesto PA6/GF30 (POLIAMIDA 6 con 30% de fibra de vidrio corta) bajo cargas de compresión dinámica en un rango de 2 a 3000 s^{-1} , con seguimiento térmico mediante cámaras infrarrojas de alta velocidad [9]. Contrastar estos resultados con los del POLIAMIDA 6 sin refuerzo evidencia cuánto influye la adición de fibra en las propiedades finales del material, lo que justifica que la presente investigación caracterice el Grilon en su presentación comercial base, sin modificaciones ni rellenos adicionales.

De acuerdo con investigaciones realizadas en 2022, se estudiaron las propiedades mecánicas de tracción y flexión de POLIAMIDA 6 y PA66 fabricadas mediante deposición de material fundido (FDM) con diferentes densidades de relleno (50%, 75% y 100%) [10]. Para estructuras con 75% de densidad de relleno, se reporta una

resistencia ultima a la tracción de 68,73 MPa para la POLIAMIDA 6y de 50,02 MPa para la PA66, evidenciando que la resistencia a la tracción aumenta proporcionalmente al incremento de la densidad de relleno en ambos materiales. Cabe destacar que la condición de 100% de densidad de relleno es comparable con el material macizo mecanizado, que corresponde a la condición del Grilon comercial en barra. Este estudio aporta una base de comparación entre POLIAMIDA 6y PA66 relevante para los ensayos planteados en la presente investigación.

En investigaciones realizadas en 2020, se analizaron experimentalmente las propiedades mecánicas de la POLIAMIDA 6reforzada con fibra de vidrio sometida a condiciones higrotérmicas variables, evaluando el efecto combinado de la temperatura y la humedad relativa sobre la respuesta mecánica del material [11]. Los resultados demuestran que las condiciones ambientales influyen significativamente sobre las propiedades mecánicas de los materiales poliamídicos, lo que justifica aplicar el acondicionamiento normativo de las probetas establecido por las normas ASTM D618-21 [12] y ASTM D638-22 [13], las cuales prescriben condiciones controladas de 23 ± 2 °C y $50 \pm 5\%$ de humedad relativa durante un mínimo de 40 horas previo a la realización de los ensayos.

Un estudio de 2023 evaluó la resistencia al desgaste de compuestos a base de POLIAMIDA 6para engranajes metal-polímero y cojinetes, analizando tanto la POLIAMIDA 6sin refuerzo como variantes compuestas bajo fricción deslizante en seco contra acero al carbono [14]. Los parámetros reportados son de utilidad directa para la industria metalmecánica de Tungurahua, particularmente en la selección de POLIAMIDA 6para bujes y casquillos donde el desgaste superficial es el modo de falla predominante.

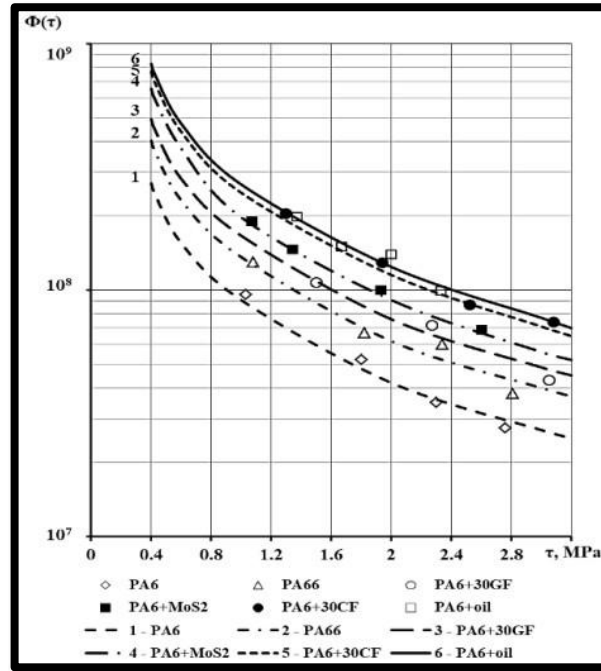


Fig. 3. Diagramas de resistencia al desgaste de poliamidas para cojinetes (MP). [14]

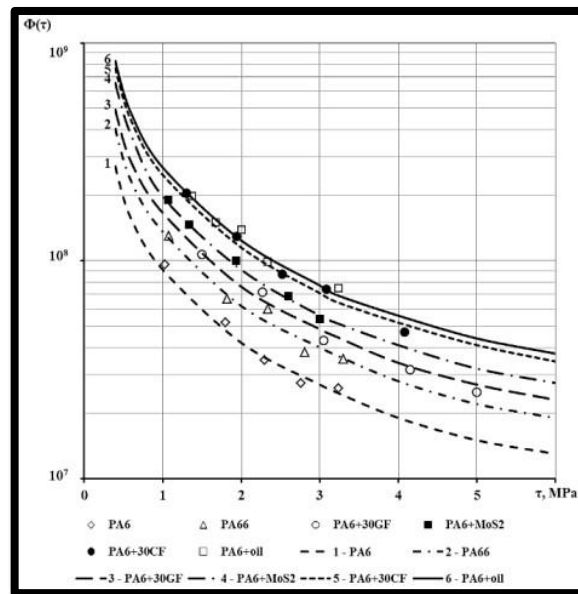


Fig. 4. Diagramas de resistencia al desgaste para engranajes metal-polímero. [14]

Teflón

El material comercial denominado Teflón, asociado al politetrafluoroetileno, presenta un comportamiento mecánico singular que ha dado lugar a una línea de investigación específica orientada a caracterizar su respuesta mecánica bajo cargas estáticas y dinámicas.

Mediante un estudio publicado en 2021, se analizó el comportamiento mecánico y estructural de compuestos de PTFE con refuerzos de bronce del 30 al 60% en peso, fibra de vidrio del 15 al 25% en peso, coque al 25% en peso y grafito al 5% en peso, sometidos a cargas estáticas y cíclicas de compresión y tracción [15]. Los ensayos fueron realizados en una máquina universal MTS Criterio Modelo 43, aplicando una velocidad de 2,5 mm/min según la norma ISO 527. Para el PTFE puro sin relleno, los resultados reportan una elongación a la rotura del 416%, una resistencia a la tracción de 20 a 35 MPa y un módulo de elasticidad de 0,5 a 0,7 GPa, evidenciando una disminución gradual de la deformación al incrementar el contenido de relleno. Este estudio aporta valores de referencia del PTFE virgen obtenidos bajo condiciones estandarizadas, comparables con los que se obtendrán en la presente investigación.

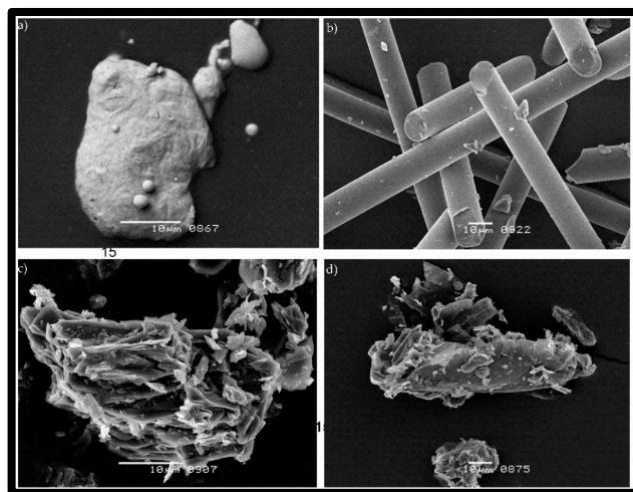


Fig. 5. Morfologías de los cuatro tipos de rellenos usados en los compuestos PTFE: bronce (a), fibra de vidrio (b), coque (c) y grafito (d). [15]

En investigaciones publicadas en 2021, se analizó el mecanismo de transición de fase y la deformación del PTFE mediante ensayos de tracción a velocidad constante de $500 \mu\text{m s}^{-1}$ a 25, 50 y 100 °C [16]. Para ello se emplearon calorimetría diferencial de barrido (DSC), difracción de rayos X (XRD) y dispersión de rayos X a ángulo pequeño (SAXS). De acuerdo con estudios previos las curvas esfuerzo-deformación del PTFE presentan una disminución gradual del módulo de elasticidad conforme aumenta la temperatura, lo cual se atribuye a una mayor relajación de las cadenas poliméricas. En consecuencia, el presente trabajo considera fundamental mantener un control estricto de la temperatura durante los ensayos mecánicos realizados al Teflón comercial.

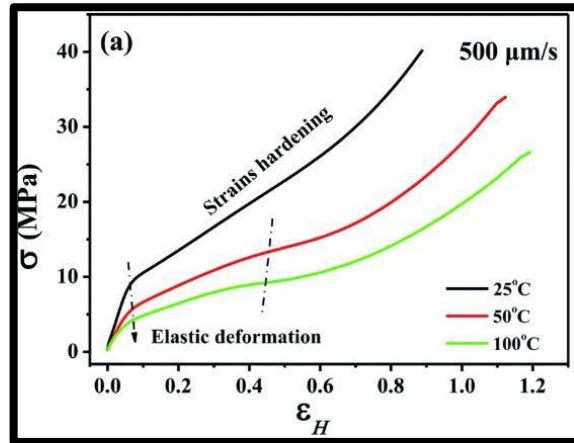


Fig. 6. Curvas esfuerzo-deformación del PTFE a 25°C, 50°C y 100°C. [16]

El estudio demostró que al alcanzar una deformación crítica de 0,6 se produce el desenrollamiento de las cadenas moleculares y la transformación de la estructura cristalina del material (específicamente de la fase IV a la fase I), lo que modifica sustancialmente el comportamiento mecánico del PTFE. Este hallazgo refuerza la importancia de realizar los ensayos del Teflón a temperaturas ambientales controladas (23 ± 2 °C), según lo establecido en la norma ASTM D638-22 [13].

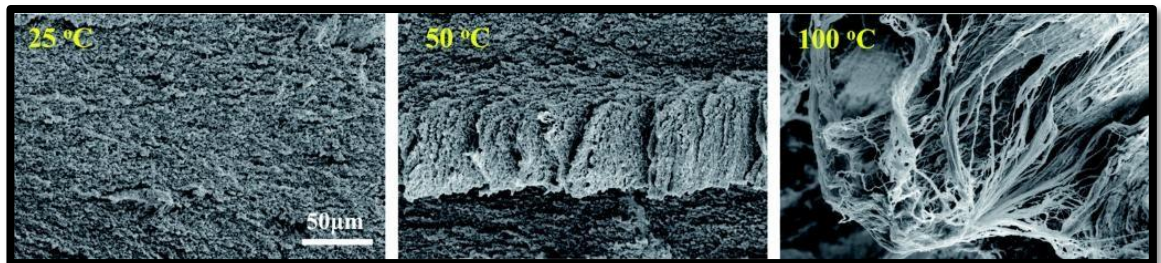


Fig. 7. Micrografías SEM de fractura del PTFE. [16]

Estudios recientes publicados en 2023 documentaron el PTFE como agente de refuerzo en nanocompuestos de poliamida 12 (PA12) y ácido poliláctico (PLA) procesados mediante manufactura aditiva por extrusión de material (MEX), evaluando concentraciones de PTFE de hasta 4,0% en peso [17]. Los resultados demuestran que la incorporación de PTFE mejora las propiedades mecánicas de tracción y flexión de los materiales base, confirmando su función como agente de refuerzo en matrices poliméricas. Sin embargo, se señala que su aporte varía significativamente según la matriz polimérica utilizada, lo que dificulta extrapolar los resultados a otras matrices poliméricas. Esto refuerza la necesidad de caracterizar el PTFE en su estado no

reforzado bajo condiciones normalizadas, tal como se plantea en la presente investigación.

Nylon

El material comercial denominado Nylon, asociado a la poliamida 66 (PA66), desarrollada por DuPont en 1935, es uno de los polímeros con mayor trayectoria industrial a nivel global y uno de los materiales poliméricos más documentados en la literatura científica, evaluado bajo diversas condiciones ambientales y de servicio.

De acuerdo con un estudio publicado en 2022, se analizó el efecto de la fabricación por deposición de material fundido (FFF) sobre la cristalinidad y las propiedades mecánicas de la PA66, fabricando probetas con diferentes temperaturas de boquilla (270 a 290 °C) y evaluando la resistencia a la tracción, elongación a la rotura y cristalinidad por difracción de rayos X [18]. Los resultados reportan una variación en la resistencia a la tracción de 68,07 MPa a 88,17 MPa, evidenciando un incremento del 29,5%; en cuanto a la elongación a la rotura, se incrementó de 2,38 a 13,17% según la temperatura y el procesamiento, mientras que la cristalinidad medida por DRX varió entre 47,3 y 65,6%. Según la literatura la PA66 presenta una alta sensibilidad a las condiciones de manufactura. Por lo tanto, el presente trabajo considera necesario ensayar el Nylon en sus condiciones reales de suministro comercial, sin extrapolar datos obtenidos bajo condiciones distintas de procesamiento.

Un trabajo de 2024 utilizó microtomografía computarizada con radiación sincrotrón de alta resolución para documentar cómo la orientación y distribución de fibras de vidrio cortas inciden en el comportamiento a tracción e impacto de la PA66 reforzada (PA66/GF) [19]. Los resultados confirman que las propiedades mecánicas de la PA66 son altamente sensibles a la microestructura interna y a las condiciones de procesamiento, argumento que respalda la decisión de caracterizar el Nylon comercial en su estado real de suministro, sin extrapolar datos de materiales reforzados o procesados bajo condiciones distintas.

Respecto a la influencia de la humedad, un estudio de 2023 combinó simulaciones de dinámica molecular con ensayos experimentales para cuantificar la caída del módulo de elasticidad de la PA66 al incrementarse el contenido de agua en la estructura poliamídica, confirmando su efecto plastificante [20]. Este comportamiento hace

imprescindible acondicionar las probetas de Nylon conforme a la norma ASTM D618-21 [12] antes de ejecutar los ensayos, garantizando condiciones de humedad controladas y resultados comparables...

Con base en investigaciones publicadas en 2023, se reportó que las propiedades mecánicas de los materiales compuestos de PA66 aumentan significativamente conforme se incrementa el contenido de relleno híbrido, utilizando como rellenos polvo de cobre (Cu), negro de humo (CB) y fibra de carbono (CF) [21]. Se registró el valor máximo de resistencia a la tracción de 252 MPa y resistencia al impacto Charpy de 8,84 kJ/m² en el compuesto PA66 con 30% en volumen de fibra de carbono, tomando como referencia la PA66 en su estado no reforzado. Adicionalmente, los resultados demostraron que los compuestos híbridos de PA66 presentan mayor resistencia a la tracción que los compuestos PA66/CF con igual contenido de fibra de carbono, lo que evidencia el efecto sinérgico de los rellenos híbridos en la matriz polimérica.

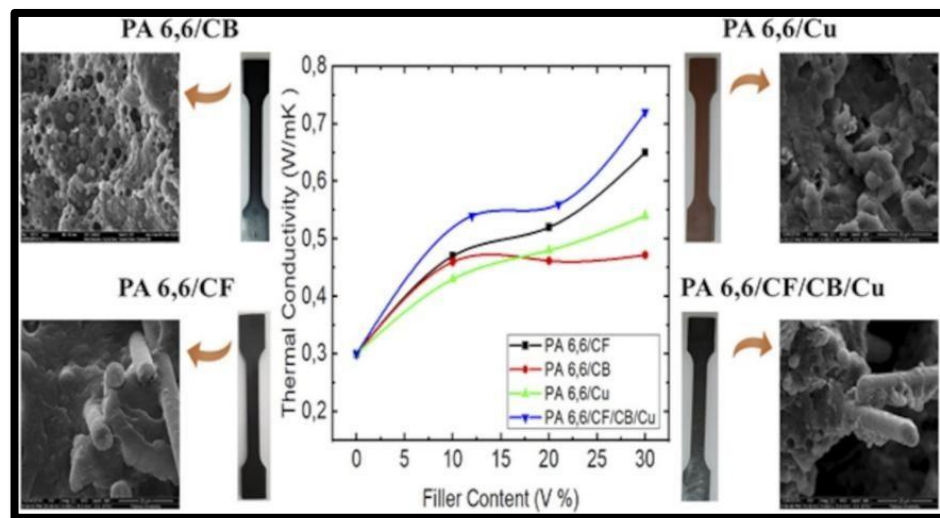


Fig. 8. Propiedades mecánicas de los compuestos de PA 66 con el aumento de la cantidad de relleno híbrido. [21]

Análisis comparativos y revisiones sistemáticas / Revisión documental y consulta de fuentes especializadas

Un estudio publicado en 2023 analizó las propiedades mecánicas y tribológicas de la poliamida 6 y el poliuretano termoplástico (TPU) reforzados con fibra de vidrio a fracciones volumétricas de 25%, 33% y 50% [22]. La evaluación incluyó propiedades

de tracción, compresión, dureza y resistencia al desgaste bajo condiciones de fricción seca en configuración pin-on-disc, complementada con análisis microestructural mediante microtomografía computarizada (micro-CT). Los resultados aportan parámetros de referencia para el dimensionamiento de bujes, cojinetes y engranajes en ingeniería mecánica. En investigaciones realizadas en el mismo año, se demostró que la orientación de trama a $\pm 45^\circ$ proporciona los valores más elevados de resistencia a la tracción en materiales compuestos de POLIAMIDA 6 con 20% de fibra de carbono (PA6 / CF 20%) fabricados mediante deposición de material fundido (FDM), evidenciando la influencia de los parámetros de impresión sobre las propiedades mecánicas de los termoplásticos procesados por manufactura aditiva [23].

Una revisión sistemática de 2020 documentó el desplazamiento progresivo de materiales metálicos por polímeros de ingeniería en sectores como el automotriz, aeroespacial, médico, civil, naval y militar [24]. Los datos reportados ilustran bien esta tendencia: una pieza automotriz fabricada con compuestos poliméricos (PMC) pesa 25,2 kg frente a los 33,5 kg de su equivalente metálica, y una sola pieza de PMC puede sustituir hasta 31 componentes metálicos y 3400 conectores, lo que da cuenta del nivel de integración funcional que estos materiales han alcanzado.



Fig. 9. Un vehículo que muestra numerosas piezas producidas por PMC. [24]

TABLA I. Fabricantes de automóviles y piezas producidas a partir de compuestos de matriz polimérica.[24]

Fabricantes de automóviles	Modelos	Partes
Volkswagen	Bora, Golf, Passat Variant	Respaldo, paneles interiores de las puertas, revestimiento del maletero, tapa del maletero.
BMW	3,5,7 series	Paneles de las puertas, respaldos de los asientos, revestimiento del maletero.
Opel	Vectra, Zafira, Astra	Paneles interiores de las puertas, paneles interiores del techo, salpicadero.
Fiat	Marea, Brava, Punto	Revestimiento del salpicadero, paneles de las puertas.
Audi	A2, A3, A4, A6, A8	Funda para rueda de repuesto, los paneles de las puertas, el portaequipajes de techo, el revestimiento del maletero y los respaldos de los asientos.
Mercedes Benz	A-class, E-class, S-class	Respaldo, paneles interiores de las puertas, cubiertas, tablero, parabrisas, capó, cubierta del techo, tablero, parachoques.
Toyota	ES3, Brevis, Celsior, Raum	Soporte para rueda de repuesto, respaldo del asiento, alfombrillas, paneles de las puertas.
Volvo	V70, C70	Espuma natural, fundas de asiento suaves.
Mitsubishi	Outlander y Eclipse Cross	Panel de instrumentos, piso de carga, paneles de las puertas.
Daimler Chrysler	A, C, E, y S class	Paneles interiores de las puertas, parabrisas, salpicadero y molduras de los pilares.
General Motors	Cadillac De Ville, Chevrolet TrailBlazer	Respaldo, alfombrilla del maletero.
Peugeot	406	Paneles interiores de las puertas delanteras y traseras, respaldos de los asientos y portaequipajes del techo.
Ford	Mondeo CD 162, Focus	Paneles interiores de las puertas, interior del maletero, inserciones de las puertas y alfombrillas.
Renault	Twingo and Clio	Portaequipajes trasero.

Una revisión sistemática publicada en 2023 sobre la selección de materiales, los procesos de fabricación y las aplicaciones de los materiales compuestos de matriz polimérica documentó sus propiedades mecánicas superiores frente a los metales convencionales y su creciente uso en aplicaciones industriales de precisión [25]. La revisión confirma el uso generalizado de la poliamida en componentes mecánicos como engranajes, levas y cojinetes en la industria automotriz. De acuerdo con investigaciones recientes publicadas en 2024, los polímeros de ingeniería de alto desempeño, entre los que se encuentran el POM, la PA6, la PA66 y el PTFE, presentan propiedades mecánicas, térmicas y químicas que los posicionan como materiales de referencia en aplicaciones industriales de precisión, lo que respalda el enfoque de la presente investigación [1].

TABLA II. Análisis comparativo entre PMC, MMC y CMC.[25]

Propiedades	Compuestos de matriz polimérica (PMC)	Compuestos de matriz metálica (MMC)	Compuestos de matriz cerámica (CMC)
Módulo	Medio	Muy alto	Muy alto
Costo de procesamiento	Bajo	Medio	Muy alto
Facilidad de fabricación	Técnicas de procesamiento fáciles	Técnicas de procesamiento difíciles	Facilidad de procesamiento razonable
Densidad	Baja	Media	Baja
Resistencia a la fluencia (Creep)	Alta	Alta	Baja
Tenacidad a la fractura	Alta	Media	Baja
Resistencia a la fatiga	Alta	Media	Baja
Resistencia (Strength)			
(A) Tracción	Muy alta (A)	Alta (A)	Media (A)
(B) Compresión	Alta (B)	Alta (B)	Alta (B)
Diversidad de uso a			
(1) Temperatura ambiente	(1) Uso extensivo	(1) Uso moderado	(1) Uso poco frecuente

(2) Altas temperaturas	(2) Uso poco frecuente	(2) Uso moderado	(2) Uso intensivo
Conductividad térmica (Naturaleza anisotrópica)	Baja	Alta	Los CMC de óxido son buenos aislantes
Resistencia al desgaste	Buena	Alta	Muy alta
Resistencia a la corrosión	Muy alta	Baja	Buena

Antecedente institucional ecuatoriano

En 2018 se desarrolló en la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, sede Sangolquí, el trabajo de titulación "Caracterización de las Propiedades Mecánicas del Duralón" [26], constituyendo el antecedente nacional más cercano a la presente investigación.

Una investigación previa caracterizó experimentalmente el Duralón comercial ecuatoriano mediante ensayos estáticos y dinámicos con 15 probetas por ensayo [26]. aplicando las normas ASTM D638 para tracción, ASTM D790 para flexión y ASTM D732 para corte en los ensayos estáticos, y la norma ASTM E-466 para evaluar la resistencia a la fatiga por flexión rotativa con la Máquina de Moore, obteniendo el diagrama S-N del material. Sin embargo, el hallazgo más relevante de ese trabajo para la presente investigación es de naturaleza distinta: el material denominado Duralón en dicho estudio resultó ser una poliamida (Nylon) y no un POM, situación que ejemplifica con precisión el problema que aquí se aborda: la incertidumbre en la identidad del material asociada al uso de denominaciones comerciales, la cual también constituye una limitación reconocida en el presente estudio. El uso de nombres comerciales genéricos para materiales de composición diferente según el proveedor genera incertidumbre técnica que solo puede resolverse mediante la caracterización experimental del material adquirido bajo condiciones normalizadas.

TABLA III. Comparación de la presente investigación [26] .

Aspecto	Caracterización de las Propiedades Mecánicas del Duralón	Análisis de tracción y flexión de polímeros comerciales en componentes mecánicos
Material(es) ensayado(s)	Duralón comercial (Nylon/PA)	Duralón, Grilon, Teflón, Nylon
Número de materiales	1 material	4 materiales.
Ensayo tracción	ASTM D638 - 15 probetas	ASTM D638 - mín. 5/material
Ensayo flexión	ASTM D790 - 15 probetas	ASTM D790 - mín. 5/material
Ensayo corte	ASTM D732 - 15 probetas	No incluido
Ensayo fatiga	Máquina Moore / ASTM E466	No incluido
Diagrama S-N	Sí - curva de Wöhler	No - solo propiedades estáticas
Identidad del material	Duralón = Nylon/Poliamida	Duralón comercial
Fichas técnicas proveedor	No es objeto de la investigación	Sí - problema central del trabajo
Alcance comparativo	Exhaustivo de 1 material	Comparativo entre 4 polímeros

La presente investigación presenta un mayor alcance que el trabajo de titulación de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE [27], al caracterizar comparativamente cuatro materiales poliméricos comerciales bajo condiciones experimentales idénticas, en lugar de un único material, y al abordar además el problema central: la ausencia o inconsistencia de datos de propiedades mecánicas en las fichas técnicas comerciales disponibles en el contexto analizado.

1.1.2. Justificación

A nivel nacional los materiales comerciales denominados Duralón (generalmente asociado a polioximetileno), Grilon (asociado a Poliamida 6), Teflón (politetrafluoroetileno) y Nylon (asociado a Poliamida 66), son utilizados en la elaboración de componentes mecánicos para múltiples sectores productivos. En el sector carrocerero, la provincia de Tungurahua concentra el mayor número de empresas de este tipo en el Ecuador, siendo el principal polo de fabricación de autobuses del país

y uno de los sectores manufactureros más importantes de la sierra central [27]. En este sector, el Duralón se emplea en rodillos y guías de mecanismos de tapizado, el Grilon en engranajes de accesorios y poleas dentadas, el Teflón en sellos hidráulicos de sistemas de suspensión, y el Nylon en palancas, conectores y soportes estructurales de buses y minibuses. Investigaciones de 2017 sobre materiales poliméricos en la industria automotriz ecuatoriana señalaron que las propiedades mecánicas de tracción y flexión son parámetros clave en la selección de materiales para componentes automotrices, lo que justifica la necesidad de contar con datos experimentales propios [28]. Asimismo, en el sector agroindustrial, concentrado principalmente en las provincias de Tungurahua y Guayas, los materiales poliméricos se emplean en componentes como engranajes de máquinas picadoras y procesadoras, impulsores de bombas, bujes de transmisión, juntas deslizantes de sistemas de lavado y asientos de válvulas.

En el sector textil, Tungurahua concentra el 10,31 % de las empresas del ramo registradas en 2020, aportando el 7 % del PIB nacional [29], siendo uno de los principales consumidores de polímeros de ingeniería en el país. Los equipos de maquinaria textil: telares, máquinas de confección y equipos de tejeduría. Emplean el Grilon en ruedas dentadas y guías de cadena, el Duralón en levas y rodillos de arrastre, el Nylon en engranajes de alta velocidad, y el Teflón en prensas, estopas y sellos dinámicos de bombas de tinte. Investigaciones de 2023 reportaron que el POM y la POLIAMIDA 6 son los polímeros más utilizados en engranajes industriales a nivel mundial [6] y que los pares POM/POLIAMIDA 6 constituyen la combinación más frecuente en sistemas de engranajes de bajo ruido para maquinaria de transmisión, con aplicaciones directas en la industria textil y carrocería de Tungurahua [7]. Por su parte, en los talleres de mecanizado CNC de Ambato, núcleo de la industria metalmecánica provincial, se fabrican bujes y casquillos de precisión en Duralón, guías en Grilon, sellos en Teflón y piezas de transmisión para maquinaria diversa en Nylon.

Si bien estos materiales se emplean en diversos componentes mecánicos, la presente investigación se limita a la caracterización de propiedades de tracción y flexión. Por tanto, los resultados obtenidos constituyen una base experimental inicial para la selección preliminar de materiales, pero no sustituyen ensayos específicos de desgaste,

fatiga, impacto, fricción, fluencia o comportamiento térmico requeridos para validar aplicaciones finales en servicio.

TABLA IV. Componentes mecánicos fabricados con polímeros comerciales en diversos sectores industriales. [6], [27], [29].

Sector industrial	Duralón	Grilon	Teflón	Nylon
Industria carrocera Tungurahua. [27]	Rodillos de tapizado, levas de puertas, guías deslizantes.	Engranajes de accesorios, poleas dentadas.	Sellos hidráulicos de cilindros de suspensión.	Palancas de cambio, soportes eléctricos.
Industria textil Tungurahua. [29]	Levas de telares, guías de hilo, rodillos de arrastre	Ruedas dentadas de telares, guías de cadena	Prensaestopas, sellos de bombas de tinte	Engranajes de máquinas de confección
Maquinaria agroindustrial Ecuador	Engranajes de picadoras, levas de dosificadoras	Impulsores de bombas, ruedas dentadas	Juntas de sistemas de lavado, válvulas	Engranajes de molinos, palancas
Talleres CNC y metalmecánica Tungurahua	Casquillos de precisión, guías lineales CNC	Bujes y casquillos de deslizamiento	Revestimientos de válvulas, anillos de ajuste	Soportes estructurales, fijaciones mecánicas
Industria hidráulica y neumática Ecuador.	Asientos de válvulas, distribuidores hidráulicos	Racores y conectores de baja presión	Anillos de émbolo de compresores. [6]	Válvulas de retención, cuerpos de actuadores

Lo que distingue a esta investigación de otros trabajos previos es un problema concreto y verificable: los componentes mencionados se diseñan y fabrican sin disponer de datos experimentales propios sobre las propiedades mecánicas de tracción y flexión de los polímeros adquiridos en el mercado local. En el contexto de la presente investigación, se observó que algunos distribuidores no disponían de fichas técnicas de los polímeros Duralón, Grilon, Teflón y Nylon, dificultando la obtención de estas propiedades fundamentales para el diseño mecánico: resistencia a la tracción, módulo

de elasticidad, resistencia a la flexión y módulo flexural, todas ellas determinables bajo condiciones normalizadas.

TABLA V. Propiedades mecánicas de referencia de los polímeros comerciales objeto de estudio [30].

Nombre comercial	Gravedad específica	Módulo de elasticidad (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Elongación (%)
Duralón	1.42	3 500	70	25 – 75
Grilon	*	*	*	*
Teflón	2.20	425	20	100 – 300
Nylon	1.14	700	70	300

Datos recopilados de Groover [31]. (*) Propiedades del Grilon no disponibles en la fuente consultada; serán determinadas experimentalmente en la presente investigación.

Los valores presentados corresponden a referencias bibliográficas internacionales y pueden variar según grado comercial, lote, proceso de fabricación, acondicionamiento, geometría de probeta y velocidad de ensayo. Por tanto, se utilizan únicamente como marco comparativo preliminar.

De acuerdo con estudios previos, esta escasez de información obliga al ingeniero mecánico a recurrir a fichas técnicas de fabricantes internacionales, las cuales pueden no corresponder al material adquirido localmente, o a valores de manuales de diseño que no especifican las condiciones de ensayo empleadas. En consecuencia, el presente trabajo busca cubrir ese vacío mediante la caracterización directa de los materiales en sus condiciones reales de suministro, considerando posibles variaciones por proveedor, lote y proceso de fabricación. En este contexto, la identificación de los materiales se basa en la denominación comercial proporcionada por el proveedor, lo que no garantiza su composición exacta, constituyendo una limitación en la trazabilidad del estudio.

Investigaciones recientes indican que las propiedades del POM y la POLIAMIDA 6 comerciales pueden variar hasta un 30% entre diferentes proveedores y grados comerciales, variación que las fichas técnicas incompletas no permiten detectar [2], [3]. Estudios especializados reportaron que la poliamida y el acetal son los materiales poliméricos más utilizados en engranajes industriales, identificando el desgaste, el

comportamiento térmico y la fatiga como las principales características de rendimiento y fallo a considerar en el diseño de este tipo de componentes [6]; asimismo, se demostró que las propiedades de desgaste son determinantes en la selección de cojinetes y engranajes que involucran metales y polímeros [14].

Esta investigación produce un conjunto de datos experimentales de propiedades mecánicas de tracción y flexión para los cuatro polímeros comerciales analizados en este estudio, obtenidos bajo las normas ASTM D638-22 [13] y ASTM D790-25 [30], que puede funcionar como referente técnico bajo condiciones específicas de ensayo. Someter los cuatro materiales al mismo acondicionamiento, parámetros de ensayo y máquina calibrada según ASTM E4-24 [32] bajo condiciones ambientales controladas elimina las fuentes de variabilidad que habitualmente dificultan la comparación entre estudios. En términos prácticos, disponer del módulo de elasticidad medido experimentalmente parámetro indispensable en el dimensionamiento de engranajes y cojinetes poliméricos según la literatura especializada [6], [7] permite además ajustar los coeficientes de seguridad a la realidad del material adquirido, reduciendo el sobredimensionamiento y, con ello, el costo del componente final.

Hasta donde se ha podido verificar en los repositorios universitarios ecuatorianos, este trabajo constituye un estudio comparativo que caracteriza simultáneamente los cuatro polímeros comerciales bajo condiciones ASTM uniformes, evidenciando además la carencia de información en las fichas técnicas comerciales como un problema técnico relevante. Los datos obtenidos corresponden a materiales comerciales disponibles en el contexto analizado, cuyas propiedades pueden diferir de las reportadas en literatura internacional debido a variaciones de proveedor, lote, presentación y condiciones de ensayo. Por ello, esta investigación aporta una base experimental local de referencia para los materiales evaluados, sin pretender generalizar sus resultados a la totalidad de materiales poliméricos disponibles en el mercado nacional. Toda mejora en la selección de materiales repercute directamente en la competitividad del sector productivo regional, considerando que Tungurahua concentra la mayor parte de la producción carrocera nacional [27] y que el sector textil representa el 10,31 % de la producción ecuatoriana [29].

Con base en lo expuesto, el presente trabajo de titulación tiene como objetivo general: Analizar las propiedades mecánicas de tracción y flexión de los materiales poliméricos

comerciales Duralón, Grilon, Teflón y Nylon, bajo condiciones normalizadas de ensayo, con el fin de generar información experimental de referencia para su selección preliminar en componentes mecánicos.

1.1.3. Fundamentación teórica

1.1.3.1 Los polímeros técnicos como materiales de ingeniería

Los polímeros son macromoléculas formadas por la repetición de unidades estructurales básicas denominadas monómeros, unidos entre sí mediante enlaces covalentes formados en la polimerización. Tanto el grado de polimerización como la naturaleza de los grupos funcionales presentes en la cadena inciden directamente sobre las propiedades físicas, mecánicas, térmicas y químicas que caracterizan al material obtenido [1], [25].

Los polímeros de ingeniería se distinguen de los plásticos convencionales — polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS)— por sus propiedades mecánicas, térmicas y químicas superiores, lo que los hace aptos para aplicaciones estructurales y funcionales de mayor exigencia técnica [1], [24]. La diferencia es significativa: el PEEK, por ejemplo, alcanza resistencias a la tracción cercanas a los 100 MPa y soporta temperaturas de operación de hasta 250 °C, mientras que el PE convencional queda limitado a aplicaciones de baja temperatura debido a su punto de fusión de aproximadamente 130 °C.

Los cuatro materiales estudiados en la presente investigación son termoplásticos semicristalinos, cuya estructura molecular combina zonas cristalinas ordenadas y zonas amorfas irregulares. La relación entre ambas fases, expresada mediante el grado de cristalinidad, influye de manera determinante sobre el comportamiento mecánico del material: a medida que aumenta la cristalinidad, se evidencia un incremento en la rigidez y la resistencia mecánica, mientras que la tenacidad tiende a disminuir [2], [3], [15]. Por su parte, la terminología técnica utilizada a lo largo del presente trabajo (resistencia a la tracción, módulo de elasticidad, elongación a la rotura, límite de fluencia, resistencia a la flexión y módulo flexural) se encuentra formalmente definida en la norma ASTM D883 [33], documento de referencia terminológica del Comité D20 de ASTM International.

Según la literatura los polímeros termoplásticos presentan densidades menores que las de los metales y cerámicos, con gravedades específicas típicamente alrededor de 1,2, frente a 2,5 de los cerámicos y 7,0 de los metales. Según [31], sus coeficientes de expansión térmica son aproximadamente cinco veces superiores a los de los metales y diez veces a los de los cerámicos, con temperaturas de fusión significativamente menores y propiedades de aislamiento eléctrico inherentes a su naturaleza molecular. Por lo tanto, el presente trabajo reconoce estas características como factores que posicionan a los polímeros termoplásticos como una alternativa ventajosa frente a los materiales metálicos convencionales en diversas aplicaciones de ingeniería.

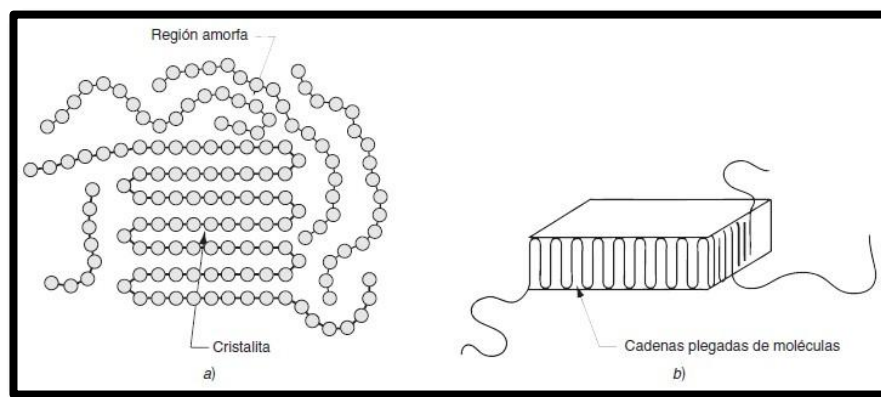


Fig. 10. Regiones cristalizadas en un polímero: a) moléculas largas que forman cristales al azar mezcladas con material amorfo; y b) cadena plegada en forma de lámina, forma común de una región cristalizada. [31]

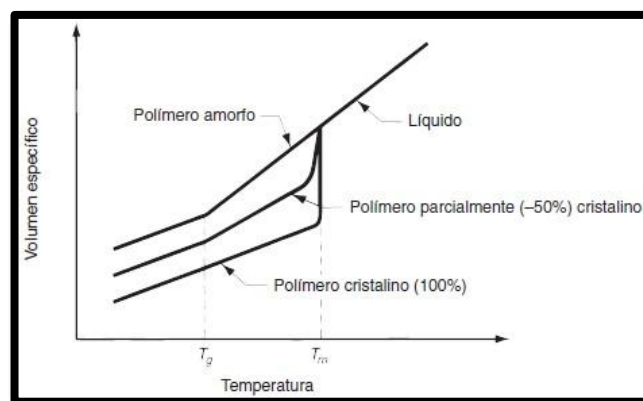


Fig. 11. Comportamiento de los polímeros como función de la temperatura. [31]

De acuerdo con la literatura especializada [34], los polímeros termoplásticos de ingeniería (categoría en la que se encuentran el POM, la PA6, la PA66 y el PTFE) presentan valores de resistencia a la tracción inferiores a los de los termoestables, pero

con mayor capacidad de deformación plástica que estos, mientras que los elastómeros presentan valores intermedios de resistencia con alta deformación elástica, como se aprecia en la Fig. 12.

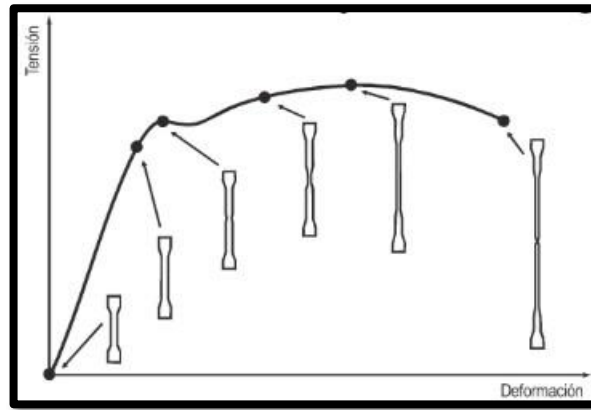


Fig. 12. Curva de tracción. [34]

1.1.3.2. Descripción referencial de los materiales poliméricos comerciales en estudio y sus aplicaciones en componentes mecánicos

Duralón

El Duralón, generalmente asociado al polioximetileno (POM) o también conocido comercialmente como acetal según la literatura especializada [31], es un polímero de ingeniería derivado del formaldehído (CH_2O). Su combinación de rigidez, resistencia, tenacidad y resistencia al desgaste, junto con su alto punto de fusión, baja absorción de humedad e insolubilidad en solventes comunes a temperatura ambiente, le permiten competir con metales como el latón y el zinc en la fabricación de componentes automotrices tales como manijas de puertas, carcasas de bombas y piezas de maquinaria. Sus principales propiedades son: módulo de elasticidad de entre 2,8 y 3,2 GPa, resistencia a la tracción de entre 60 y 70 MPa, absorción de humedad inferior al 0,2%, coeficiente de fricción en seco de 0,10 a 0,35, y buena estabilidad dimensional bajo carga sostenida [3], [4], [5]. Su curva esfuerzo-deformación (σ - ϵ) presenta una región elástica lineal hasta alcanzar el límite de fluencia, situado entre 45 y 55 MPa, seguida de una zona de fluencia fría (*cold drawing*) que culmina en la fractura con una elongación de entre 15 y 40%. Puesto que su absorción de humedad es inferior al 0,2%, sus propiedades mecánicas y dimensionales se mantienen estables ante cambios ambientales, ventaja que lo diferencia de las poliamidas.

Diversos estudios indican que este material presenta aplicaciones en sectores como la industria carrocera de Tungurahua, según [27]. De igual manera, según [29], se emplea en levas de telares, guías de hilo y rodillos de arrastre en el sector textil. En consecuencia, se reporta su uso en engranajes para picadoras y bujes de transmisión en maquinaria agroindustrial, así como en casquillos de precisión y guías lineales CNC en talleres metalmecánicos de Ambato.



Fig. 13. Fotografías de cojinetes planos y engranajes metal-polímero de PA6. [14]

Grilon

El Grilon comercial se asocia referencialmente con poliamidas, particularmente con PA6, de acuerdo con la información técnica disponible y la literatura especializada. Esta asociación se emplea como marco bibliográfico para describir el comportamiento esperado de este tipo de material comercial, se obtiene mediante la polimerización de la ϵ -caprolactama, proceso durante el cual se forman grupos amida ($-\text{CO}-\text{NH}-$) que establecen puentes de hidrógeno, responsables tanto de sus propiedades mecánicas como de su marcada afinidad con el agua. En condición seca, el material presenta una resistencia a la tracción de entre 70 y 85 MPa, un módulo de elasticidad de entre 2,5 y 3,3 GPa, una elongación de 30 a 300%, una resistencia a la flexión de 85 a 110 MPa y un módulo flexural de 2.5 a 3.5 GPa [8], [11]. El factor más crítico en el diseño con POLIAMIDA 6 es su higroscopicidad, ya que el agua actúa como agente plastificante, lo que reduce significativamente el módulo de elasticidad desde 3,3 GPa en estado seco hasta 0,8 GPa cuando el material ha absorbido un 3,5% de humedad [20]. Por esta razón, es necesario someter las probetas al acondicionamiento normativo establecido en la norma ASTM D618-21 [12] previo a la realización de los ensayos.

De acuerdo con la literatura especializada [31], el Grilon se caracteriza por su alta resistencia mecánica, su elevado módulo de elasticidad, su buena resistencia a la abrasión y su propiedad autolubrificante, conservando suficiente resistencia mecánica a temperaturas de hasta 125 °C, lo que lo posiciona como una alternativa viable a los metales en la fabricación de cojinetes, engranajes y piezas similares donde se requiere resistencia mecánica y bajo coeficiente de fricción.

En el ámbito nacional, este material se utiliza en la fabricación de ruedas dentadas para telares y máquinas de confección en la industria textil de la provincia de Tungurahua [29], así como en engranajes de accesorios y poleas dentadas en el sector carrocero [27]. Según la literatura este material se emplea además en impulsores de bombas para maquinaria agroindustrial, así como en bujes y rodamientos de baja velocidad en talleres metalmecánicos de Ambato.

Teflón

El Teflón comercial asociado referencialmente con el politetrafluoroetileno , presenta una estructura molecular del tipo $(-CF_2-CF_2-)_n$, basada en el enlace C-F, el más estable de la química orgánica, lo que le otorga una resistencia química excepcional frente a la mayoría de los ácidos, bases y solventes orgánicos [15], [31].

De acuerdo con la literatura especializada [31], el PTFE se caracteriza por su elevada resistencia química y ambiental, nula absorción de humedad, buenas propiedades de aislamiento eléctrico, resistencia térmica y bajo coeficiente de fricción, propiedades que permiten su uso en cojinetes que no requieren lubricación y en equipos de las industrias química y alimentaria.

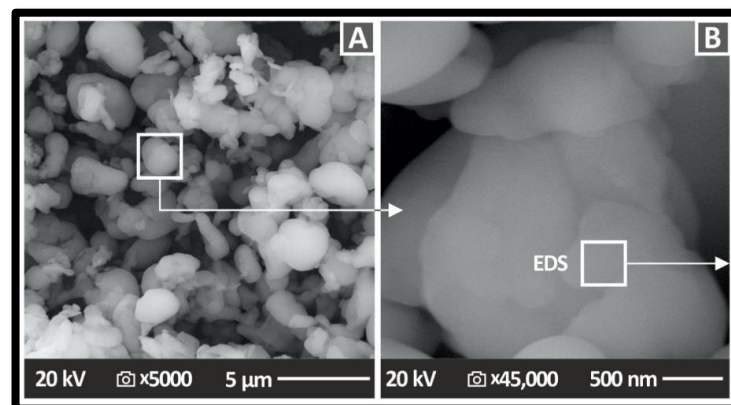


Fig. 14. Morfología real de las partículas de PTFE. [17]

En cuanto a sus propiedades mecánicas estáticas, estas son inferiores a las de los demás polímeros analizados, con una resistencia a la tracción de entre 14 y 35 MPa, un módulo de elasticidad de 0,4 a 0,7 GPa, una elongación de 200 a 400% y un módulo flexural de 0,5 a 0,7 GPa [15], [16], [19]. No obstante, posee el coeficiente de fricción más bajo dentro del grupo de polímeros de ingeniería, con valores de 0,04 a 0,10, y el rango de temperatura de servicio más amplio del grupo, comprendido entre 200 y 260 °C, características que lo hacen especialmente adecuado para aplicaciones tribológicas específicas.

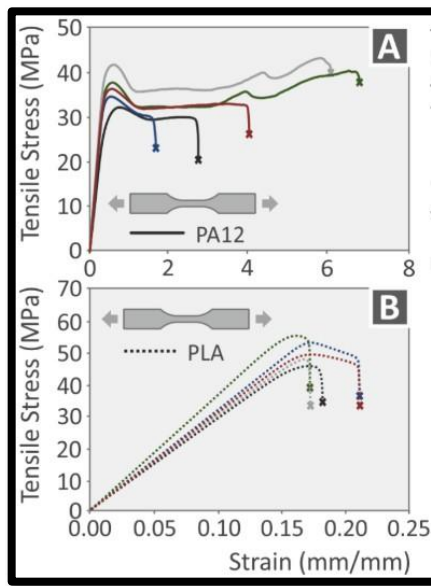


Fig. 15. Curvas de esfuerzo/deformación de tracción de PA12 y PA12/PTFE nanocompuestos y de PLA y PLA/PTFE a diferentes cargas. [17]

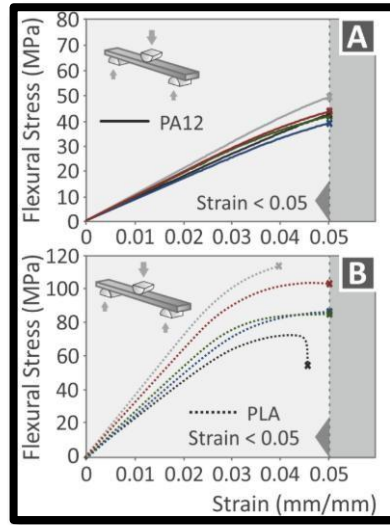


Fig. 16. Curvas de esfuerzo/deformación de flexión de PA12/PTFE y PLA/PTFE nanocompuestos.

[17]

El material experimenta transiciones de fase cristalina a 19 °C y 30°C que inciden sobre sus propiedades mecánicas [16], lo que justifica mantener un control estricto de la temperatura durante los ensayos, dentro del rango de 23 ± 2 °C.

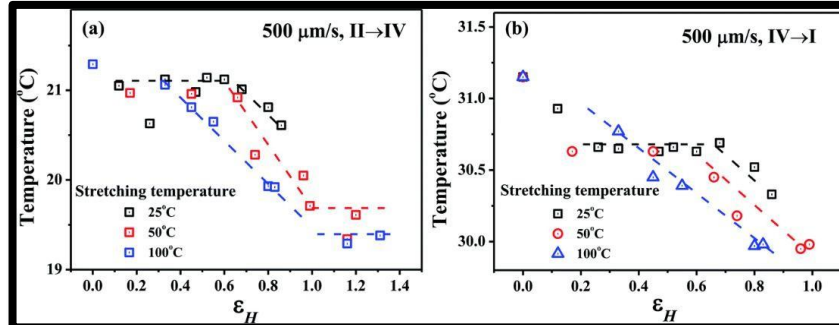


Fig. 17. Transición de fase II–IV y IV–I del PTFE. [16]

De acuerdo con estudios previos, en aplicaciones industriales reportadas, según la literatura, este tipo de material se emplea en la fabricación de sellos hidráulicos para cilindros de suspensión en la industria carrocera, según [27]. De igual manera, según [29], se utiliza en prensaestopas y sellos dinámicos para bombas de tinte en el sector textil. Por lo tanto, se reporta que este material también encuentra aplicación en anillos de émbolo para compresores de taller, juntas deslizantes en sistemas de lavado agroindustrial y revestimientos de válvulas en procesos que involucran fluidos corrosivos.

Nylon

El Nylon comercial corresponde a una denominación genérica utilizada para diferentes tipos de poliamidas comerciales. En el planteamiento bibliográfico inicial del estudio se consideró la PA66 como una referencia técnica por su uso en componentes mecánicos, se obtiene mediante la reacción de condensación entre hexametilendiamina y ácido adípico. La mayor simetría de su estructura molecular favorece un grado de cristalinidad superior, comprendido entre el 35 y el 65%, lo que se traduce en propiedades mecánicas ligeramente más elevadas que las de la PA6: resistencia a la tracción de 75 a 85 MPa, módulo de elasticidad de 2,8 a 3,3 GPa, resistencia a la flexión de 100 a 120 MPa y temperatura de fusión entre 255 y 265 °C [18], [19], [21]. Al igual que la PA6, este material es susceptible a la absorción de humedad, fenómeno que reduce su módulo de elasticidad desde 2,8 GPa en condición seca hasta 1,2 GPa en condición saturada [20], lo que justifica el acondicionamiento previo de las probetas conforme a lo establecido en la norma ASTM D618-21 [12]. Sus propiedades mecánicas superiores respecto a la POLIAMIDA 6la hacen especialmente adecuada para engranajes de alta velocidad y componentes sometidos a cargas térmicas [6].

De acuerdo con la literatura especializada [31], la PA66 presenta propiedades de resistencia mecánica y al desgaste similares a las de la PA6, lo que la posiciona como una alternativa a los materiales metálicos en la fabricación de cojinetes, engranajes y piezas similares donde se requiere resistencia mecánica y bajo coeficiente de fricción.

De acuerdo con estudios previos en el ámbito nacional, este material se utiliza en la fabricación de engranajes de alta velocidad para máquinas de confección en la industria textil de la provincia de Tungurahua, según [29]. De igual manera, según [27], se emplea en palancas, conectores y soportes estructurales dentro del sector carrocerero. En consecuencia, investigaciones reportan que este material también es utilizado en poleas dentadas y bujes para maquinaria agroindustrial, así como en piezas de transmisión en talleres de mecanizado CNC de la ciudad de Ambato.

1.1.3.3 Fundamentos de propiedades mecánicas en polímeros.

Las propiedades mecánicas son el conjunto de características que describen la naturaleza y magnitud de los esfuerzos que un material puede soportar y las consecuencias que estos producen sobre su estructura [35]. En los polímeros de ingeniería, estas propiedades dependen significativamente de la velocidad de

aplicación de la carga y de la temperatura de ensayo, aspectos que se desarrollan en las subsecciones siguientes.

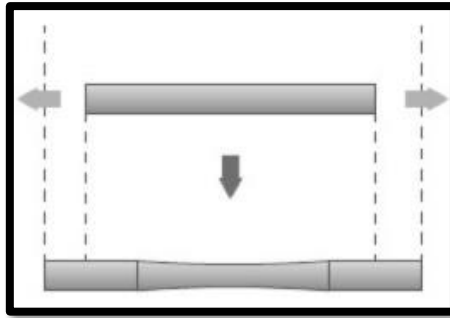


Fig. 18. Tensión o tracción: fuerzas aplicadas en sentidos opuestos para elongar la muestra. [35]

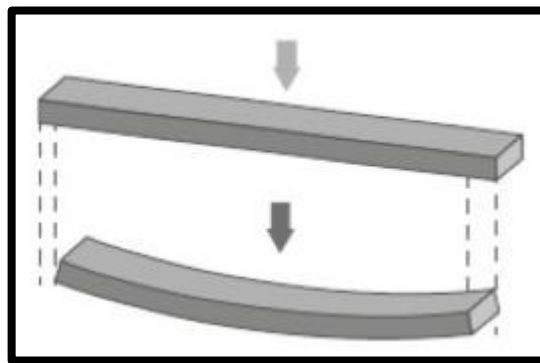


Fig. 19. Flexión o plegado: fuerzas aplicadas en sentidos opuestos para plegar la muestra. [35]

Comportamiento viscoelástico de los polímeros

Los materiales poliméricos no responden a las cargas mecánicas de la misma manera que los metales. Mientras que un material metálico presenta una respuesta esencialmente elástica dentro del rango lineal, los polímeros presentan un comportamiento viscoelástico: su respuesta mecánica depende de la magnitud de la carga, la velocidad de aplicación y la temperatura del entorno [31], [35]. Este comportamiento surge de la movilidad interna de los segmentos de las cadenas poliméricas: cuando la carga se aplica rápidamente, las cadenas no tienen tiempo para reorganizarse y el material se comporta de forma más rígida; cuando la carga es lenta o prolongada, las cadenas pueden reorientarse, generando mayor deformación bajo el mismo nivel de esfuerzo.

Los materiales termoplásticos poseen simultáneamente un componente elástico, responsable de la recuperación reversible de la deformación, y un componente viscoso,

responsable de las deformaciones permanentes [34]. El comportamiento viscoelástico está determinado por tres variables: tensión, deformación y tiempo, y se caracteriza por tres fenómenos: fluencia (de formación continua bajo tensión constante), relajación (disminución de la tensión bajo deformación constante) y recuperación elástica retardada tras la eliminación de la carga.

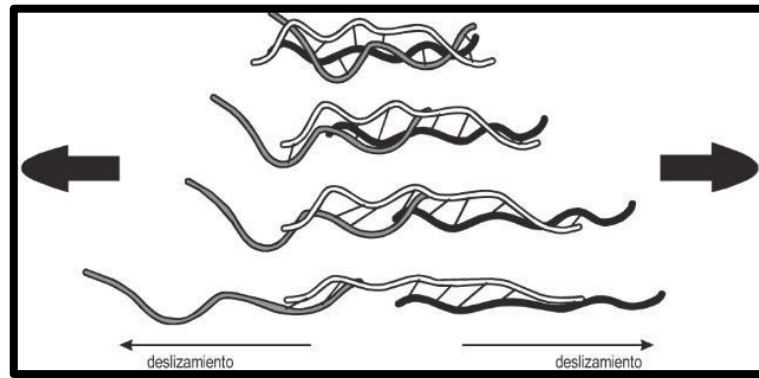


Fig. 20. Esquema de deslizamiento de cadenas poliméricas en un termoplástico. [34]

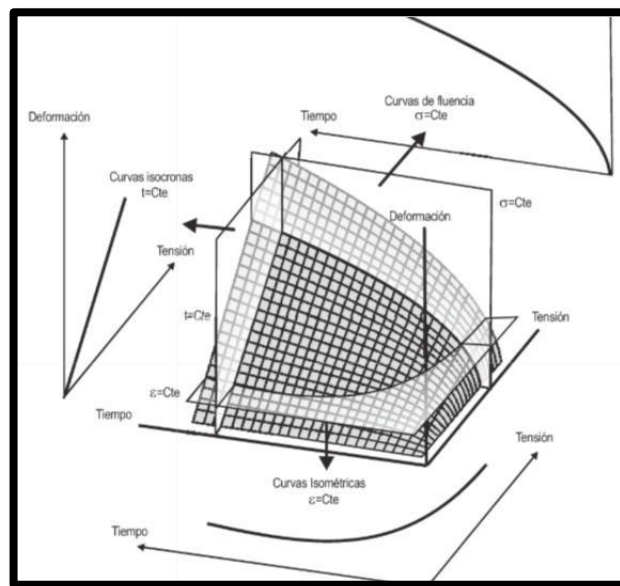


Fig. 21. Curva de comportamiento a largo plazo de un material plástico. [34]

Desde el punto de vista experimental, esta naturaleza viscoelástica tiene dos implicaciones directas sobre los ensayos normalizados: en primer lugar, el módulo de elasticidad medido aumenta con la velocidad de ensayo, por lo que la velocidad de ensayo debe mantenerse constante; en segundo lugar, la temperatura ambiente durante el ensayo influye directamente sobre los resultados obtenidos. Ambas condiciones

están contempladas en las normas ASTM D638 [13] y ASTM D790-25 [30], mediante la especificación de velocidades de ensayo fijas y condiciones ambientales controladas de temperatura y humedad relativa.

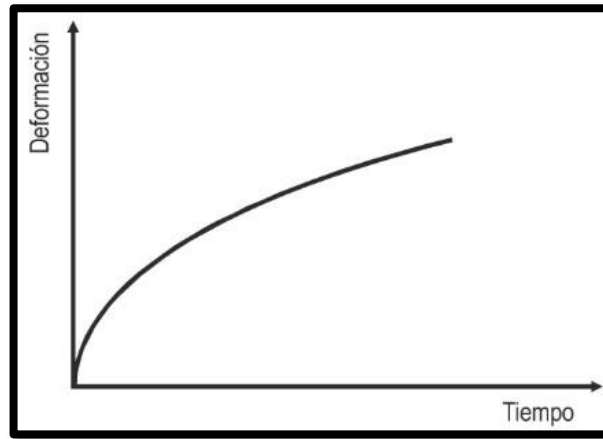


Fig. 22. Ensayo de fluencia estacionario en función del tiempo a tensión constante. [34]

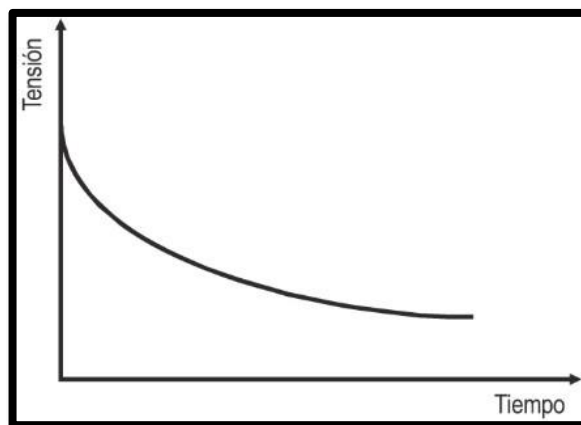


Fig. 23. Ensayo de relajación tensional en función del tiempo a deformación constante. [34]

Esfuerzo de tracción

La norma ASTM D638 [13] establece que el esfuerzo de tracción (σ) se determina como el cociente entre la fuerza de tracción aplicada (W) y el área de la sección transversal original de la probeta (A_0), medida antes del inicio del ensayo. El esfuerzo mecánico se define como una fuerza por unidad de área que actúa perpendicularmente sobre la sección del material [35]. Esta expresión es la base del cálculo de las propiedades de resistencia a la tracción:

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

(1)

Donde:

σ = esfuerzo de tracción [MPa]

W = carga de tracción aplicada [N]

A_0 = área de la sección transversal original de la probeta [mm²]

El área de la sección transversal original A_0 se calcula como el producto del ancho por el espesor de la sección calibrada de la probeta Tipo I, medidas antes del ensayo.

Deformación unitaria

La norma ASTM D638-22 [13] establece que la deformación unitaria (ε) se determina como la razón entre el incremento de longitud registrado en la región calibrada de la probeta (ΔL) y la longitud calibrada original (L_0), medida entre las marcas de referencia antes del ensayo:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{(L - L_0)}{L_0} \quad (2)$$

Donde:

ε = deformación unitaria de ingeniería [adimensional]

ΔL = incremento de longitud de la región calibrada ($L - L_0$) [mm]

L = longitud calibrada en cualquier instante del ensayo [mm]

L_0 = longitud calibrada original antes del ensayo [mm]

La deformación se cuantifica mediante el seguimiento del desplazamiento del travesaño de la máquina de ensayos, método empleado en la presente investigación conforme a lo permitido por la norma ASTM D638-22 [13] para ensayos donde no se requiere extensómetro.

Cabe señalar que el uso del desplazamiento del travesaño puede introducir desviaciones en la determinación del módulo de elasticidad en comparación con el uso de extensómetro, especialmente en materiales poliméricos, lo que constituye una limitación metodológica a considerar en la interpretación de resultados.

Porcentaje de elongación a la rotura

La norma ASTM D638-22 [13] define el porcentaje de elongación a la rotura (%El) como la deformación permanente experimentada por la región calibrada de la probeta en el instante de la fractura, expresada en términos porcentuales respecto a la longitud calibrada original:

$$\%El = \left[\frac{(L_u - L_o)}{L_o} \right] \times 100 \quad (3)$$

Donde:

%El = porcentaje de elongación a la rotura [%]

L_u = longitud calibrada de la probeta en el momento de la rotura [mm]

L_o = longitud calibrada original antes del ensayo [mm]

El porcentaje de elongación se determina a partir del desplazamiento total del travesaño registrado hasta el momento de la rotura. Este parámetro varía considerablemente entre materiales, siendo un indicador de la ductilidad del material ensayado.

La Fig. 24 muestra una curva típica de tensión-deformación para un material polimérico y sus puntos característicos, según se describe en la literatura [34].

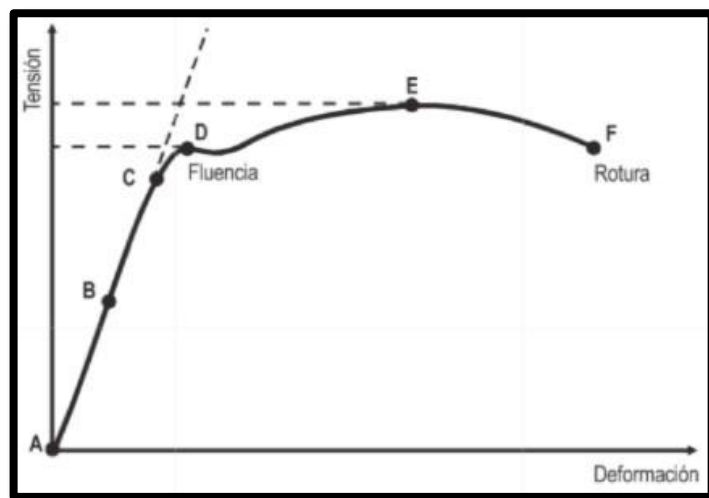


Fig. 24. Curva típica de tensión-deformación de un material polimérico. [34]

Donde:

- A: es el punto de inicio (0,0).
- B: punto hasta donde la curva tensión - deformación presenta comportamiento lineal.
- C: límite elástico del material.
- D: punto de fluencia.
- E: Esfuerzo o resistencia máximos.
- F: Esfuerzo de rotura o resistencia de rotura. [34]

Módulo de Elasticidad en Tracción

La norma ASTM D638-22 [13] establece el módulo de elasticidad (E) como la relación entre la variación del esfuerzo y la variación de la deformación unitaria en la región de comportamiento elástico lineal de la curva esfuerzo-deformación (σ - ϵ), conforme a la Ley de Hooke:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (4)$$

Donde:

E = módulo de elasticidad en tracción (Módulo de Young) [MPa]

$\Delta\sigma$ = incremento de esfuerzo de tracción en la región elástica lineal [MPa]

$\Delta\epsilon$ = incremento de deformación unitaria correspondiente [adimensional]

Para su determinación experimental, la norma establece que este valor se obtiene a partir de la pendiente de la recta secante trazada entre los puntos correspondientes a las deformaciones de 0,05% y 0,25%, criterio consistente con el empleado en la literatura [34], donde el módulo de elasticidad se calcula a partir de dos valores dentro de la zona elástica, entre $\epsilon_1 = 0,0025$ y $\epsilon_2 = 0,050$.

El módulo de elasticidad es el parámetro fundamental en el dimensionamiento de elementos mecánicos poliméricos tales como engranajes, bujes y guías. Su ausencia en las fichas técnicas de los materiales comerciales disponibles en el contexto analizado sustenta directamente el objetivo de la presente investigación.

Esfuerzo de flexión

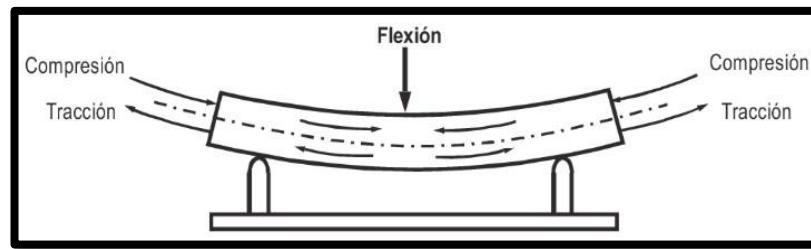


Fig. 25. Esquema de flexión. [34]

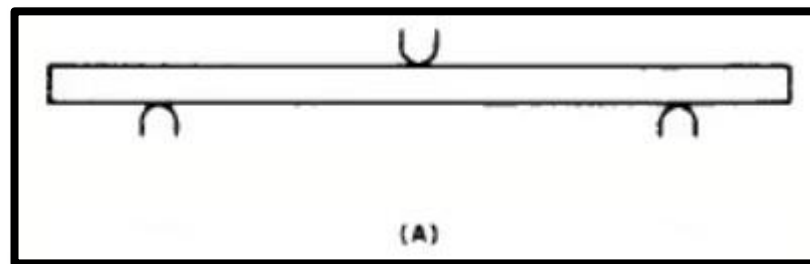


Fig. 26. Esquema del ensayo de flexión en 3 puntos (viga simplemente apoyada). [30]

La norma ASTM D790-25 [30] establece que, cuando una probeta rectangular se ensaya en configuración de viga simplemente apoyada con carga central (Procedimiento A), el esfuerzo máximo en la fibra extrema se determina mediante:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{(2bd^2)} \quad (5)$$

Donde:

σ_f = esfuerzo de flexión en la fibra externa [MPa]

F = carga aplicada por el punzón en el punto central [N]

L = luz entre apoyos [mm]

b = ancho de la probeta [mm]

d = espesor (profundidad) de la probeta [mm]

La resistencia a la flexión (σ_f) corresponde al valor máximo del esfuerzo de flexión registrado durante el ensayo. En materiales que no presentan fractura antes de alcanzar el 5% de deformación en la fibra extrema, se reporta el esfuerzo correspondiente al

punto de fluencia o al 5% de deformación en la fibra extrema, tomando el que ocurra primero.

Deformación de Flexión en la Fibra Externa

La norma ASTM D790-25 [30] establece que la deformación de flexión (ϵ_f) representa el cambio fraccional en la longitud de la fibra extrema de la probeta, evaluado en la sección de momento flector máximo bajo el punzón de carga:

$$\epsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (6)$$

Donde:

ϵ_f = deformación de flexión en la fibra externa [mm/mm]

D = deflexión máxima de la probeta en el punto de carga [mm]

d = espesor de la probeta [mm]

L = luz entre apoyos [mm]

Esta expresión es válida únicamente para condiciones de deflexión reducida, específicamente cuando esta no supera el 10% de la luz entre apoyos, condición que se cumple en el Procedimiento A para materiales que presentan fractura antes de alcanzar el 5% de deformación en la fibra extrema.

Luz entre apoyos (relación L/d)

La norma ASTM D790-25 [30] establece como condición que la luz entre apoyos (L) debe ser igual a dieciséis veces el espesor (d) de la probeta ensayada. Esta relación garantiza que el modo de falla predominante sea flexión pura manteniendo la validez de las expresiones de la teoría de viga simple:

$$L = 16 * d \quad (7)$$

Donde:

L = luz entre apoyos [mm]

d = espesor de la probeta [mm]

16 = relación L/d requerida por la norma [adimensional]

Esta dimensión determina directamente la configuración geométrica del accesorio de flexión a emplear en la máquina universal de ensayos.

Módulo de elasticidad en flexión (módulo flexural)

La norma ASTM D790-25 [30] establece el módulo flexural (E_f) como la pendiente de la recta secante en la región de comportamiento lineal de la curva carga-deflexión:

$$E_f = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad (8)$$

Donde:

E_f = módulo de elasticidad en flexión (módulo flexural) [MPa]

L = luz entre apoyos [mm]

m = pendiente de la recta secante en la región lineal de la curva carga-deflexión [N/mm]

b = ancho de la probeta [mm]

d = espesor de la probeta [mm]

La pendiente m se obtiene como el cociente $\Delta F/\Delta D$ evaluado en la región lineal inicial de la curva carga (F) versus deflexión (D) registrada por la máquina de ensayos. El módulo flexural representa la rigidez del material frente a cargas de flexión y es un parámetro fundamental en el diseño de elementos mecánicos poliméricos como guías, palancas y soportes estructurales.

Velocidad de ensayo en flexión

La norma ASTM D790-25 [30] establece que la velocidad del cabezal debe ajustarse para que la tasa de deformación en la fibra extrema se mantenga en 0,01 mm/mm/min, condición que permite comparar resultados entre probetas de distinto espesor:

$$v = \frac{ZL^2}{(6d)} \quad (9)$$

Donde:

v = velocidad del cabezal de la máquina universal de ensayos [mm/min]

Z = tasa de deformación de la fibra externa requerida por la norma = 0,01 [mm/mm/min]

L = luz entre apoyos [mm]

d = espesor de la probeta [mm]

Al vincular la velocidad del cabezal con la geometría de la probeta, la norma asegura una tasa de deformación uniforme independientemente del espesor del material ensayado.

1.1.3.4 Normativa aplicada

La selección de las normas de ensayo es una decisión metodológica fundamental, ya que garantiza la reproducibilidad, comparabilidad y validez de los resultados. La presente investigación adopta como normas principales la ASTM D638-22 [13] para el ensayo de tracción y la ASTM D790-25 [30] para el ensayo de flexión. De forma complementaria, la ASTM D883-25 [33] establece la terminología técnica empleada en el estudio; la ASTM D618-21 [12] define el procedimiento de acondicionamiento de probetas a 23 ± 2 °C y $50 \pm 5\%$ de humedad relativa durante un mínimo de 40 horas previo a los ensayos; y la ASTM E4-24 [32] rige la verificación metrológica de la máquina universal de ensayos con una precisión de $\pm 1\%$.

Los ensayos de materiales pueden clasificarse según su precisión, efecto y naturaleza, pudiendo un mismo ensayo pertenecer a varias categorías [35]. En la presente investigación, los ensayos de tracción y flexión se clasifican como destructivos, estáticos, mecánicos y normalizados, conforme a lo establecido en las normas ASTM D638-22 [13] y ASTM D790-25 [30].



Fig. 27. Categorías de ensayos de materiales. [35]

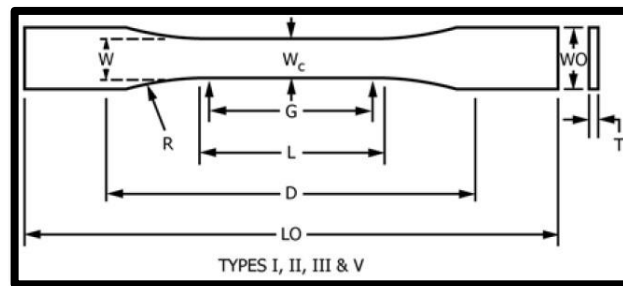


Fig. 28. Probeta Tipo I: dimensiones nominales para ensayo de tracción. [13]

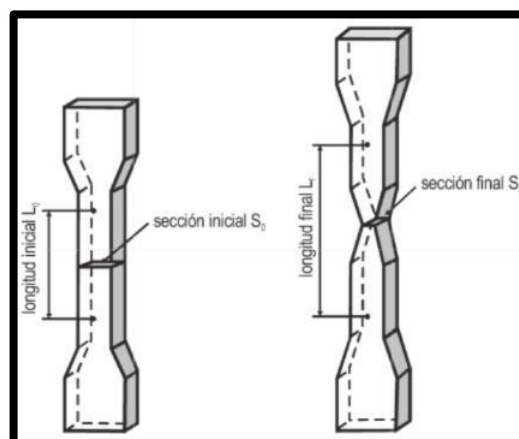


Fig. 29. Esquema de dimensiones en una probeta de tracción. [34]

La compatibilidad de los resultados obtenidos bajo protocolos ASTM con sus equivalentes ISO ha sido documentada en las propias normas [13], [31], donde se confirma que los valores obtenidos mediante ASTM D638 son comparables con los

reportados bajo ISO 527, y que los obtenidos mediante ASTM D790 son equivalentes a los generados bajo ISO 178, siempre que se apliquen las condiciones de acondicionamiento establecidas en la norma ASTM D618-21 [12], así como la velocidad de ensayo y el procedimiento de preparación de probetas de cada protocolo. Esta compatibilidad permite que los datos experimentales obtenidos en la presente investigación sean comparables con estudios internacionales.

TABLA VI. Dimensiones de la probeta tipo I para ensayo de tracción según ASTM D638-22. [13].

Dimensión	Valor (mm)	Tolerancia
Longitud total (LO)	165	mín.
Longitud sección calibrada (L)	57	$\pm 0,5$
Ancho sección calibrada (W)	13	$\pm 0,5$
Ancho en extremos (WO)	19	mín.
Espesor (T)	6	$\pm 0,4$
Radio de curvatura (R)	76	± 1
Longitud entre mordazas (D)	115	± 5

TABLA VII. Dimensiones de probeta para ensayo de flexión en 3 puntos según ASTM D790-25. [30].

Dimensión	Valor (mm)	Tolerancia
Longitud total (L)	130	mín.
Ancho (b)	19	-
Espesor (d)	6	-
Luz entre apoyos	96 (16 $\times$ 6)	± 1
Relación L/d	16:1	± 1
Radio del punzón	5,0	$\pm 0,1$
Radio de los apoyos	5,0	$\pm 0,1$

Para las probetas de flexión con espesor nominal de 6 mm, la luz entre apoyos se estableció en 96 mm, correspondiente a la relación $L/d = 16:1$.

TABLA VIII. Normativa aplicada en la presente investigación.[12], [13], [30], [32], [33].

Norma	Título Oficial	Ensayo	Parámetros clave	Año
ASTM D638	Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics	Tracción uniaxial	Probeta Tipo I; velocidad ajustada según material para $t \leq 5$ min; mín. 6 probetas; desplazamiento del travesaño.	2022
ASTM D790	Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics	Flexión 3 puntos	$L/d = 16:1$; $v \approx 2,56$ y $25,6$ mm/min ajustada según el material; mín. 6 probetas	2025
ASTM D883	Standard Terminology Relating to Plastics	Terminología	Definiciones oficiales del Comité D20 de ASTM International	2025
ASTM D618	Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing	Acondicionamiento	23 ± 2 °C; $50 \pm 5\%$ HR; mínimo 40 horas antes del ensayo	2021
ASTM E4	Standard Practices for Force Calibration and Verification of Testing Machines	Calibración	Precisión $\pm 1\%$ de la carga indicada en la máquina	2024

1.1.3.5 Diagrama esfuerzo-deformación: interpretación comparativa para los cuatro polímeros

La curva esfuerzo-deformación (σ - ϵ) es la representación gráfica fundamental del comportamiento mecánico de un material sometido a carga uniaxial. Para los cuatro materiales objeto de estudio, las curvas σ - ϵ presentan morfologías claramente diferenciadas, que reflejan las particularidades de sus estructuras moleculares y sus mecanismos de deformación característicos, conforme a lo reportado en los antecedentes investigativos.

Material comercial denominado Duralón (referenciado como POM): su curva esfuerzo-deformación presenta una región elástica lineal claramente definida hasta el

límite de proporcionalidad, seguida de un límite de fluencia pronunciado situado aproximadamente entre 45 y 50 MPa, con un máximo local claramente definido. A continuación, se desarrolla una zona de fluencia en frío (cold drawing) a esfuerzo aproximadamente constante, hasta la fractura, con una elongación de entre 15 y 40%. Esta curva presenta una forma característica de cuello de botella en la zona de fluencia, asociada al estrechamiento localizado de la sección transversal y a la posterior propagación del cuello a lo largo de la sección calibrada de la probeta [3], [33]. La baja absorción de humedad de este material hace que la curva sea reproducible e independiente de las condiciones ambientales de ensayo.

Investigaciones reportan que el Grilon y el Nylon presentan curvas esfuerzo-deformación con morfologías similares a las del Duralón, aunque con mayor elongación a la rotura y tenacidad superior. La Nylon presenta un módulo de elasticidad inicial ligeramente superior al del Grilon en condición seca, así como una transición más abrupta hacia el régimen de deformación plástica. Por lo tanto, diversos estudios indican que ambas poliamidas son sensibles al contenido de humedad: en condición húmeda, la región elástica se reduce considerablemente, disminuyendo el módulo de elasticidad de 3,3 a 0,8 GPa para la Grilon, según [11], y de 2,8 a 1,2 GPa para la Nylon, según [20], mientras que la elongación a la rotura se incrementa sustancialmente. Por esta razón, es necesario aplicar el acondicionamiento normativo establecido en la norma ASTM D618-21 [12], para garantizar resultados representativos y comparables entre sí.

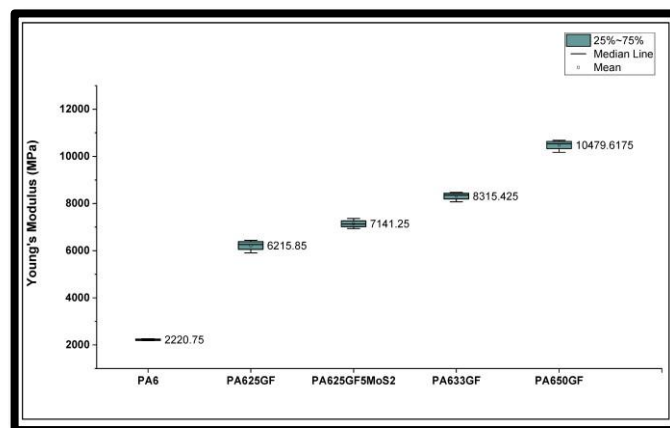


Fig. 30. Módulo de elasticidad de POLIAMIDA 6pura y PA6/GF a distintas fracciones volumétricas.

[22]

Teflón: la curva esfuerzo-deformación del politetrafluoroetileno presenta características claramente distintas a las de los otros tres materiales: la región elástica es corta y de bajo módulo de elasticidad, con valores de entre 0,4 y 0,7 GPa; el límite de fluencia es difuso; y la deformación plástica se extiende hasta valores muy elevados, de entre 200 y 400%, antes de producirse la fractura. La curva presenta múltiples inflexiones asociadas a las transiciones de fase cristalina que ocurren a 19 °C y 30 °C durante el estiramiento del material [15], [16]. La resistencia máxima, entre 14 y 35 MPa, se alcanza a deformaciones de entre 20 y 40%, valores superiores a los registrados en los demás materiales ensayados.

De acuerdo con estudios previos a partir del análisis de la curva esfuerzo-deformación de los materiales poliméricos, se establece un esquema de clasificación basado en la facilidad de deformación y la resistencia a la fractura, según [34]. En consecuencia, el presente trabajo reconoce que en dicho esquema el POM, la POLIAMIDA 6y la PA66 se clasifican como materiales blandos y tenaces, mientras que el PTFE se clasifica como un material muy deformable.

TABLA IX. Clasificación de plásticos según su comportamiento a tracción.[34]

Características		E	σ_y	σ_M	ϵ_M	Ejemplo
Blando	Débil	Bajo	Bajo	Bajo	Moderado	PTFE
	Resistente	Bajo	Bajo	Punto de fluencia	Alto	PE
Débil	Quebradizo	Alto	No tiene	Moderado	Bajo	R. Fenólica
	Fuerte	Alto	Alto	Alto	Moderado	R. Acetal
	Resistente	Alto	Alto	Alto	Alto	PC

La Fig. 31, muestra cuatro tipos de comportamiento tensión-deformación en materiales poliméricos, clasificando el POM como material duro y fuerte, la PA6 y la PA66 como materiales blandos y tenaces, y el PTFE como material blando y débil [34].

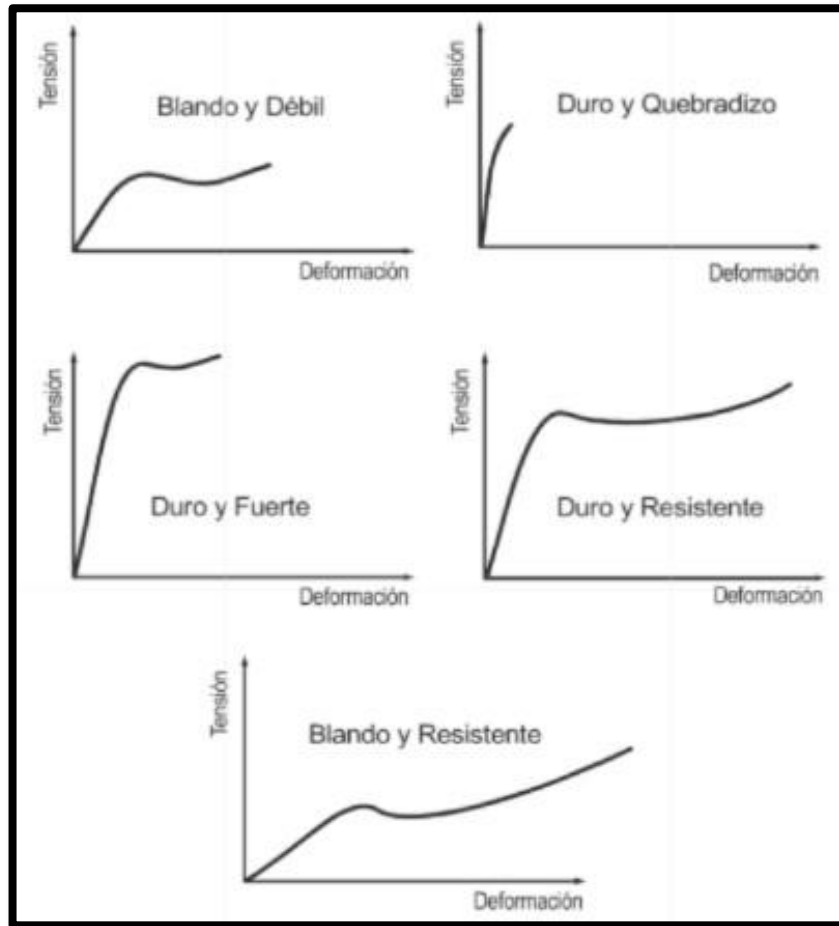


Fig. 31. Curvas de tracción de plásticos con diferente comportamiento. [34]

1.1.3.6 Selección de materiales poliméricos en ingeniería mecánica

La selección de materiales poliméricos para la fabricación de componentes mecánicos requiere evaluar simultáneamente múltiples criterios: propiedades mecánicas, como la resistencia, la rigidez, la ductilidad y la resistencia a la fatiga; propiedades físicas, como la densidad, el coeficiente de fricción y la absorción de humedad; propiedades térmicas, referidas a la temperatura máxima de servicio; propiedades químicas, como la resistencia a fluidos en contacto durante la operación; y criterios económicos, vinculados al costo del material y su disponibilidad en el mercado local.

De acuerdo con estudios previos los cuatro polímeros estudiados cubren un amplio rango de propiedades que los posicionan como alternativas complementarias en el

diseño de componentes mecánicos, según [1], [24], [25]. El material comercial denominado Duralón ofrece la mejor combinación de rigidez, estabilidad dimensional y coeficiente de fricción moderado para aplicaciones de precisión mecánica, siendo recomendado para engranajes, levas y guías de alta tolerancia. El material comercial denominado Grilon aporta mayor tenacidad e impacto con capacidad de autolubricación parcial, empleado habitualmente en ruedas dentadas de mediana carga y bujes en ambientes con lubricación escasa. Por lo tanto, el material comercial denominado Teflón resulta la opción adecuada cuando el coeficiente de fricción mínimo y la resistencia química son los requisitos primarios, como en sellos, juntas deslizantes y asientos de válvulas con fluidos agresivos. Finalmente, el material comercial denominado Nylon ofrece propiedades mecánicas superiores a las del Grilon con mayor resistencia térmica, siendo recomendado para engranajes de alta velocidad y componentes sometidos a temperaturas de servicio más elevadas.

La disponibilidad de datos experimentales comparables, obtenidos bajo condiciones de ensayo uniformes para los cuatro materiales en estudio (objetivo central de la presente investigación), permitirá al ingeniero mecánico implementar métodos cuantitativos de selección de materiales, entre los que destaca el Método de Ashby, cuya aplicación requiere el conocimiento preciso de las propiedades mecánicas de cada material candidato. La ausencia de estos datos en las fichas técnicas comerciales disponibles en el contexto analizado limita la aplicación de metodologías rigurosas de selección, situación que la presente investigación busca resolver mediante la obtención de datos experimentales bajo condiciones específicas de ensayo.

Los valores y propiedades descritos en el presente capítulo corresponden a datos reportados en la literatura bajo condiciones controladas de ensayo. En el caso de materiales comerciales, su comportamiento real puede presentar variaciones debido a factores como el proveedor, el lote, el proceso de fabricación y las condiciones de ensayo, por lo que los resultados experimentales obtenidos en el presente estudio pueden diferir de los valores teóricos reportados.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general:

Analizar las propiedades mecánicas de tracción y flexión de materiales poliméricos comerciales utilizados en componentes mecánicos

1.2.2. Objetivos específicos:

- Realizar las probetas para los ensayos de materiales poliméricos comerciales utilizados en componentes mecánicos.
- Efectuar los ensayos para obtener las propiedades de tracción y flexión de los materiales poliméricos comerciales utilizados en componentes mecánicos.
- Analizar los resultados para determinar las propiedades de tracción y flexión de materiales poliméricos comerciales utilizados en componentes mecánicos.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

2.1. Equipos y materiales

2.1.1 Ubicación

La presente investigación se desarrolló en tres ubicaciones principales. La adquisición de los materiales poliméricos comerciales denominados Duralón, Grilon, Teflón y Nylon se realizó en la ciudad de Ambato, provincia de Tungurahua, a través de un proveedor local especializado en materiales poliméricos de ingeniería. Los materiales fueron recibidos en presentación de planchas y se identificaron principalmente mediante su denominación comercial, registro fotográfico, fichas técnicas referenciales disponibles y marcado individual de probetas.

Para fines de revisión bibliográfica y comparación técnica, estos materiales se asociaron de forma referencial con familias poliméricas comúnmente empleadas en ingeniería; sin embargo, debido a que no se realizaron ensayos de identificación química, dichas asociaciones no constituyen una verificación concluyente de composición. Por tanto, los resultados obtenidos se interpretan como correspondientes a los materiales comerciales ensayados bajo las condiciones específicas de suministro, geometría, acondicionamiento y ensayo aplicadas.

El desarrollo de elaboración de las probetas fue mediante corte por chorro de agua la cual se llevó a cabo en la ciudad de Ambato, en la empresa ALUVID GLASS CIA. LTDA. Para este proceso se utilizó una Máquina de Corte por Chorro de Agua (Waterjet cutting) marca Flow International Corporation, modelo Mach 3, equipo de corte por control numérico computarizado (CNC) que permite obtener probetas con geometría precisa sin generar calor en la zona de corte, evitando así las alteraciones térmicas en las propiedades de los materiales poliméricos.

Los ensayos de tracción y flexión se ejecutaron en una Máquina Universal de Ensayos Shimadzu, modelo AGS-X, con capacidad de carga máxima de 50 kN y celda de carga tipo 1210AJ (S/N: 1182442). El equipo está disponible en el Laboratorio de Ensayos de Materiales del CIDIIE de la Universidad Central del Ecuador, en Quito, provincia de Pichincha, Ecuador. Dicho laboratorio dispone de equipamiento calibrado por el

Servicio de Acreditación Ecuatoriano (SAE) para la ejecución de ensayos mecánicos bajo condiciones controladas. El acondicionamiento previo de las probetas se realizó igualmente en las instalaciones de la Universidad Central del Ecuador, bajo las condiciones ambientales del laboratorio con una temperatura de 23.6 a 23.9 °C y una humedad relativa de 50 %, durante un período de 70 horas previo a la ejecución de los ensayos.

El corte por chorro de agua expone las probetas a humedad directa durante su fabricación, lo que hace imprescindible un acondicionamiento previo antes de ejecutar los ensayos. Este paso es especialmente crítico para el Grilon comercial y el Nylon comercial, materiales higroscópicos cuyas propiedades mecánicas son sensibles a la absorción de agua. Para garantizar condiciones estables y comparables entre los cuatro materiales se estableció un período de acondicionamiento de 70 horas.

2.1.2 Materiales

Los materiales poliméricos objeto de estudio fueron adquiridos en presentación de planchas y se identificaron comercialmente como Duralón, Grilon, Teflón y Nylon. La selección de estos materiales respondió a su uso frecuente en componentes mecánicos y a la disponibilidad comercial en el contexto local analizado.

Las fichas técnicas y registros documentales incluidos en los anexos se consideran documentación referencial de trazabilidad de los materiales comerciales adquiridos. Su uso en esta investigación se limita al respaldo documental y a la comparación preliminar, debido a que pueden corresponder a distintos proveedores, lotes, grados comerciales, presentaciones, procesos de fabricación o condiciones de ensayo. Por esta razón, la identificación principal de los materiales se mantiene mediante su denominación comercial: Duralón, Grilon, Teflón y Nylon. Asimismo, cualquier asociación con familias poliméricas reportadas en la literatura especializada se interpreta únicamente como referencia técnica preliminar y no como verificación química concluyente de composición.

TABLA X. Especificaciones de los materiales poliméricos comerciales.

Nº	Nombre comercial	Asociación técnica referencial	Presentación	Dimensiones (mm)	Cantidad
-----------	-------------------------	---------------------------------------	---------------------	-------------------------	-----------------

1	Duralón	Polioximetileno	Plancha color amarillento claro	$372 \times 185 \times 6$	Ficha técnica referencial, registro fotográfico y marcado de probetas
2	Grilon	Poliamida 6	Plancha color amarillento opaco	$372 \times 185 \times 6$	Ficha técnica referencial, registro fotográfico y marcado de probetas
3	Teflón	Politetrafluoroetileno	Plancha color blanco	$372 \times 185 \times 6$	Ficha técnica referencial, registro fotográfico y marcado de probetas
4	Nylon	Poliamida comercial	Plancha color natural	$372 \times 185 \times 6$	Ficha técnica referencial, registro fotográfico y marcado de probetas

Fuente: Elaboración propia.

Los materiales fueron identificados a partir de su denominación comercial, fichas técnicas referenciales disponibles, registro fotográfico de las planchas recibidas y marcado individual de las probetas. Las asociaciones polioximetileno, poliamida 6, politetrafluoroetileno y poliamida comercial se emplean únicamente como referencias técnicas para organizar el estudio y establecer comparaciones preliminares con literatura. Estas asociaciones no constituyen una verificación química concluyente de composición, debido a que no se realizaron ensayos complementarios como FTIR, DSC o TGA. En consecuencia, los resultados obtenidos deben interpretarse como

representativos de los materiales comerciales ensayados bajo las condiciones experimentales aplicadas.

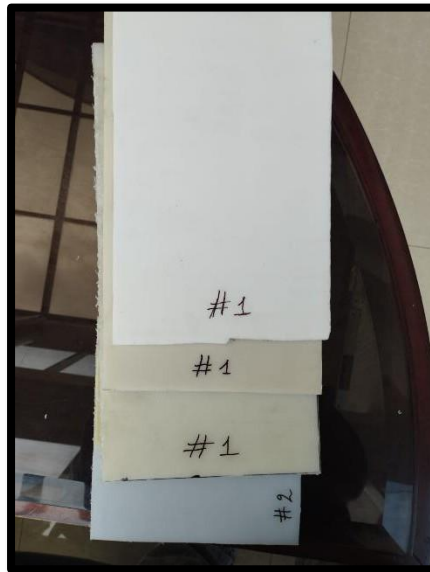


Fig. 32. Planchas de los polímeros comerciales adquiridos: Nylon, Grilon, Teflón, Duralón. Fuente: Elaboración propia.

2.1.3 Equipos

En la presente investigación se emplearon los siguientes equipos, descritos en el orden en que fueron utilizados.

Máquina de corte por chorro de agua (Flow International Corporation, Mach 3)

La fabricación de las probetas se realizó mediante una máquina de corte por chorro de agua (Waterjet cutting) marca Flow International Corporation, modelo Mach 3, disponible en la empresa ALUVID GLASS CIA. LTDA. de la ciudad de Ambato. Este equipo opera mediante control numérico computarizado (CNC) proyectando un chorro de agua a alta presión mezclado con abrasivo sobre el material, Este proceso no genera calor en la zona de corte, preservando las propiedades mecánicas del material. Las especificaciones técnicas del proceso de fabricación se detallan en la TABLA XI.

TABLA XI. Especificaciones del proceso de fabricación de probetas.

Parámetro	Descripción
Método de corte	Chorro de agua (Waterjet cutting)
Equipo	Flow International Corporation, modelo Mach 3
Empresa	ALUVID GLASS CIA. LTDA., Ambato

Control	Numérico Computarizado (CNC)
Tipo de probeta tracción	Tipo I según ASTM D638-22
Tipo de probeta flexión	Rectangular según ASTM D790-25
Probetas fabricadas por material	7 unidades
Probetas ensayadas por material	6 unidades

Fuente: Elaboración propia.

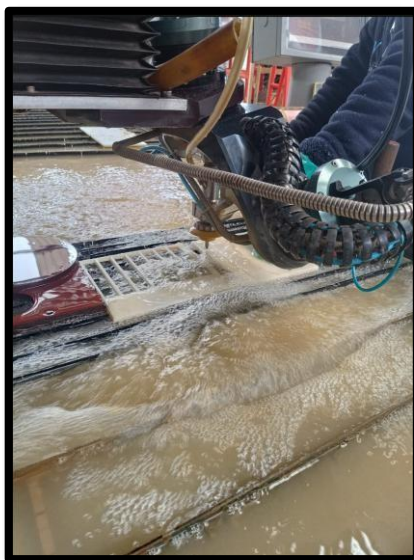


Fig. 33. Máquina de Corte por Chorro de Agua Flow International Corporation, modelo Mach 3, utilizada para la fabricación de probetas en ALUVID GLASS CIA. LTDA., Ambato. Fuente: Elaboración propia.

Diseño de probetas

El diseño geométrico de las probetas de tracción Tipo I (ASTM D638-22) y de las probetas rectangulares para flexión (ASTM D790-25) se realizó en SolidWorks. Se generaron los modelos tridimensionales y los planos técnicos con las cotas normalizadas necesarias para la fabricación por chorro de agua.

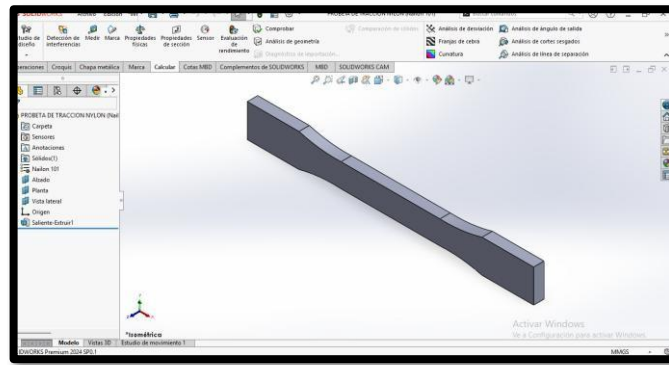


Fig. 34. Diseño tridimensional de probeta Tipo I para ensayo de tracción según ASTM D638-22 elaborado en SolidWorks Fuente: Elaboración propia.

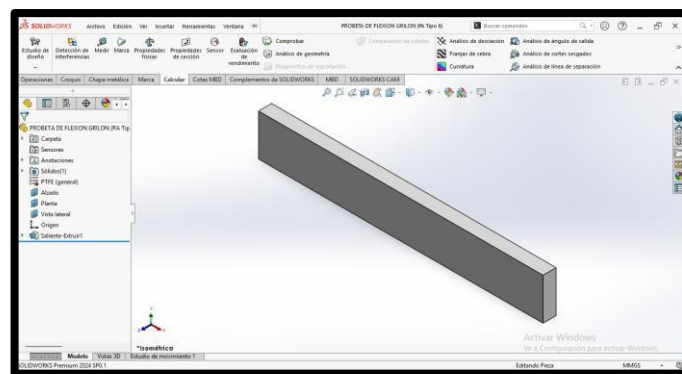


Fig. 35. Diseño tridimensional de probeta rectangular para ensayo de flexión según ASTM D790-25 elaborado en SolidWorks. Fuente: Elaboración propia.

Medición

La medición de las dimensiones de cada probeta previo a los ensayos se realizó mediante un calibrador pie de rey digital marca Tronic Digital Caliper, con una resolución de 0,01 mm, conforme a lo establecido en la norma ASTM D5947. Para cada probeta se midieron el ancho y el espesor de la sección calibrada para el cálculo del área de la sección transversal original, datos necesarios para calcular el esfuerzo de tracción y de flexión mediante las ecuaciones descritas en el Capítulo 1.



Fig. 36. Calibrador pie de rey digital Tronic Digital Caliper con resolución de 0,01 mm utilizado para la medición dimensional de las probetas. Fuente: Elaboración propia.

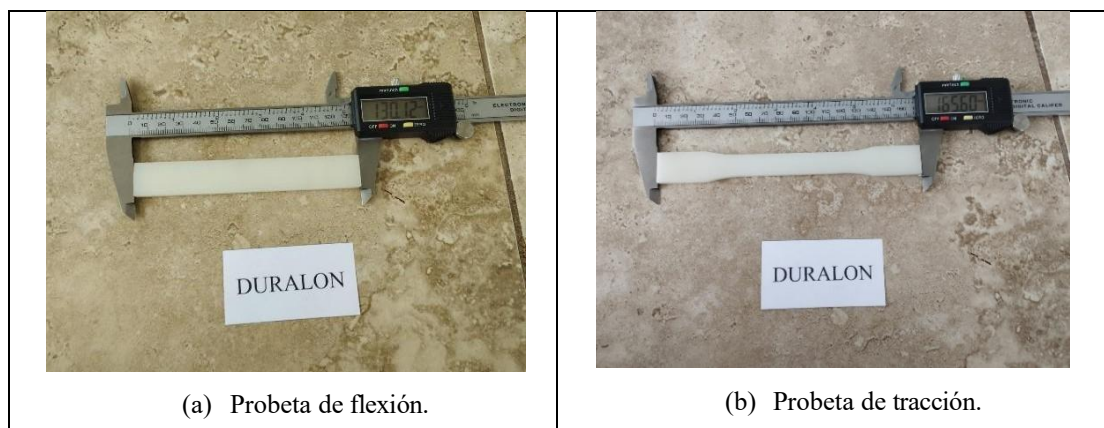


Fig. 37. Medición dimensional con vernier de las probetas del Duralón comercial: (a) probeta de flexión, (b) probeta de tracción. Fuente: Elaboración propia.

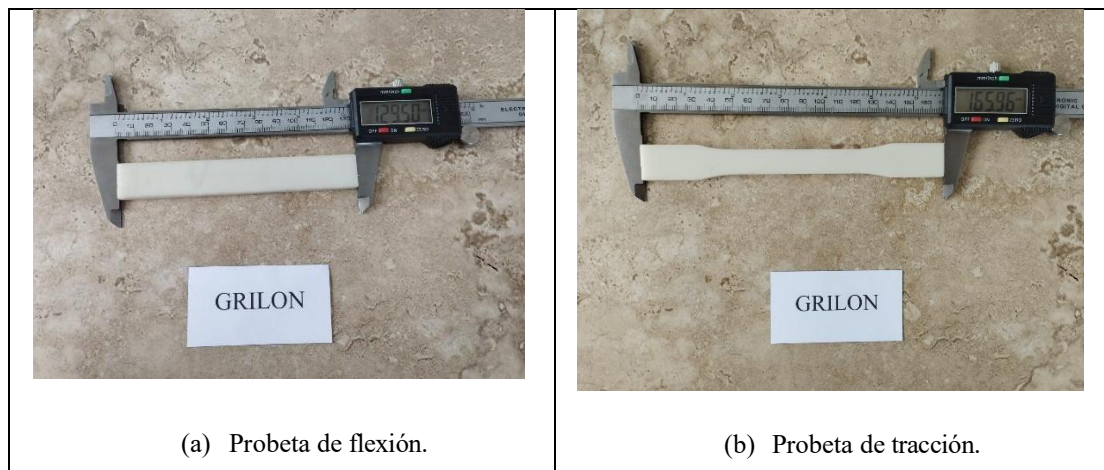


Fig. 38. Medición dimensional con vernier de las probetas del Grilon comercial: (a) probeta de flexión, (b) probeta de tracción. Fuente: Elaboración propia.

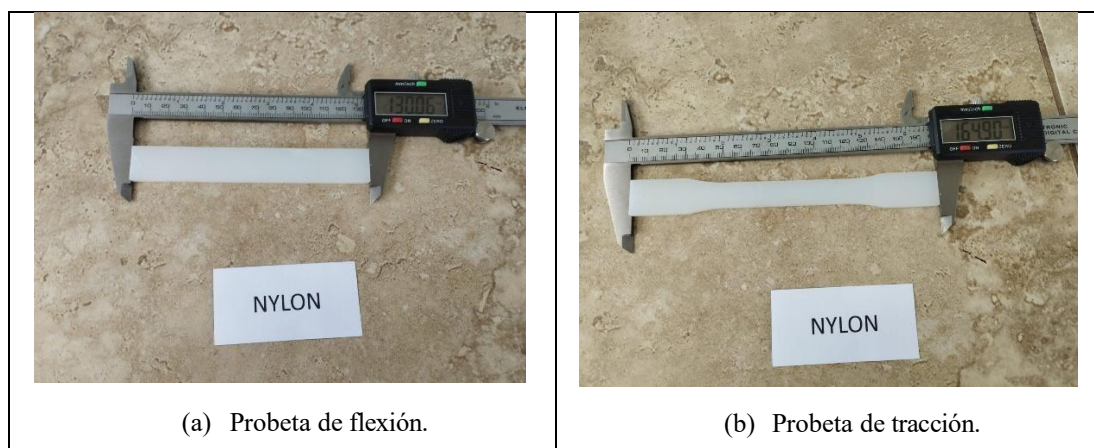


Fig. 39. Medición dimensional con vernier de las probetas del Nylon comercial: (a) probeta de flexión, (b) probeta de tracción. Fuente: Elaboración propia.

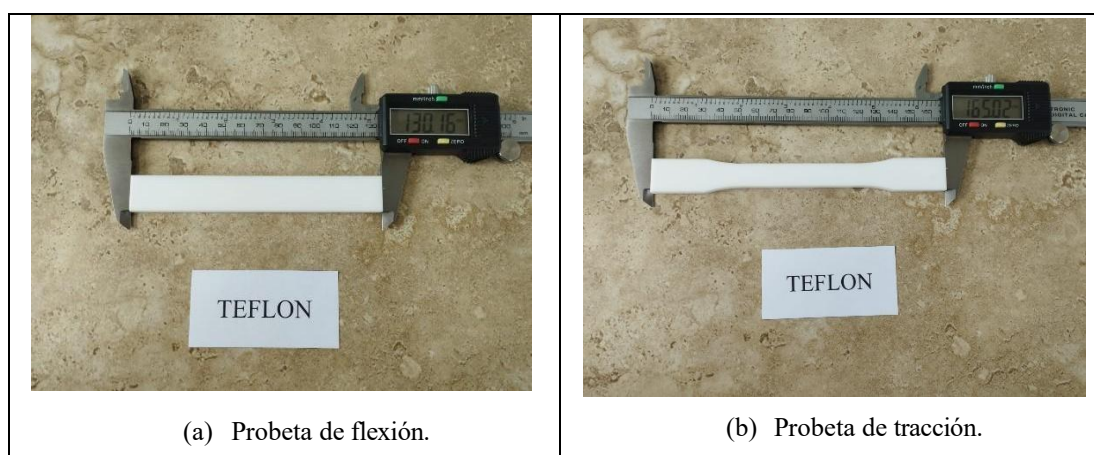


Fig. 40. Medición dimensional con vernier de las probetas del Teflón comercial: (a) probeta de flexión, (b) probeta de tracción. Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de respaldar las dimensiones utilizadas en el cálculo de las propiedades mecánicas, se elaboró un resumen dimensional de las probetas empleadas en los ensayos de tracción y flexión. Las dimensiones fueron verificadas previamente con calibrador digital y se utilizaron para determinar el área transversal considerada en los cálculos de esfuerzo.

TABLA XII. Resumen dimensional de las probetas empleadas en los ensayos

Ensayo	Tipo de probeta	Norma aplicada	Dimensiones principales	Área empleada en cálculo	Observación
Tracción	Tipo I	ASTM D638-22	W = 13,5 mm; T = 6 mm	81 mm ²	Área utilizada para el cálculo de Sut y Sy.

Flexión	Rectangular	ASTM D790-25	$b = 19 \text{ mm}; d = 6 \text{ mm}$	114 mm^2	Sección transversal de referencia para probetas de flexión.
Flexión	Rectangular	ASTM D790-25	$L = 96 \text{ mm}; d = 6 \text{ mm}$	$L/d = 16:1$	Relación luz-espesor empleada en el ensayo de flexión.

Fuente: Elaboración Propia

Para los ensayos de tracción se empleó un área transversal de 81 mm^2 , obtenida a partir del producto entre el ancho de la sección calibrada y el espesor de la probeta. Para los ensayos de flexión se empleó una sección transversal de 114 mm^2 y una luz entre apoyos de 96 mm , correspondiente a una relación $L/d = 16:1$. Estas dimensiones fueron utilizadas posteriormente en el cálculo de las propiedades mecánicas reportadas en el Capítulo III.

Máquina universal de ensayos Shimadzu AGS-X

Los ensayos de tracción y flexión se ejecutaron en una Máquina Universal de Ensayos marca Shimadzu, modelo AGS-X, con una capacidad de carga máxima de 50 kN , equipada con una celda de carga tipo 1210AJ (S/N: 1182442), disponible en el Laboratorio de Ensayos de Materiales del Centro de Investigación del Diseño Industrial Innovación y Emprendimiento (CIDIIE) de la Universidad Central del Ecuador, ciudad de Quito. El equipo aplica cargas de tracción y flexión a velocidad constante, registrando simultáneamente la fuerza aplicada y el desplazamiento del travesaño. El software Trapezium X genera automáticamente las curvas fuerza-desplazamiento de cada ensayo. Durante la ejecución experimental se verificó visualmente que el equipo contaba con una etiqueta de calibración vigente, la cual fue documentada mediante registro fotográfico. Debido a que no se dispuso del certificado físico de calibración, dicha evidencia se considera un respaldo documental parcial de trazabilidad.

Cabe señalar que la deformación se cuantificó mediante el desplazamiento del travesaño de la máquina, conforme a lo permitido por la norma ASTM D638-22. No obstante, el uso del desplazamiento del travesaño en lugar de un extensómetro puede introducir desviaciones en la determinación del módulo de elasticidad, especialmente en materiales poliméricos, lo cual constituye una limitación metodológica a considerar en la interpretación de los resultados.

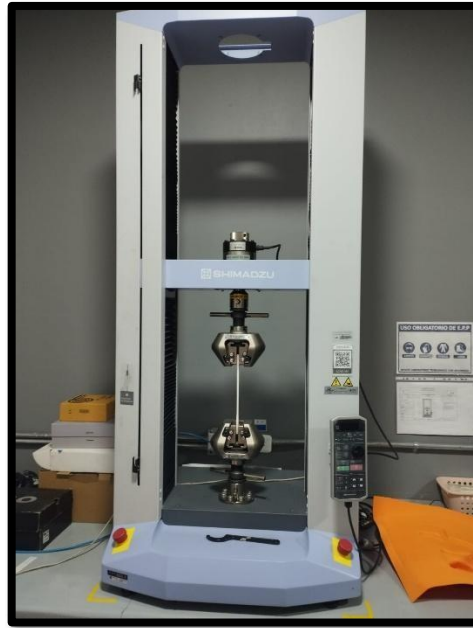


Fig. 41. Máquina Universal de Ensayos Shimadzu AGS-X de 50 kN disponible en el CIDIIE, Universidad Central del Ecuador.



Fig. 42. Registro fotográfico de etiqueta de calibración de la máquina universal de ensayos

2.2. Métodos

2.2.1 Tipo de investigación

- **Descriptivo**

La investigación es de tipo descriptivo, ya que caracteriza el comportamiento mecánico de los cuatro polímeros comerciales (Duralón, Grilon, Teflón y Nylon), mediante la documentación y comparación de sus propiedades de tracción y flexión bajo condiciones de ensayo idénticas, generando perfiles de desempeño para cada material.

- **Experimental**

La investigación es de tipo experimental, puesto que los cuatro materiales poliméricos comerciales fueron sometidos a ensayos normalizados de tracción y flexión bajo condiciones controladas de laboratorio. Se manipuló la variable tipo de material para medir su efecto sobre las propiedades mecánicas y establecer comparaciones cuantitativas.

- **Cuantitativo**

El enfoque es cuantitativo, puesto que los resultados se expresan en valores numéricos: resistencia a la tracción (MPa), módulo de elasticidad (GPa), elongación a la rotura (%), resistencia a la flexión (MPa) y módulo flexural (GPa). Estos valores fueron procesados mediante análisis estadístico descriptivo.

- **Bibliográfico**

Para el marco teórico y la metodología se consultaron artículos científicos, libros especializados y normas ASTM de fuentes académicamente reconocidas, tal como se indica en el Capítulo 1.

2.2.2 Definición de variables

- **Variable independiente**

Tipo de material polimérico comercial (Duralón, Grilon, Teflón y Nylon).

- **Variable dependiente**

Propiedades mecánicas de tracción y flexión.

2.2.3 Hipótesis

- Existen diferencias estadísticamente significativas en las propiedades mecánicas de tracción y flexión entre los materiales poliméricos comerciales denominados Duralón, Grilon, Teflón y Nylon, evaluados bajo condiciones normalizadas ASTM.

TABLA XIII. Operacionalización de variables.

Variable	Tipo	Definición conceptual	Indicadores	Unidades	Instrumentos
Tipo de material polimérico	Independiente	Material polimérico comercial sometido a ensayo normalizado	Duralón, Grilon, Teflón, Nylon	—	Denominación comercial del proveedor (sin verificación química adicional)
Resistencia a la tracción	Dependiente	Esfuerzo máximo soportado en tracción uniaxial	σ máx	MPa	Shimadzu AGS-X
Módulo de elasticidad en tracción	Dependiente	Pendiente de la zona elástica de la curva σ – ϵ	E	GPa	Shimadzu AGS-X
Elongación a la rotura	Dependiente	Deformación permanente en el punto de fractura	%El	%	Shimadzu AGS-X
Resistencia a la flexión	Dependiente	Esfuerzo máximo soportado en flexión en 3 puntos	of	MPa	Shimadzu AGS-X
Módulo flexural	Dependiente	Rigidez del material ante	Ef.	GPa	Shimadzu AGS-X

		cargas de flexión			
--	--	-------------------	--	--	--

Fuente: Elaboración propia.

2.2.4 Población y muestra

- Población

La población de estudio está conformada por los materiales poliméricos comerciales, específicamente los utilizados en la fabricación de componentes mecánicos en la industria de Tungurahua, entre los que se encuentran los materiales comerciales denominados Duralón, Grilon, Teflón y Nylon.

- Muestra

La muestra está conformada por probetas normalizadas fabricadas con los cuatro polímeros comerciales seleccionados. Se fabricaron 7 probetas por material por ensayo, para un total de 56 probetas, de las cuales se ensayaron 6 por material y ensayo, resultando en 48 probetas ensayadas. La séptima probeta de cada grupo cumplió la función de testear velocidades previas al ensayo, probeta respaldo o reserva, utilizada únicamente en caso de falla dimensional, defecto superficial detectado en la medición previa al ensayo o invalidación del ensayo por condición anómala. Esta práctica es coherente con los lineamientos de la norma ASTM D638-22, que recomienda disponer de especímenes adicionales para garantizar el número mínimo de ensayos válidos. El detalle de la muestra se presenta en la Tabla XIII.

TABLA XIV. Resumen de probetas fabricadas y ensayadas.

Nº	Nombre comercial	Ensayo	Norma	Probetas fabricadas	Probetas ensayadas	Probetas de respaldo
1	Duralón	Tracción	ASTM D638-22	7	6	1
2	Duralón	Flexión	ASTM D790-25	7	6	1
3	Grilon	Tracción	ASTM D638-22	7	6	1

4	Grilon	Flexión	ASTM D790-25	7	6	1
5	Teflón	Tracción	ASTM D638-22	7	6	1
6	Teflón	Flexión	ASTM D790-25	7	6	1
7	Nylon	Tracción	ASTM D638-22	7	6	1
8	Nylon	Flexión	ASTM D790-25	7	6	1
			TOTAL	56	48	8

Fuente: Elaboración propia.

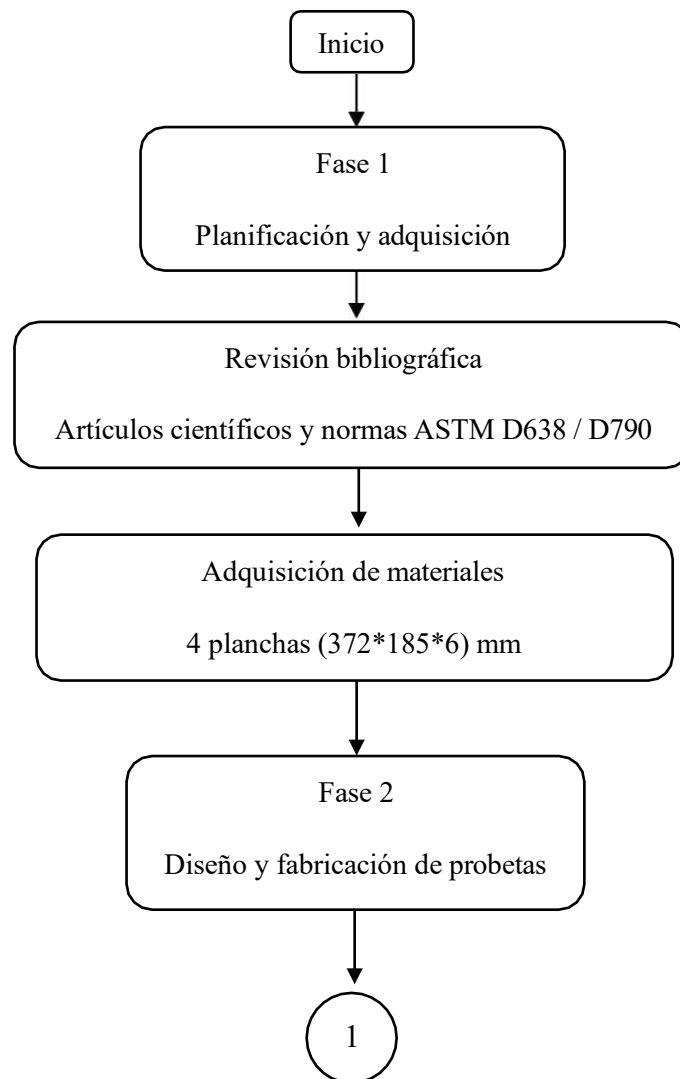
Las probetas de respaldo no fueron consideradas dentro del cálculo estadístico de propiedades mecánicas, salvo que hubiera sido necesario reemplazar una probeta invalidada por defecto dimensional, daño superficial o condición anómala durante el ensayo. En el análisis final se consideraron seis probetas válidas por material y por tipo de ensayo.

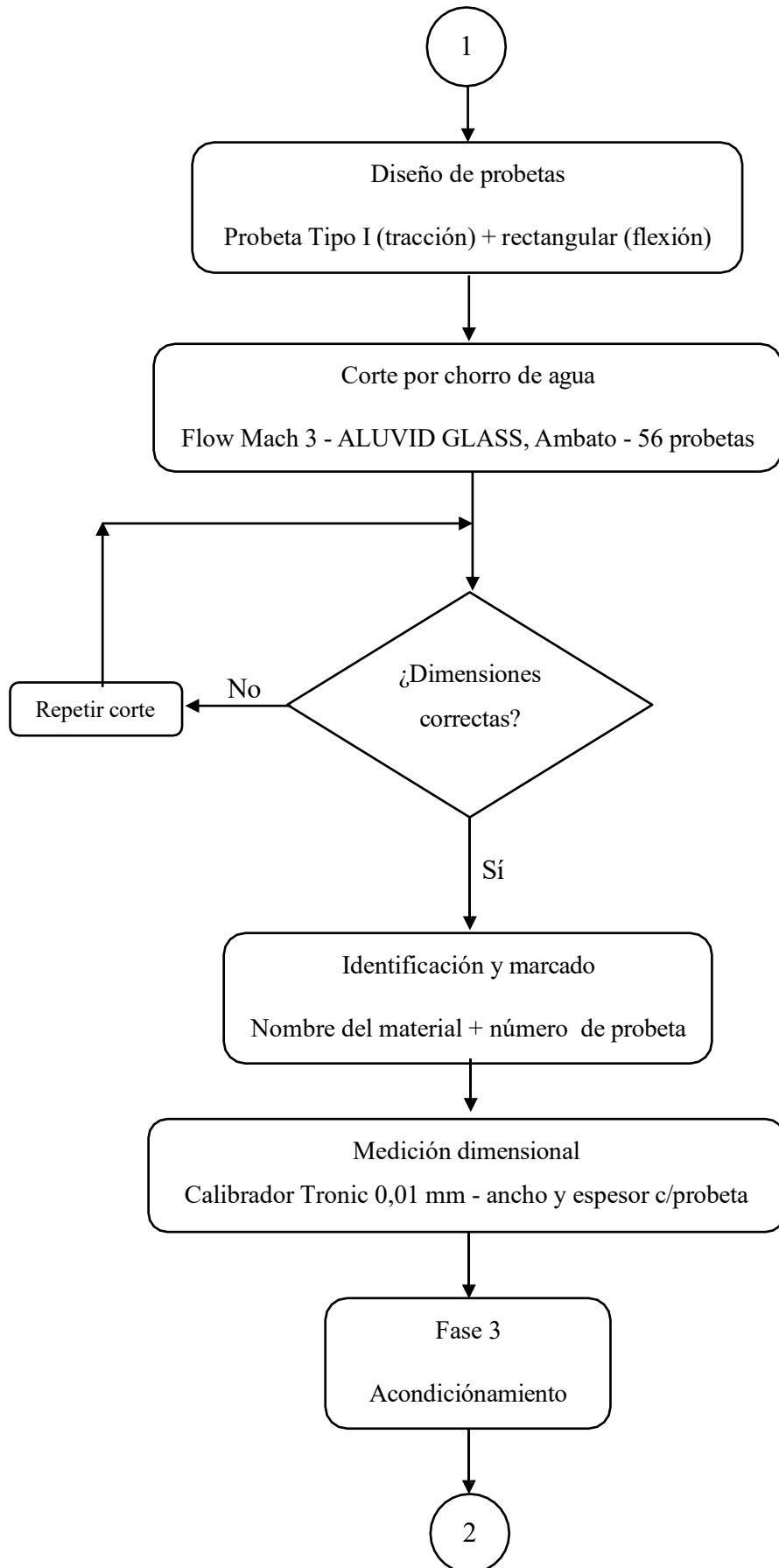
- **Técnica de muestreo:**

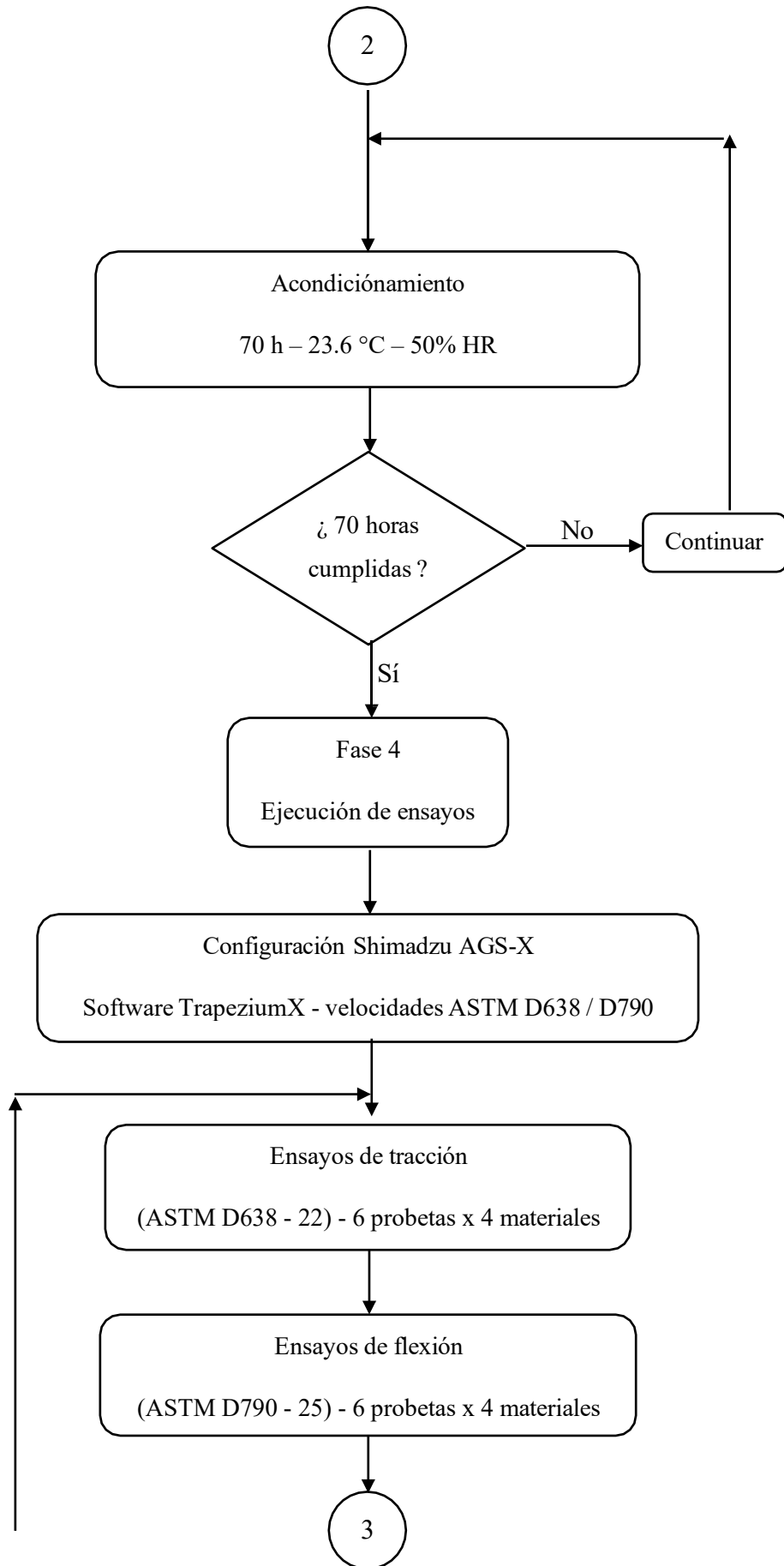
El muestreo fue de tipo determinístico, debido a que las probetas fueron fabricadas siguiendo geometrías normalizadas y condiciones de ensayo controladas según las normas ASTM D638-22 y ASTM D790-25. Este enfoque es adecuado para investigaciones experimentales de caracterización de materiales, donde se requiere mantener condiciones homogéneas de fabricación, acondicionamiento y ensayo para todos los especímenes. Los resultados obtenidos son representativos de los materiales comerciales adquiridos y ensayados bajo las condiciones específicas de este estudio, sin pretender generalizarse a todos los lotes, proveedores o presentaciones disponibles en el mercado.

2.2.5 Recolección de información

La recolección de datos se basó en medición experimental directa con la máquina universal de ensayos Shimadzu AGS-X como instrumento principal. El proceso seguido se describe a continuación.







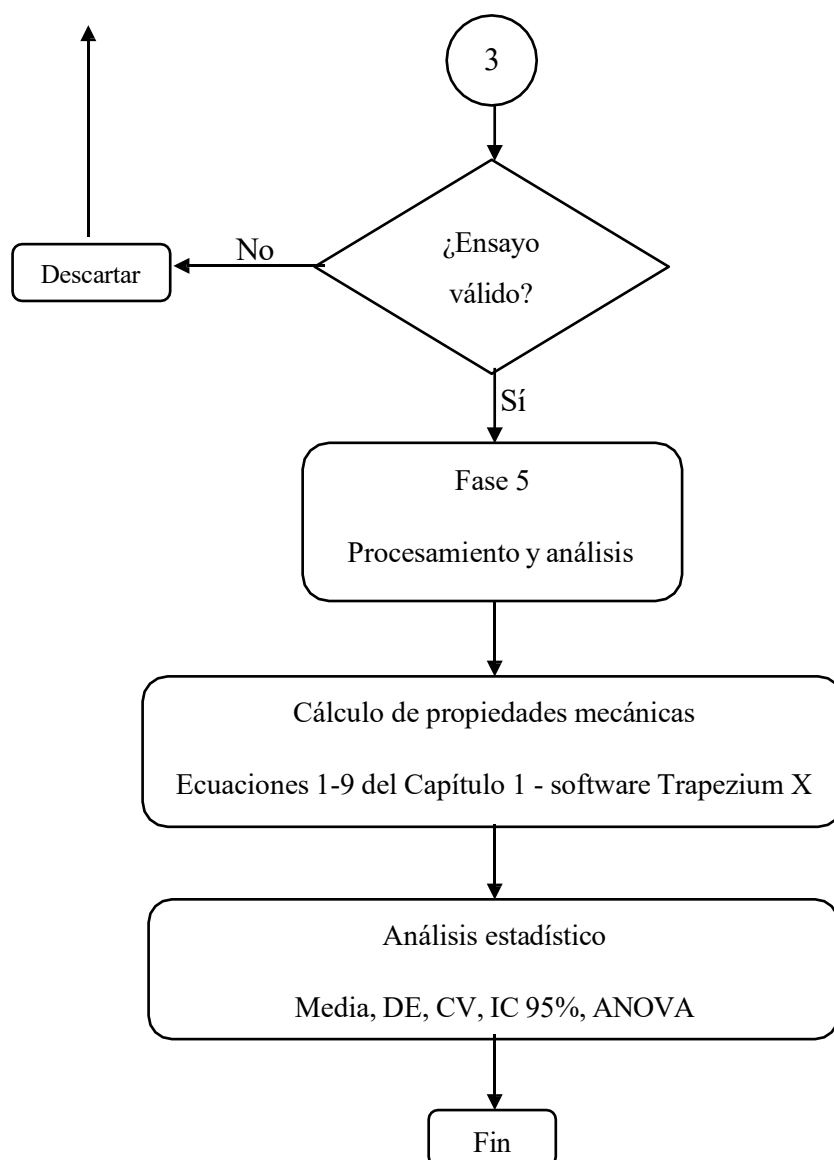


Fig. 43. Diagrama de flujo del proceso experimental de caracterización mecánica de los materiales poliméricos comerciales. Fuente: Elaboración propia.

Revisión bibliográfica y selección de normas ASTM

Se revisó la literatura científica sobre las propiedades mecánicas de los cuatro polímeros comerciales y se seleccionaron las normas ASTM D638-22 para tracción y ASTM D790-25 para flexión. Estas normas son los estándares internacionales diseñados para determinar propiedades mecánicas en plásticos no reforzados, condición que corresponde a los materiales estudiados.

Adquisición de materiales

Los materiales poliméricos comerciales empleados en la investigación fueron adquiridos en presentación de planchas a través de un proveedor local con dimensiones de $372 \times 185 \times 6$ mm para cada material. La trazabilidad metodológica se respaldó mediante las fichas técnicas referenciales disponibles, el registro fotográfico de las planchas recibidas, la diferenciación visual de los materiales, la identificación individual de las probetas y el control dimensional previo a los ensayos.

Las denominaciones Duralón, Grilon, Teflón y Nylon corresponden a los nombres comerciales utilizados durante la adquisición y organización experimental de las muestras. No obstante, debido a que no se realizaron ensayos de identificación química, las asociaciones Duralón/polioximetileno, Grilon/ poliamida 6, Teflón/ politetrafluoroetileno y Nylon/ poliamida 66 se consideran referenciales y no certifican la composición exacta de los materiales. En consecuencia, las fichas técnicas se emplean únicamente como respaldo documental y marco comparativo preliminar, sin constituir criterio absoluto de validación de los resultados obtenidos.



Fig. 44. Planchas de los polímeros comerciales adquiridos: (a) Nylon, (b) Grilon, (c) Teflón, (d) Duralón. Fuente: Elaboración propia.

Diseño de probetas

Las probetas de tracción Tipo I según ASTM D638-22 y las probetas rectangulares para flexión según ASTM D790-25 se modelaron en SolidWorks, obteniendo los modelos tridimensionales y planos técnicos con las cotas normalizadas requeridas para el corte por chorro de agua.

Fabricación de probetas por corte con chorro de agua

Las probetas fueron fabricadas en ALUVID GLASS CIA. LTDA., Ambato, con la Máquina de Corte por Chorro de Agua Flow International Corporation, modelo Mach 3, siguiendo los planos elaborados en SolidWorks. El corte de las probetas se realizó manteniendo la misma orientación respecto a la geometría de la plancha original para todos los materiales, garantizando consistencia en las condiciones de fabricación. Se fabricaron 7 probetas por material por ensayo, para un total de 56 probetas.

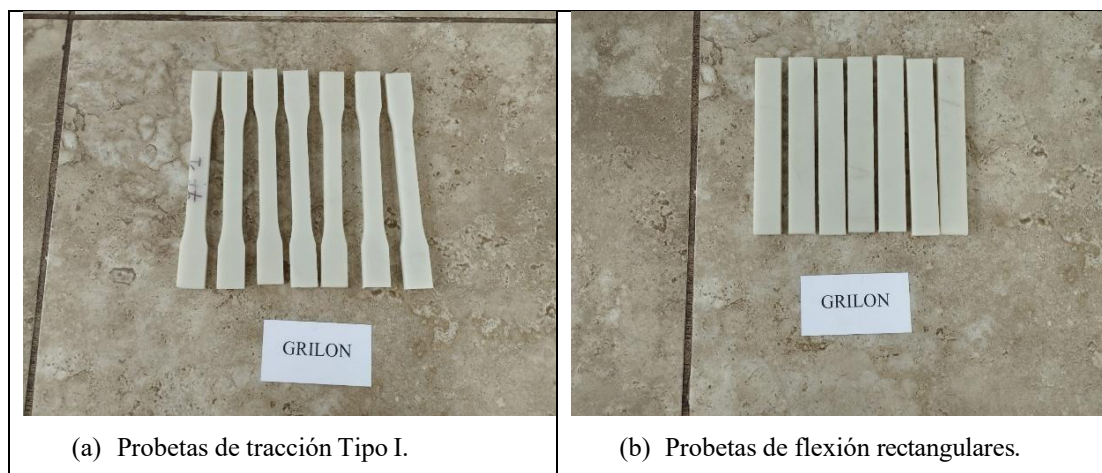


Fig. 45. Probetas del Grilon comercial , después del proceso de corte por chorro de agua: (a) probetas de tracción Tipo I, (b) probetas de flexión rectangulares. Fuente: Elaboración propia.

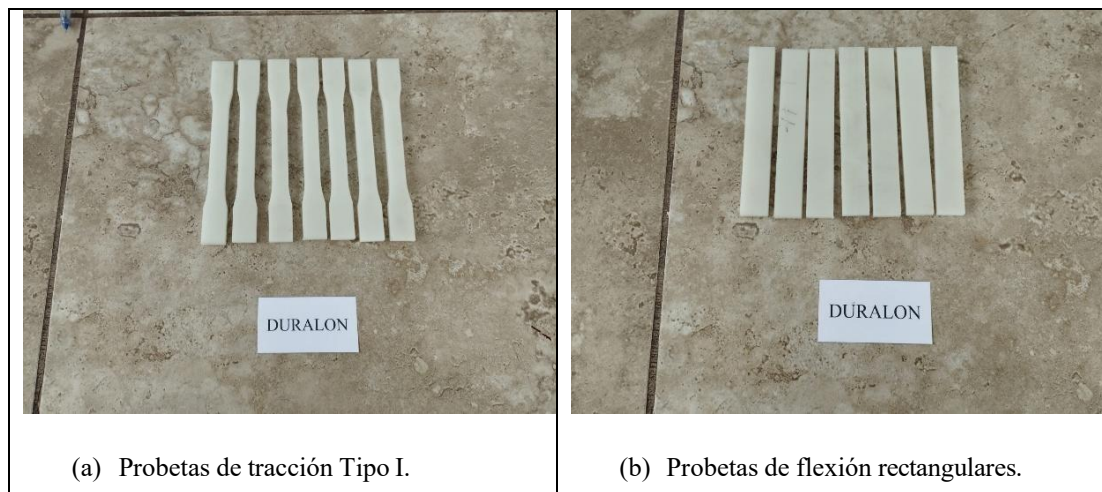


Fig. 46. Probetas del Duralón comercial, después del proceso de corte por chorro de agua: (a) probetas de tracción Tipo I, (b) probetas de flexión rectangulares. Fuente: Elaboración propia.

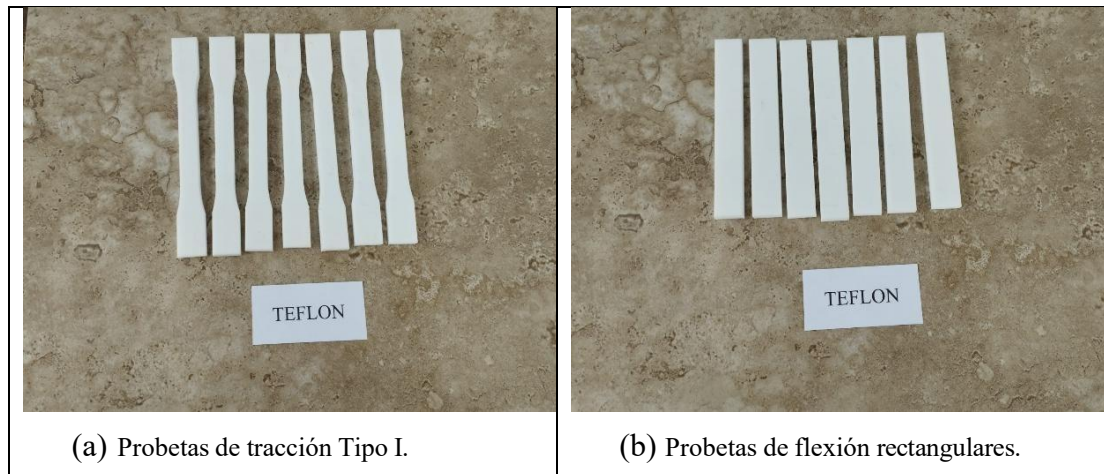


Fig. 47. Probetas del Teflón comercial, después del proceso de corte por chorro de agua: (a) probetas de tracción Tipo I, (b) probetas de flexión rectangulares. Fuente: Elaboración propia.

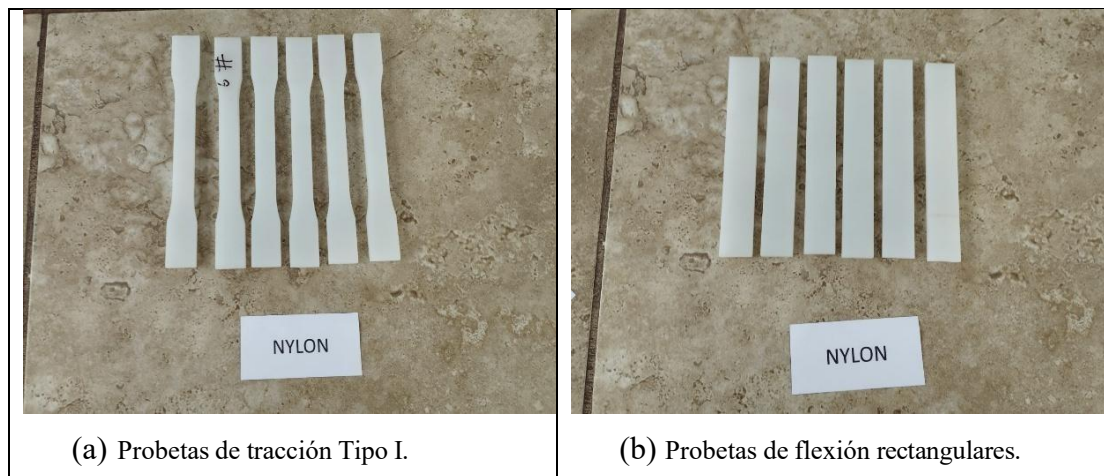
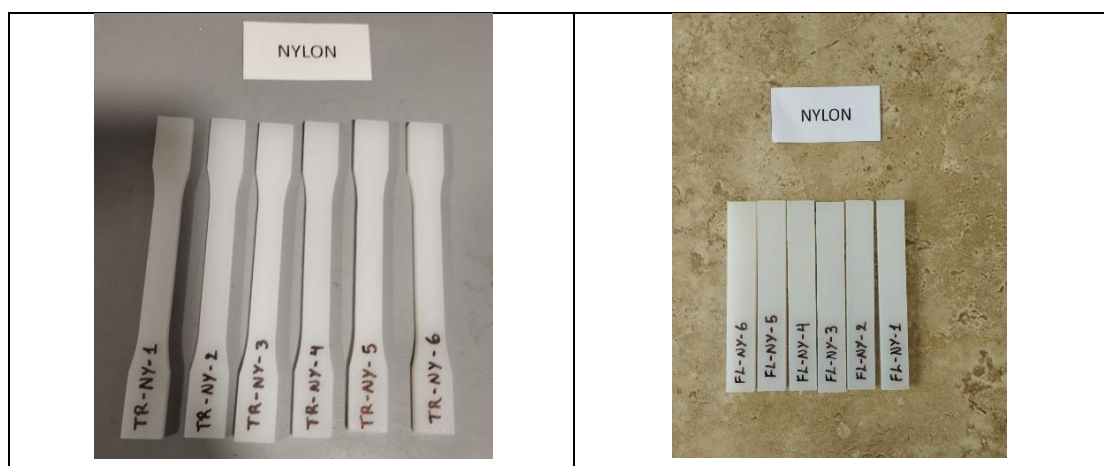


Fig. 48. Probetas del Nylon comercial, después del proceso de corte por chorro de agua: (a) probetas de tracción Tipo I, (b) probetas de flexión rectangulares. Fuente: Elaboración propia.

Identificación y marcado de probetas

Cada probeta fue identificada con el nombre del material y su número para garantizar la trazabilidad durante los ensayos y evitar confusiones entre los especímenes.



(a) Marcado de probetas de Nylon comercial de tracción Tipo I (TR-NY-1) al (TR-NY-6).	(b) Marcado de probetas de Nylon comercial de flexión rectangulares (FL-NY-1) al (FL-NY-6).
---	---

Fig. 49. Probetas de Nylon comercial identificadas con el código de ensayo, material y número de probeta.

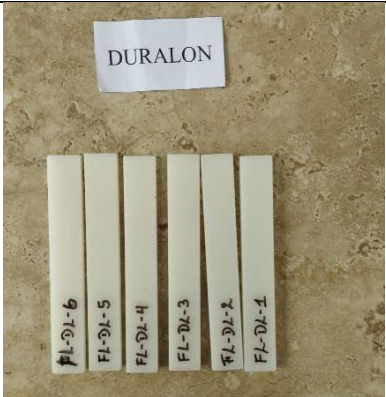
 <p>(a) Marcado de probetas de Duralón comercial de tracción Tipo I: (TR-DL-1) al (TR-DL-6).</p>	 <p>(b) Marcado de probetas de Duralón comercial de flexión rectangulares (FL-DL-1) al (FL-DL-6).</p>
---	---

Fig. 50. Probetas de Duralón comercial identificadas con el código de ensayo, material y número de probeta.

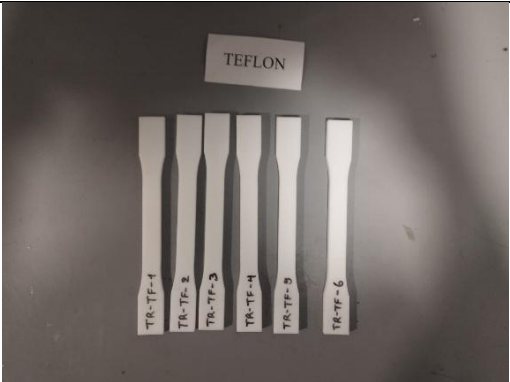
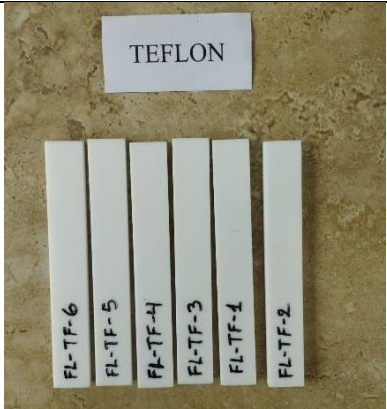
 <p>(a) Marcado de probetas de Teflón comercial de tracción Tipo I: (TR-TF-1) al (TR-TF-6).</p>	 <p>(a) Marcado de probetas de Teflón comercial de flexión rectangulares (FL-TF-1) al (FL-TF-6).</p>
--	--

Fig. 51. Probetas de Teflón comercial identificadas abreviando el nombre del ensayo, el nombre del material y número de probeta para su trazabilidad durante los ensayos.

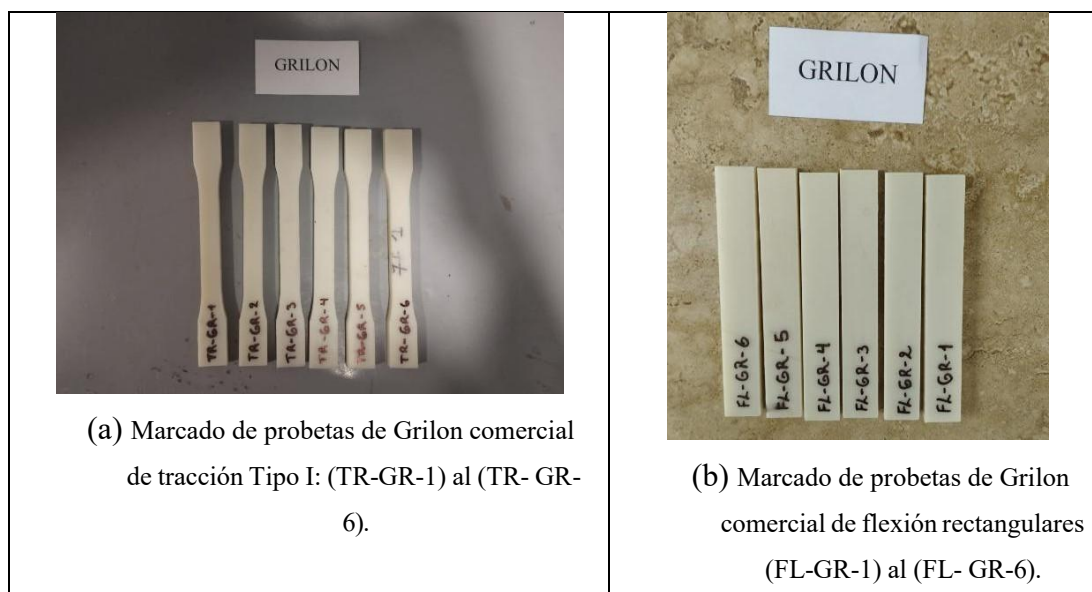


Fig. 52. Probetas de Grilon comercial identificadas abreviando el nombre del ensayo, el nombre del material y número de probeta para su trazabilidad durante los ensayos.

Medición dimensional de probetas

Se midió el ancho y el espesor de la sección calibrada de cada probeta con el calibrador pie de rey digital Tronic Digital Caliper (resolución 0,01 mm), conforme a la norma ASTM D5947-24 [36]. Los resultados de la medición dimensional se presentan en el Capítulo 3.

Acondicionamiento de probetas

Las probetas fueron acondicionadas durante 70 horas en el Laboratorio de Ensayos de Materiales del CIDIIE de la Universidad Central del Ecuador, bajo condiciones ambientales aproximadas de 23,6 °C y 50 % de humedad relativa. Este procedimiento fue necesario debido a que el proceso de corte por chorro de agua expone las probetas a humedad directa y porque las poliamidas comerciales, como Grilon y Nylon, son sensibles a la absorción de humedad, condición que puede modificar sus propiedades mecánicas, lo cual afecta sus propiedades mecánicas, tal como documentaron Pivdiablyk et al. [11] y Pliz et al. [20] en el Capítulo 1.



Fig. 53. Monitoreo de temperatura en el laboratorio. Fuente: Elaboración propia.



Fig. 54. Control de temperatura durante el ensayo en el laboratorio. Fuente: Elaboración propia.

Configuración de la Máquina Universal de Ensayos Shimadzu AGS-X

Se configuraron los parámetros de ensayo en el software Trapezium X de Shimadzu, según lo establecido por las normas ASTM D638-22 y ASTM D790-25. Las velocidades se establecieron conforme a la norma ASTM D638-22 para probetas Tipo I (50 mm/min), garantizando que el tiempo total del ensayo no excediera los 5 minutos en todos los materiales, conforme al criterio establecido por la norma. Las velocidades específicas aplicadas a cada material se detallan en la Tabla XIV. Para los ensayos de tracción se estableció una velocidad de 50 mm/min y para los de flexión una velocidad de 2,56 mm/min, excepto para el Teflón, que se estableció una velocidad de 25,6

mm/min, correspondiente a una tasa de deformación en la fibra extrema de 0,01 mm/mm/min para los demás materiales y de 0,10 mm/mm/min para el Teflón, con probetas de 6 mm de espesor y luz entre apoyos de 96 mm.

TABLA XV. Velocidades de ensayo aplicadas por material

Material	Ensayo	Velocidad (mm/min)	Procedimiento y Tiempo aprox.
Duralón	Tracción	50	≤ 5 min
Grilon	Tracción	50	≤ 5 min
Teflón	Tracción	50	≤ 5 min
Nylon	Tracción	50	≤ 5 min
Duralón	Flexión	2,56	Procedimiento A
Grilon	Flexión	2,56	Procedimiento A
Nylon	Flexión	2,56	Procedimiento A
Teflón	Flexión	25,6	Procedimiento B

En los ensayos de flexión, el Teflón comercial se evaluó a una velocidad diferente respecto a los demás materiales debido a su elevada deformabilidad y a la necesidad de completar el ensayo bajo una condición operativa adecuada. Por esta razón, sus resultados de flexión se interpretan como caracterización individual bajo el procedimiento aplicado y no como comparación estrictamente equivalente frente a los materiales ensayados a 2,56 mm/min.

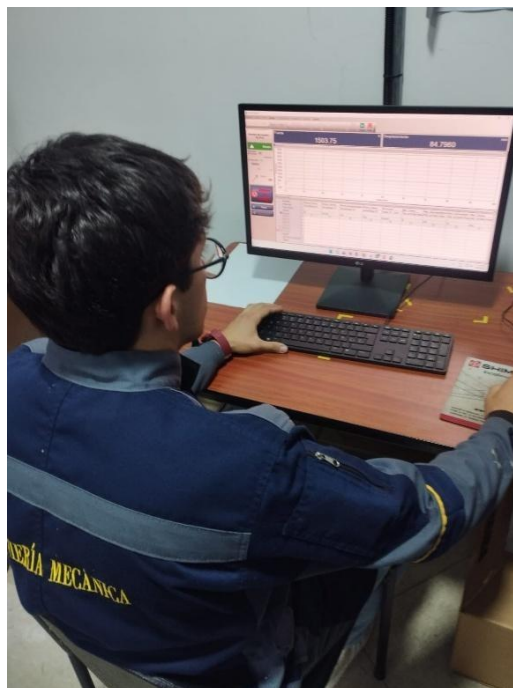


Fig. 55. Configuración de los parámetros de ensayo en el software Trapezium X.



Fig. 56. Control de los parámetros de velocidad en la máquina Shimadzu AGS-X.

Justificación de la norma ASTM D638-22 para ensayos de tracción

La norma ASTM D638-22 fue seleccionada para la caracterización mecánica a tracción de los materiales poliméricos comerciales Duralón, Grilon, Teflón y Nylon comerciales, dado que es el estándar internacional específicamente diseñado para la

determinación de las propiedades mecánicas en tracción de plásticos en su estado no reforzado, condición que corresponde a los materiales estudiados. Esta norma define la geometría de las probetas Tipo I, la velocidad de ensayo (50 mm/min) y los métodos de cálculo de la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad y la elongación a la rotura. La compatibilidad entre los resultados de ASTM D638 e ISO 527 ha sido confirmada en la literatura [13], lo que permite comparar los resultados con estudios internacionales.

Ejecución de ensayos de tracción

Se realizaron los ensayos de tracción de las 6 probetas de cada material según la norma ASTM D638-22, sujetando cada probeta en las mordazas de la Shimadzu AGS-X y registrando las curvas fuerza-desplazamiento con el software Trapezium X. Las dimensiones de la sección transversal de la probeta Tipo I son las siguientes:

$$\text{Área de sección calibrada} = W \times T$$

$$A = 13.5 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$$

$$A = 81 \text{ mm}^2$$

$$\text{Volumen de la sección calibrada} = A \times L$$

$$V = 81 \text{ mm}^2 \times 57 \text{ mm}$$

$$V = 4617 \text{ mm}^3$$

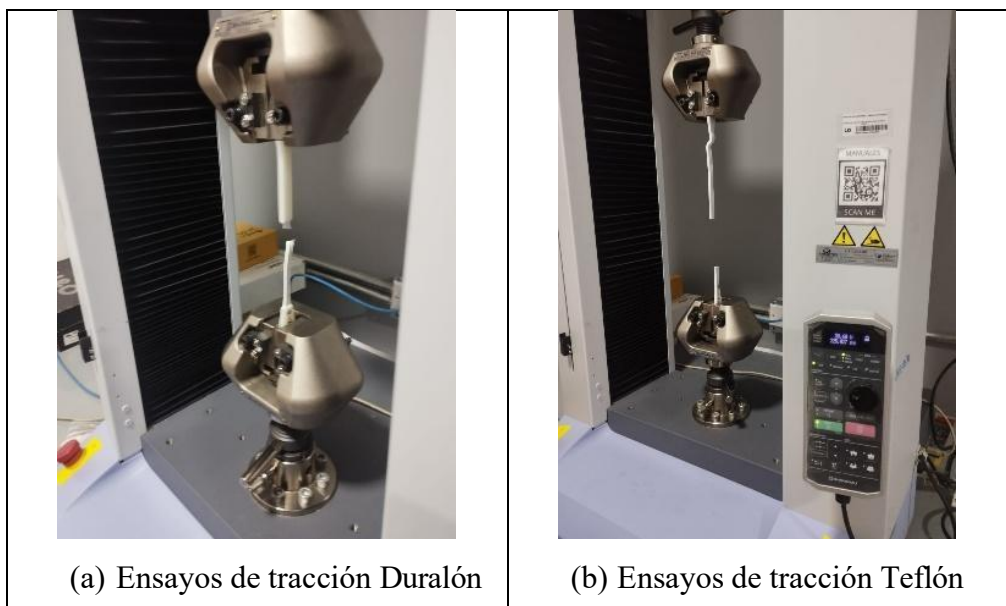


Fig. 57. Ejecución de los ensayos de tracción: (a) Duralón comercial, (b) Teflón comercial.

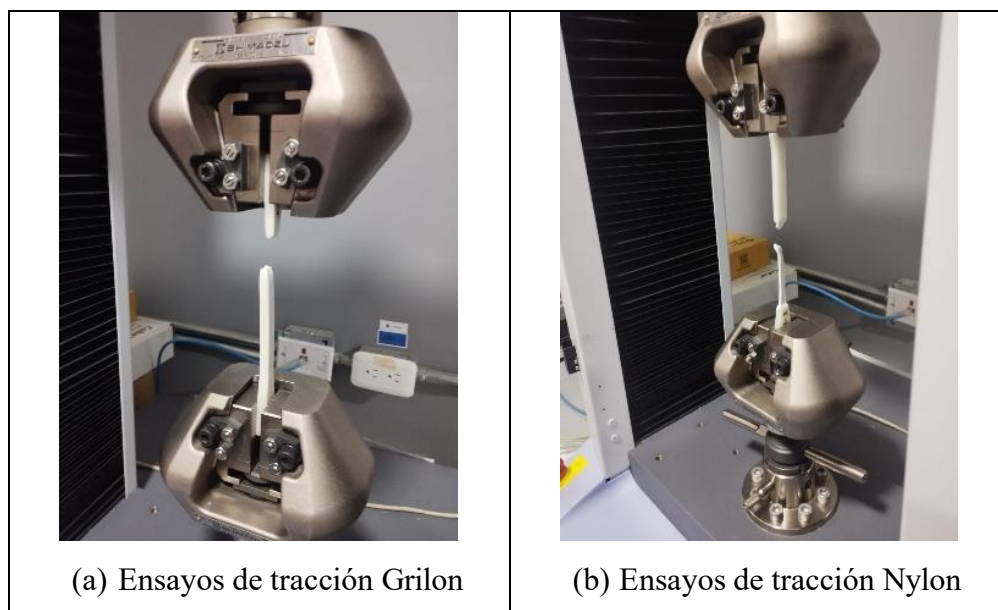


Fig. 58. Ejecución de los ensayos de tracción: (a) Grilon comercial, (b) Nylon comercial.

Justificación de la norma ASTM D790-25 para ensayos de flexión

La norma ASTM D790-25 fue seleccionada para los ensayos de flexión por ser el estándar internacional para plásticos no reforzados, como se indicó en la sección 2.2. El ensayo se realizó bajo la configuración de flexión en tres puntos con viga simplemente apoyada y carga central. Para el Duralón, el Grilon y el Nylon se aplicó el Procedimiento A 2,56 mm/min. Para el Teflón se aplicó el Procedimiento B a 25,6 mm/min, puesto que su alta elongación impide la fractura bajo el Procedimiento A en un tiempo razonable. Se estableció una relación luz entre apoyos y espesor de 16:1 para probetas de 6 mm, resultando en una luz entre apoyos de 96 mm. Esta relación garantiza que el modo de falla predominante sea la flexión pura, descartando la influencia del esfuerzo cortante. La compatibilidad entre ASTM D790 e ISO 178 ha sido confirmada en la literatura [30].

Ejecución de ensayos de flexión

Se realizaron los ensayos de flexión en tres puntos sobre las 6 probetas de cada material según la norma ASTM D790-25. Cada probeta se colocó sobre los apoyos del accesorio de flexión de la Shimadzu AGS-X, con luz entre apoyos de 96 mm, y se registraron las curvas fuerza-deflexión con el software Trapezium X. Las dimensiones de la sección transversal de la probeta rectangular de flexión son:

Área de la sección transversal = $b \times d$

$$A = 19 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$$

$$A = 114 \text{ mm}^2$$

Volumen de la probeta = $A \times L$

$$V = 114 \text{ mm}^2 \times 130 \text{ mm}$$

$$V = 14820 \text{ mm}^3$$

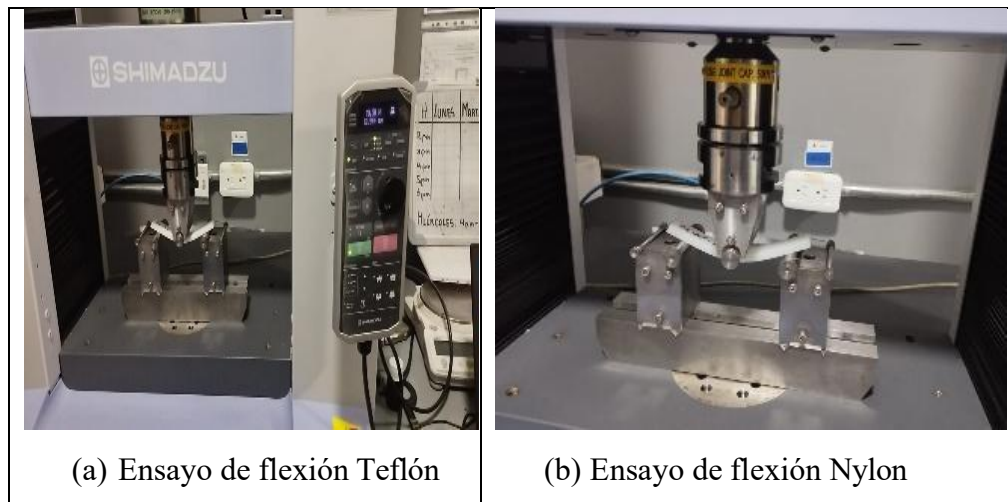


Fig. 59. Ejecución de los ensayos de flexión en tres puntos: (a) Teflón comercial , (b) Nylon comercial

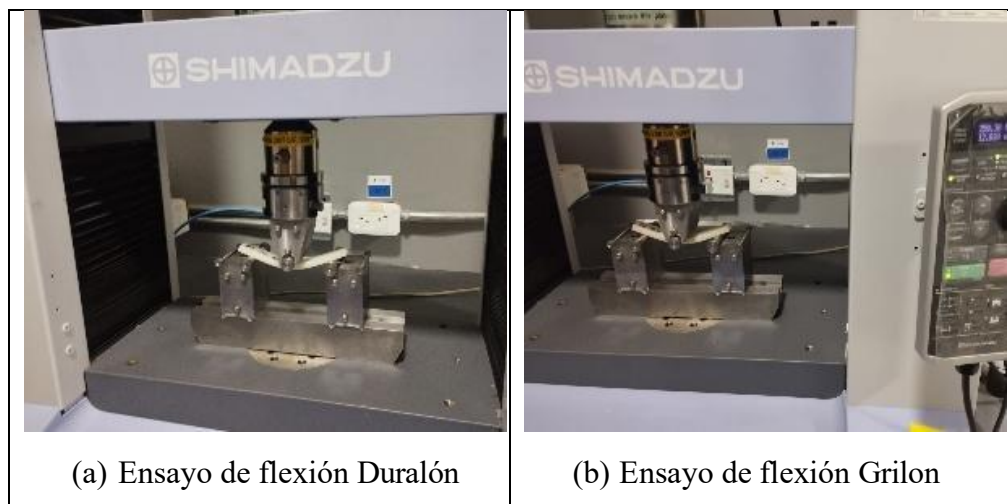


Fig. 60. Ejecución de los ensayos de flexión en tres puntos: (a) Duralón comercial, (b) Grilon comercial.

Registro de datos

Las curvas fuerza-desplazamiento generadas por el software Trapezium X fueron registradas sistemáticamente para su posterior procesamiento. A partir de estas curvas se calcularon las propiedades mecánicas de cada material utilizando las ecuaciones 1 a 9 descritas en el Capítulo 1 de la presente investigación, aplicando el análisis estadístico descrito en la sección 2.7.

Análisis estadístico

El análisis estadístico de los resultados experimentales se realizó utilizando las siguientes medidas:

a) Estadísticos descriptivos:

- Media aritmética ($\bar{x}$)
- Desviación estándar (σ)
- Coeficiente de variación (CV)
- Intervalo de confianza al 95% (IC 95%) calculado mediante la distribución t-Student, considerando el tamaño muestral ($n = 6$ probetas por material por ensayo).

Intervalo de Confianza al 95% (IC 95%):

El intervalo de confianza al 95% se calculó aplicando la distribución t de Student, dado el tamaño muestral ($n = 6$ probetas por material), mediante la siguiente expresión:

$$IC\ 95\% = \bar{x} \pm t\left(\frac{\alpha}{2}, n-1\right) * \left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right) \quad (10)$$

Donde:

$\bar{x}$ = media aritmética muestral

$t(\alpha/2, n-1)$ = valor crítico de la distribución t de Student

s = desviación estándar muestral

n = tamaño de la muestra

TABLA XVI. Parámetros empleados para el cálculo del intervalo de confianza al 95 %.

Parámetro	Símbolo	Valor empleado	Justificación
Número de probetas ensayadas por grupo	n	6	Se ensayaron seis probetas válidas por material y por tipo de ensayo.
Grados de libertad	$gl = n - 1$	5	Para el intervalo de confianza de la media con desviación estándar muestral se emplean $n - 1$ grados de libertad.
Nivel de confianza	$1 - \alpha$	95 %	Se adoptó un nivel de confianza del 95 % para estimar el rango probable de la media experimental.
Nivel de significancia	α	0,05	Corresponde al complemento del nivel de confianza: $\alpha = 1 - 0,95$.
Distribución empleada	t de Student	-	Se utilizó debido al tamaño muestral reducido y a que la desviación estándar poblacional es desconocida.
Valor crítico	$t_{0,975;5}$	2,571	Valor obtenido de la t de Student para un intervalo bilateral del 95 % con 5 grados de libertad.
Fórmula aplicada	IC95 %	$\bar{x} \pm t \cdot s / \sqrt{n}$	Permite calcular el intervalo de confianza de la media muestral.

Fuente: Elaboración Propia

Para $n = 6$ (5 grados de libertad) y $\alpha = 0,05$, el valor crítico t es 2,571. El IC 95% representa el rango de valores dentro del cual se espera que se encuentre la media real de la población, con un nivel de confianza del 95%.

b) Prueba de hipótesis:

Para validar la hipótesis planteada, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor, con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las propiedades mecánicas de tracción y flexión de los cuatro materiales poliméricos comerciales evaluados.

2.2.6 Variables respuesta o resultados esperados

Con base en la revisión bibliográfica del Capítulo 1, se establecen los siguientes resultados esperados para cada material bajo condiciones normalizadas ASTM D638-22 y ASTM D790-25.

TABLA XVII. Variables respuesta y resultados esperados.

Ensayo	Variable respuesta	Unidad	Duralón comercial	Grilon comercial	Teflón comercial	Nylon comercial
Tracción	Resistencia a la tracción	MPa	60 – 70	70 – 85	14 – 35	75 – 85
Tracción	Módulo de elasticidad	GPa	2.8 – 3.2	2.5 – 3.3	0.4 – 0.7	2.8 – 3.3
Tracción	Elongación a la rotura	%	15 – 40	≥ 50	200 – 400	300
Flexión	Resistencia a la flexión	MPa	83 – 100	85 – 110	11 – 24	100 – 120
Flexión	Módulo flexural	GPa	2.6 – 3.5	2.5 – 3.5	0.5 – 0.7	2.8 – 3.5

Fuente: Elaborado con base en [2], [3], [8], [15], [18], [21].

Los valores de la Tabla XVI corresponden a datos reportados en la literatura científica internacional bajo condiciones de ensayo similares. Se esperan variaciones entre los valores experimentales y los de referencia, dado que los materiales fueron adquiridos comercialmente y sus propiedades pueden diferir de las reportadas internacionalmente debido a factores como proveedor, lote y proceso de fabricación. Esta diferencia es precisamente una de las contribuciones del presente trabajo.

Se espera que el Teflón comercial presente los valores más bajos de resistencia mecánica y la mayor elongación a la rotura. Los demás materiales presentarán propiedades diferenciadas que serán determinadas experimentalmente.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis y discusión de los resultados.

Este capítulo presenta los resultados de los ensayos de tracción y flexión realizados sobre los cuatro materiales poliméricos comerciales (Duralón, Grilon, Teflón y Nylon), adquiridos en el mercado ecuatoriano. Los resultados se presentan siguiendo el orden de los objetivos específicos: primero los ensayos de tracción, luego los de flexión y finalmente un análisis comparativo entre los cuatro materiales.

Cada sección presenta el informe de laboratorio con los datos de la Shimadzu AGS-X procesados en Trapezium X, la verificación de cálculos mediante las ecuaciones ASTM descritas en el Capítulo 1, el análisis técnico de las curvas obtenidas y la comparación con valores reportados en la literatura.

Los resultados obtenidos constituyen una base experimental local de referencia para los materiales poliméricos comerciales evaluados en este estudio. Estos datos corresponden exclusivamente a los lotes, geometrías, condiciones de acondicionamiento y parámetros de ensayo aplicados, por lo que no deben generalizarse a todos los materiales disponibles en el mercado. La comparación con fichas técnicas y literatura se realiza únicamente con fines referenciales, debido a que dichas fuentes pueden corresponder a otros grados comerciales, proveedores, presentaciones, procesos de fabricación o condiciones de ensayo.

3.1.1 Justificación de la norma ASTM D638-22

La norma ASTM D638-22 rige los ensayos de tracción de esta investigación por ser el estándar internacional específico para plásticos no reforzados.

Los ensayos se realizaron a 50 mm/min, conforme a la Tabla 1 de la norma ASTM D638-22, para que el tiempo de ensayo no superara los 5 minutos por probeta. Se fabricaron probetas Tipo I con las siguientes dimensiones: 165 mm de longitud total, 13,5 mm de ancho en la sección calibrada, 6 mm de espesor, 57 mm de longitud calibrada y radio de curvatura de 76 mm. Las probetas se obtuvieron de las planchas comerciales, mediante corte por chorro de agua en ALUVID GLASS CIA. LTDA.

Cálculo de área de probetas de tracción

A continuación, se calcula el área de la sección transversal de la zona calibrada, con las dimensiones reales medidas con el calibrador Tronic Digital Caliper (resolución 0,01 mm):

"El área de la sección transversal original de la probeta de tracción se calcula como el producto del ancho (W) por el espesor (T) de la sección calibrada, conforme a la norma ASTM D638-22:

$$A = W * T$$

$$A = 13,5 \text{ mm} * 6 \text{ mm}$$

$$A = 81 \text{ mm}^2$$

3.1.2 Ensayo de tracción

La máquina universal utilizada no contó con extensómetro para la medición directa de deformación. Por esta razón, el porcentaje de elongación fue determinado mediante medición de la longitud calibrada antes y después del ensayo, conforme al procedimiento permitido por ASTM D638. Esta condición puede introducir una incertidumbre mayor que la obtenida mediante extensometría electrónica y se reconoce como una limitación del estudio.

Duralón comercial

En la Tabla XVII se presentan los resultados del ensayo de tracción de las seis probetas del Duralón comercial obtenidos mediante la Máquina Universal de Ensayos Shimadzu AGS-X y procesados por el software Trapezium X.

TABLA XVIII. Resultados del ensayo de tracción: Duralón comercial.

Probeta	W (mm)	T (mm)	A (mm ²)	F_mas (N)	Sut (MPa)	Sy (MPa)	E (MPa)	%El (%)
TR-DL-1	13,5	6	81	2296,25	28,35	28,35	1634,10	207,89
TR-DL-2	13,49	6	81	2355,76	29,08	29,08	1624,78	108,84
TR-DL-3	13,48	6	81	2372,17	29,29	29,29	1685,68	63,93

TR-DL-4	13,5	6	81	2358,54	29,12	29,12	1749,53	134,96
TR-DL-5	13,49	6	81	2338,79	28,87	28,87	1708,71	119,04
TR-DL-6	13,49	6	81	2291,68	28,29	28,29	1669,15	176,32
Media			81	2335,53	28,83	28,83	1678,66	135,16
Desviación Estándar				33,93	0,42	0,42	46,81	51,01
IC95%				-	[28,39 - 29,27]	[28,39 - 29,27]	[1629,54 - 1727,78]	[81,64 - 188,68]
Coefficiente de Variación (%)				1,45	1,45	1,45	2,79	37,74

Fuente: Elaboración propia

El intervalo de confianza al 95% de la resistencia a la tracción del Duralón (IC95%: 28,39 - 29,27 MPa) confirma la alta homogeneidad del material comercial, coherente con el CV de 1,45%. El IC95% del módulo de elasticidad (1629,54 - 1727,78 MPa) evidencia una dispersión moderada atribuible a las variaciones microestructurales locales del polioximetileno semicristalino. El amplio IC95% del porcentaje de elongación (81,64 - 188,68%) refleja la variabilidad inherente al fenómeno de cold drawing, donde la longitud del cuello de estiramiento varía entre probetas dependiendo de las condiciones microestructurales locales del material.

Los resultados del Duralón comercial confirman la homogeneidad del material comercial analizado, con un coeficiente de variación de 1,45% en la resistencia a la tracción, valor que valida la confiabilidad del proceso de fabricación por chorro de agua. El Duralón presenta una zona elástica bien definida seguida de una caída pronunciada de fuerza, comportamiento típico del material comercial denominado Duralón. Los valores son comparables con los reportados en [2], [3] para polioximetileno procesado por inyección, con diferencias atribuibles al proceso de fabricación y al origen comercial del material.

Verificación de cálculos:

Se selecciona la probeta TR-DL-4 como representativa del Duralón comercial por presentar los valores más cercanos a la media. Se aplicaron las ecuaciones de la norma ASTM D638-22 descritas en el Capítulo 1:

Cálculo 1: Resistencia ultima a la tracción (Sut)

Aplicando la ecuación 1 del Capítulo 1, la resistencia a la tracción se calcula como el cociente entre la fuerza máxima aplicada y el área de la sección transversal original:

$$\sigma = \frac{F_{max} [N]}{A [mm^2]}$$

$$\sigma = \frac{2358.54 N}{81 mm^2}$$

$$\sigma = 29,12 MPa$$

El valor calculado de 29,12 MPa coincide con el reportado por el software Trapezium X (29,1178 MPa), con una diferencia de 0,0022 MPa equivalente a un error relativo de 0,0075%.

Cálculo 2: Límite de fluencia (Sy)

Para el Duralón comercial el límite de fluencia coincide con la resistencia a la tracción dado que el fenómeno de cold drawing genera una caída inmediata de la fuerza después del pico máximo. En consecuencia:

$$\sigma_y = \frac{F_y [N]}{A [mm^2]}$$

$$\sigma_y = \frac{2358.54 N}{81 mm^2}$$

$$\sigma_y = 29,12 MPa$$

El valor del límite de fluencia coincide con la resistencia a la tracción (Sut=29,12 MPa) validando el comportamiento característico del material comercial denominado Duralón.

Cálculo 3: Módulo de elasticidad (E)

El módulo de elasticidad se determinó como la pendiente de la zona elástica lineal.

$$E = \frac{\Delta\sigma [MPa]}{\Delta\varepsilon [Adimensional]}$$

Donde:

$\Delta\sigma$ = variación de esfuerzo en la zona elástica lineal (MPa)

$\Delta\varepsilon$ = variación de deformación unitaria correspondiente (adimensional)

$$E = 1749.53 \text{ MPa}$$

Este valor fue calculado por el software Trapezium X en el rango de fuerza de 10 a 20 N. Al no utilizarse extensómetro, el módulo reportado es un valor aparente que incluye las deformaciones del sistema de sujeción, con longitud entre mordazas de 115 mm.

Cálculo 4: Porcentaje de elongación (%El)

El porcentaje de elongación se obtuvo midiendo la zona calibrada de 57 mm antes y después del ensayo, uniendo los dos fragmentos fracturados de cada probeta conforme a ASTM D638-22. Los elevados coeficientes de variación responden al comportamiento propio de los polímeros termoplásticos semicristalinos: la elongación final depende tanto de la posición donde ocurre la fractura como del grado de desarrollo del cold drawing en cada probeta, factores que varían de una muestra a otra aún bajo condiciones de ensayo idénticas.

Aplicando la ecuación 3 del Capítulo 1, el porcentaje de elongación se calcula sobre la longitud calibrada de la probeta ($L_o = 57 \text{ mm}$):

$$\%El = \frac{(L_f - L_o)[mm]}{L_o [mm]} * 100$$

$$\%El = \frac{76.93 \text{ mm}}{57 \text{ mm}} * 100$$

$$\%El = 134,96 \%$$

El software Trapezium X reporta un %El = 7,50%, calculado sobre la longitud total de 165 mm, mientras que aplicando la norma ASTM D638-22 sobre la longitud calibrada ($L_o = 57 \text{ mm}$) se obtiene un %El = 134.96%.

22, siendo %El = 134,96% para la probeta TR-DL-4, valor consistente con la media del grupo de 135,16%, diferencia atribuible a la ausencia de extensómetro.

Grilon comercial

En la Tabla XVIII se recogen los resultados del ensayo de tracción del Grilon comercial. A diferencia del Duralón, este material exhibe una zona de fluencia bien definida seguida de una caída pronunciada de fuerza tras el pico máximo, comportamiento característico de las poliamidas de ingeniería.

TABLA XIX. Resultados del ensayo de tracción: Grilon comercial.

Probeta	W (mm)	T (mm)	A (mm ²)	F_max (N)	Sut (MPa)	Sy (MPa)	E (MPa)	%El (%)
TR-GR-1	13.5	6	81	5307.79	65.53	54.55	1932.01	29.96
TR-GR-2	13.5	6	81	5234.94	64.63	53.03	2155.28	32.65
TR-GR-3	13.5	6	81	5222.34	64.47	56.49	2277.17	38.53
TR-GR-4	13.5	6	81	4698.71	58.01	49.84	1617.32	38.63
TR-GR-5	13.5	6	81	4928.01	60.84	51.62	1719.38	37.88
TR-GR-6	13.5	6	81	4558.46	56.28	52.44	1965.30	82.44
Media			81	4991.71	61.63	52.99	1944.41	43.35
Desviación Estándar				313.01	3.87	2.31	250.37	19.48
IC95%				-	[57,57 - 65,69]	[50,57 - 55,42]	[1681,67 - 2207,15]	[22,91 - 63,79]
Coefficiente de Variación (%)				6.27	6.27	4.36	12.87	44,94

Fuente: Elaboración propia.

El intervalo de confianza al 95% de la resistencia a la tracción del Grilon (IC95%: 57,57 - 65,69 MPa) refleja la variabilidad microestructural del material comercial

denominado Grilon, consistente con el CV de 6,27% observado. El IC95% del módulo de elasticidad (1681,67 - 2207,15 MPa) es el más amplio del grupo en tracción, lo que indica que las propiedades de rigidez del Grilon presentan mayor sensibilidad a las condiciones de fabricación comercial de la plancha. El IC95% del porcentaje de elongación (22,91 - 63,79%) refleja la heterogeneidad microestructural propia del Grilon comercial semicristalino y la sensibilidad de este parámetro a la posición de fractura dentro de la zona calibrada.

Los valores de Sut difieren del informe del Trapezium X en un 8,33%, puesto que el software utilizó un área de 87,75 mm² en lugar de 81 mm². Los valores de esta tabla corresponden al cálculo correcto: $A = W \times T = 13,5 \times 6 = 81 \text{ mm}^2$, según ASTM D638-22.

El Grilon comercial presentó la mayor resistencia a la tracción, con una curva fuerza-desplazamiento de perfil dúctil típico de las poliamidas y punto de fluencia bien marcado. La variabilidad del módulo de elasticidad (CV = 12,87%) apunta a que el material comercial denominado Grilon es sensible a las condiciones del proceso de fabricación, lo cual debe considerarse al diseñar componentes que exijan alta rigidez controlada. La probeta TR-GR-6, que registró la mayor elongación del grupo, ilustra la heterogeneidad microestructural propia del Grilon comercial, documentada en [8]. El elevado coeficiente de variación del porcentaje de elongación (CV = 44,94%) refleja la heterogeneidad microestructural del Grilon comercial y la sensibilidad de este parámetro a la posición de fractura dentro de la zona calibrada, característica documentada en materiales poliamídicos ensayados sin extensómetro.

Verificación de cálculos:

Se selecciono la probeta TR-GR-1 como representativa del Grilon comercial y se aplicaron las ecuaciones de la norma ASTM D638-22 descritas en el Capítulo 1:

Cálculo 1: Resistencia a la tracción (Sut)

Se identificó que el software Trapezium X calculó los valores de tensión del Grilon comercial con un área de 87,75 mm² en lugar del área real de 81 mm², generando una diferencia sistemática del 8,33% en todos los valores de tensión. Por esta razón los valores de Sut del Grilon fueron recalculados manualmente aplicando la ecuación 1 del Capítulo 1 con el área correcta de 81 mm²:

$$\sigma = \frac{F_{max} [N]}{A [mm^2]}$$

$$\sigma = \frac{5307.79 N}{81 mm^2}$$

$$\sigma = 65.53 MPa$$

El valor calculado de 65,53 MPa corresponde a la resistencia a la tracción real de la probeta TR-GR-1. El software Trapezium X reporta Max_Tension = 60,4876 MPa con el área nominal utilizada. La diferencia se debe a que el área nominal programada no coincide con el área real medida. El valor correcto según ASTM D638-22 es 65,53 MPa, calculado con el área real.

Cálculo 2: Límite de fluencia (σ_y)

Aplicando la ecuación 2 del Capítulo 1, el límite de fluencia se calcula como el cociente entre la fuerza en el punto de fluencia y el área de la sección transversal original:

$$\sigma_y = \frac{F_y [N]}{A [mm^2]}$$

$$\sigma_y = \frac{4418.35 N}{81 mm^2}$$

$$\sigma_y = 54.55 MPa$$

El valor calculado de 54.55 MPa difiere del reportado por el Trapezium X (50.35 MPa) en 8.33% por el mismo error de área identificado en el cálculo de σ_{ut} . El valor correcto es 54.55 MPa calculado con $A = 81 mm^2$ según ASTM D638-22.

Cálculo 3: Módulo de elasticidad (E)

Aplicando la ecuación 4 del Capítulo 1.

$$E = \frac{\Delta\sigma [MPa]}{\Delta\epsilon [Adimensional]}$$

$$E = 1932.01 MPa$$

Valor calculado por el software Trapezium X en el rango de fuerza de 10 a 20 N.

Cálculo 4: Porcentaje de elongación (%El)

Aplicando la ecuación 3 del Capítulo 1:

$$\%El = \frac{(L_f - L_o) [mm]}{L_o [mm]} * 100$$

$$\%El = \frac{17.08 \text{ mm}}{57 \text{ mm}} * 100$$

$$\%El = 29.96\%$$

El software Trapezium X reporta %El = 24,66% calculado sobre la longitud total de 165 mm. La norma ASTM D638-22 establece que el %Él debe calcularse sobre la longitud calibrada $L_o = 57$ mm. Para el presente informe se adopta el valor medido manualmente sobre la longitud calibrada de 57 mm, siendo %El = 29.96% para la probeta TR-GR-1, valor consistente con la media del grupo de 43.35%.

Teflón comercial

La Tabla XX presenta los resultados del ensayo de tracción del Teflón comercial . Este material muestra un comportamiento mecánico diferente al de los demás: no exhibe un punto de fluencia definido, comportamiento documentado en el Capítulo 1.

TABLA XX. Resultados del ensayo de tracción: Teflón comercial.

Probeta	W (mm)	T (mm)	A (mm ²)	F_max (N)	Sut (MPa)	Sy (MPa)	E (MPa)	%El (%)
TR-TF-1	13.5	6	81	1796.64	22.18	22.18	1026.46	201.75
TR-TF-2	13.5	6	81	1797.01	22.19	22.19	1063.65	170.53
TR-TF-3	13.5	6	81	1928.99	23.81	23.81	1053.87	223.68
TR-TF-4	13.5	6	81	1720.07	21.24	21.24	1034.34	141.25
TR-TF-5	13.5	6	81	1866.97	23.05	23.05	1134.88	110.77

TR-TF-6	13.5	6	81	1748.92	21.59	21.59	1061.48	180.88
Media			81	1809.77	22.34	22.34	1062.45	171.48
Desviación Estándar				76.90	0.95	0.95	38.49	40.82
IC95%				-	[21,34 - 23,34]	[21,34 - 23,34]	[1022,05 - 1102,85]	[128,64 - 214,32]
Coefficiente de Variación (%)				4.25	4.25	4.25	3.62	23.80

Fuente: Elaboración propia.

Para el Teflón comercial no se identificó un punto de fluencia definido en la curva fuerza-desplazamiento. Por tanto, el valor reportado en la columna S_y corresponde al esfuerzo máximo alcanzado durante el ensayo y se incluye únicamente para mantener la estructura comparativa de la tabla; no debe interpretarse como un límite de fluencia convencional.

El intervalo de confianza al 95% de la resistencia a la tracción del Teflón (IC95%: 21,34 - 23,34 MPa) indica una dispersión moderada y consistente entre probetas, coherente con el CV de 4,25%. El IC95% del módulo de elasticidad (1022,05 - 1102,85 MPa) confirma la baja rigidez característica del Teflón comercial dentro del grupo ensayado. El IC95% del porcentaje de elongación (128,64 - 214,32%) refleja la variabilidad asociada a las transiciones de fase cristalina del Teflón comercial durante el estiramiento, que determinan el punto de fractura de cada probeta.

El Teflón comercial presenta el comportamiento mecánico más diferenciado del grupo, con una deformación promedio de 171.48% medida manualmente sobre la longitud calibrada de 57 mm según ASTM D638-22, confirmando su clasificación como material blando y altamente elástico. Este valor es el más alto de los cuatro materiales ensayados evidenciando la excepcional ductilidad característica del Politetrafluoroetileno [34]. La dispersión en el porcentaje de elongación (CV = 23.80%) es consistente con el mecanismo de transición de fase cristalina del Politetrafluoroetileno durante el estiramiento [16], que genera variabilidad en el punto de fractura dependiendo de la orientación molecular local de cada probeta. La ausencia

de punto de fluencia definido implica que este material no puede dimensionarse con criterios convencionales de S_y , debiendo emplearse criterios de porcentaje de elongación admisible para su aplicación en sellos, juntas y componentes mecánicos.

Verificación de cálculos:

Se selecciona la probeta TR-TF-2 como representativa del Teflón comercial . Se aplican las ecuaciones establecidas en la norma ASTM D638-22 y descritas en el Capítulo 1:

Cálculo 1: Resistencia a la tracción (S_u)

Aplicando la ecuación 1 del Capítulo 1, la resistencia a la tracción se calcula como el cociente entre la fuerza máxima aplicada y el área de la sección transversal original:

$$\sigma = \frac{F_{max} [N]}{A [mm^2]}$$

$$\sigma = \frac{1797.01 N}{81 mm^2}$$

$$\sigma = 22.19 MPa$$

El valor calculado de 22.19 MPa coincide exactamente con el reportado por el software Trapezium X de 22.1853 MPa, validando el proceso de cálculo con un error relativo de 0.02%.

Cálculo 2: Límite de fluencia (S_y)

Aplicando la ecuación 2 del Capítulo 1, el límite de fluencia se calcula como el cociente entre la fuerza en el punto de fluencia y el área de la sección transversal original:

$$\sigma_y = \frac{F_y [N]}{A [mm^2]}$$

$$\sigma_y = \frac{1797.01 N}{81 mm^2}$$

$$\sigma_y = 22.19 MPa$$

fluencia convencional; para fines de comparación tabular se reportó el esfuerzo máximo alcanzado.

Cálculo 3: Módulo de elasticidad (E)

Aplicando la ecuación 4 del Capítulo 1.

$$E = \frac{\Delta\sigma [MPa]}{\Delta\varepsilon [Adimensional]}$$

$$E = 1063.65 \text{ MPa}$$

El Teflón comercial presenta el menor módulo de elasticidad de los cuatro materiales ensayados, confirmando su comportamiento como material blando y altamente deformable, tal como documentaron Mazur et al. [15] y Luo et al. [16] en el Capítulo 1.

Cálculo 4: Porcentaje de elongación(%El)

Aplicando la ecuación 3 del Capítulo 1.

$$\%El = \frac{(Lf - Lo)[mm]}{Lo [mm]} * 100$$

$$\%El = \frac{97.20 \text{ mm}}{57 \text{ mm}} * 100$$

$$\%El = 170.53\%$$

El software Trapezium X reporta un %El = 178,28%, calculado sobre la longitud total de la probeta de 165 mm, valor que difiere del obtenido mediante la norma ASTM D638-22, cuya longitud calibrada $Lo = 57 \text{ mm}$ arroja un %El = 170,53% medido manualmente. Para el presente informe se adopta el valor medido manualmente sobre la longitud calibrada de 57 mm según ASTM D638-22, siendo %El = 170,53% para la probeta TR-TF-2, valor consistente con la media del grupo de 171,48%.

Nylon comercial

En la Tabla XX se presentan los resultados del ensayo de tracción de las seis probetas del Nylon comercial . Este material presenta un comportamiento similar al Grilon

comercial con un pico de fuerza máxima seguido de una zona de fluencia pronunciada, pero con valores de resistencia inferiores al Grilon comercial , posicionándose como el segundo material más resistente del grupo ensayado.

TABLA XXI. Resultados del ensayo de tracción: Nylon comercial .

Probeta	W (mm)	T (mm)	A (mm²)	F_max (N)	Sut (MPa)	Sy (MPa)	E (MPa)	%El (%)
TR-NY-1	13.5	6	81	3947.64	48.74	38.86	1451.42	58.86
TR-NY-2	13.5	6	81	3978.47	49.12	39.03	1412.15	107.77
TR-NY-3	13.5	6	81	4008.35	49.49	33.37	1493.76	45.19
TR-NY-4	13.5	6	81	4113.21	50.78	40.04	1491.03	59.88
TR-NY-5	13.5	6	81	4188.11	51.71	38.78	1548.17	61.46
TR-NY-6	13.5	6	81	3914.08	48.32	38.03	1407.03	70.39
Media			81	4024.98	49.69	38.02	1467.26	67.26
Desviación Estándar				104.99	1.30	2.37	54.28	21.43
IC95%				-	[48,33 - 51,05]	[35,53 - 40,05]	[1410,29 - 1524,23]	[44,77 - 89,75]
Coefficiente de Variación (%)				2.61	2.61	6.23	3.70	31.86

Fuente: Elaboración propia.

El intervalo de confianza al 95% de la resistencia a la tracción del Nylon (IC95%: 48,33 - 51,05 MPa) es el más estrecho del grupo en tracción, confirmando que el Nylon comercial es el material con mayor predictibilidad mecánica de los cuatro ensayados. El IC95% del módulo de elasticidad (1410,29 - 1524,23 MPa) refuerza esta característica, con una amplitud de apenas 113,94 MPa. El IC95% del porcentaje de elongación (44,77 - 89,75%) es coherente con el CV de 31,86% y la variabilidad propia de las poliamidas ensayadas sin extensómetro.

El Nylon comercial demuestra ser el material con mayor consistencia y reproducibilidad del grupo ensayado, con los coeficientes de variación más bajos en resistencia a la tracción (2.61%) y módulo de elasticidad (3.70%), características que lo posicionan como el material de mayor predictibilidad mecánica para el diseño de componentes en la industria ecuatoriana. Su comportamiento en la curva fuerza-desplazamiento es similar al del Grilon comercial con un punto de fluencia claramente definido, pero con una resistencia inferior que refleja las diferencias estructurales entre ambas poliamidas documentadas [18], [21] en el Capítulo 1. Esta predictibilidad mecánica explica su amplia aplicación en engranajes, palancas y conectores estructurales de la industria carrocera de Tungurahua.

Verificación de cálculos:

Se selecciona la probeta TR-NY-4 como representativa del Nylon comercial . Se aplican las ecuaciones establecidas en la norma ASTM D638-22 y descritas en el Capítulo 1:

Cálculo 1: Resistencia a la tracción (Sut)

Aplicando la ecuación 1 del Capítulo 1, la resistencia a la tracción se calcula como el cociente entre la fuerza máxima aplicada y el área de la sección transversal original:

$$\sigma = \frac{F_{max} [N]}{A [mm^2]}$$

$$\sigma = \frac{4113.21 N}{81 mm^2}$$

$$\sigma = 50.78 MPa$$

El valor calculado de 50.78 MPa coincide con el reportado por el software Trapezium X de 50.7803 MPa, validando el proceso de cálculo con un error relativo de 0.0006%.

Cálculo 2: Límite de fluencia (Sy)

Aplicando la ecuación 2 del Capítulo 1, el límite de fluencia se calcula como el cociente entre la fuerza en el punto de fluencia y el área de la sección transversal original:

$$\sigma_y = \frac{F_y [N]}{A [mm^2]}$$

$$\sigma_y = \frac{3243.36 \text{ N}}{81 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_y = 40.04 \text{ MPa}$$

El valor calculado de 40.04 MPa coincide exactamente con el reportado por el software Trapezium X de 40.0415 MPa, validando el proceso de cálculo con un error relativo de 0.004%.

Cálculo 3: Módulo de elasticidad (E)

Aplicando la ecuación 4 del Capítulo 1.

$$E = \frac{\Delta\sigma [MPa]}{\Delta\varepsilon [Adimensional]}$$

$$E = 1491.03 \text{ MPa}$$

$$E = 1.491 \text{ GPa}$$

El módulo de elasticidad del Nylon comercial es superior al del Teflón comercial, posicionándolo como un material de rigidez intermedia dentro del grupo ensayado.

Cálculo 4: Porcentaje de elongación(%El)

Aplicando la ecuación 3 del Capítulo 1

$$\%El = \frac{(L_f - L_o) [mm]}{L_o [mm]} * 100$$

$$\%El = \frac{34.13 \text{ mm}}{57 \text{ mm}} * 100$$

$$\%El = 59.88 \%$$

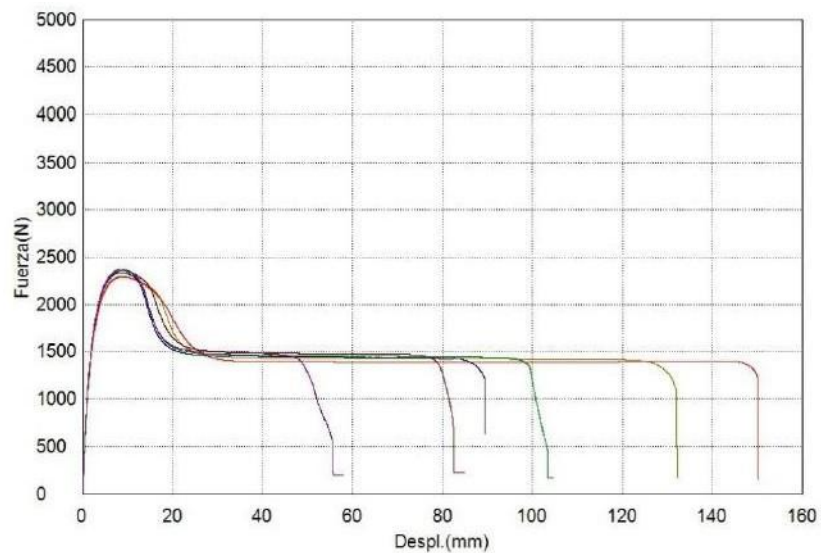
El software Trapezium X reportó un valor de elongación calculado. Para el presente informe se adoptó el valor obtenido mediante medición manual sobre la longitud calibrada de 57 mm, conforme al procedimiento descrito en la metodología. La

elongación calculado fue de 59,88 %, valor consistente con la media del grupo de 67,26 %.

3.1.3 Análisis de las curvas fuerza-desplazamiento

A continuación se analizan las curvas fuerza-desplazamiento obtenidas del software Trapezium X para cada material, identificando las regiones características del comportamiento mecánico bajo tracción. Comprender estas regiones permite establecer el mecanismo de deformación y fractura de cada polímero, información clave para su selección y dimensionamiento en componentes de la industria ecuatoriana.

Curva fuerza-desplazamiento: Duralón comercial



Curva esfuerzo – deformación: Duralón comercial

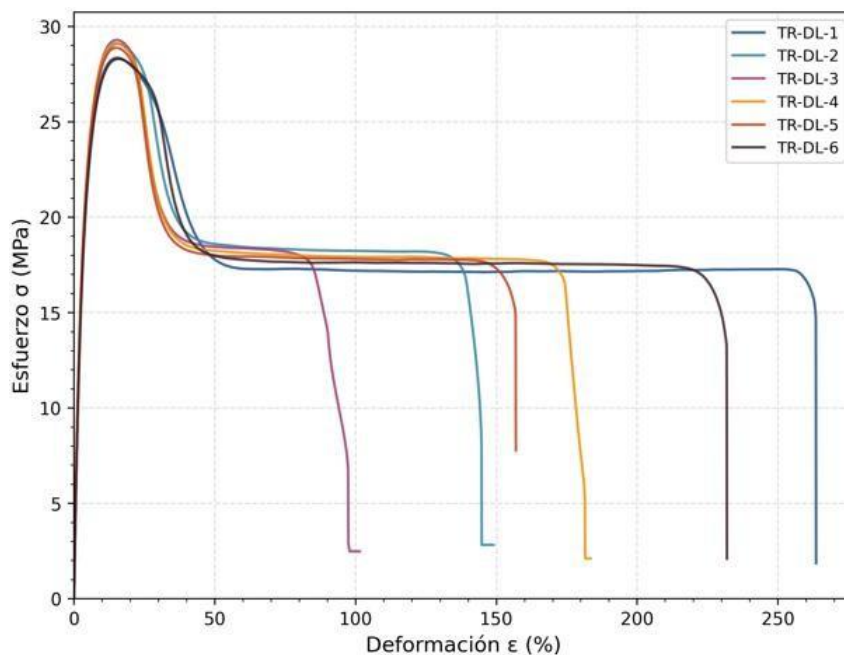


Fig. 61. Curva fuerza-desplazamiento y esfuerzo-deformación de las seis probetas del Duralón comercial obtenida del ensayo de tracción ASTM D638-22.

La curva fuerza-desplazamiento del Duralón comercial presentada en la Figura 60 muestra cuatro regiones bien definidas que caracterizan el comportamiento mecánico de este material:

Región I : Zona elástica lineal (0 a 5 mm)

En esta región la fuerza aumenta de forma lineal y proporcional al desplazamiento. La deformación es completamente recuperable al retirar la carga. La pendiente de esta zona corresponde al módulo de elasticidad del material con un valor promedio de 1678.66 MPa. Esta región es la de mayor importancia para el diseño de componentes mecánicos ya que define el comportamiento en servicio normal.

Región II: Límite de fluencia y punto máximo (5 a 10 mm)

La curva alcanza su punto máximo de fuerza en esta región con un valor promedio de 2335.53 N correspondiente a una resistencia a la tracción de 28.83 MPa. A partir de este punto la curva comienza a descender indicando que el material ha superado su límite elástico y comienza a deformarse plásticamente. Este punto corresponde simultáneamente al límite de fluencia y a la resistencia máxima del Duralón, comportamiento típico del polioximetileno semicristalino.

Región III: Zona de fluencia estable (10 a 100 mm)

Tras el pico máximo, la fuerza cae y se estabiliza en torno a 1400 N, manteniéndose prácticamente constante a lo largo de un amplio rango de desplazamiento. Esta región corresponde al cold drawing o estiramiento en frío, fenómeno en el que las cadenas poliméricas del polioximetileno se orientan en la dirección de carga y generan un cuello visible en la probeta. Dicho comportamiento es propio del Duralón comercial y explica su capacidad de absorber energía antes de alcanzar la fractura.

Región IV: Fractura (variable entre 55 y 150 mm)

La fractura se produce de forma súbita con una caída vertical de la fuerza. La variabilidad en el desplazamiento de fractura entre probetas, que oscila entre 55 y 150 mm, responde a las diferencias en las condiciones microestructurales locales del Duralón semicristalino, las cuales determinan la longitud del cuello desarrollado en cada probeta. La superficie de fractura resultante es de tipo dúctil con textura fibrosa visible.

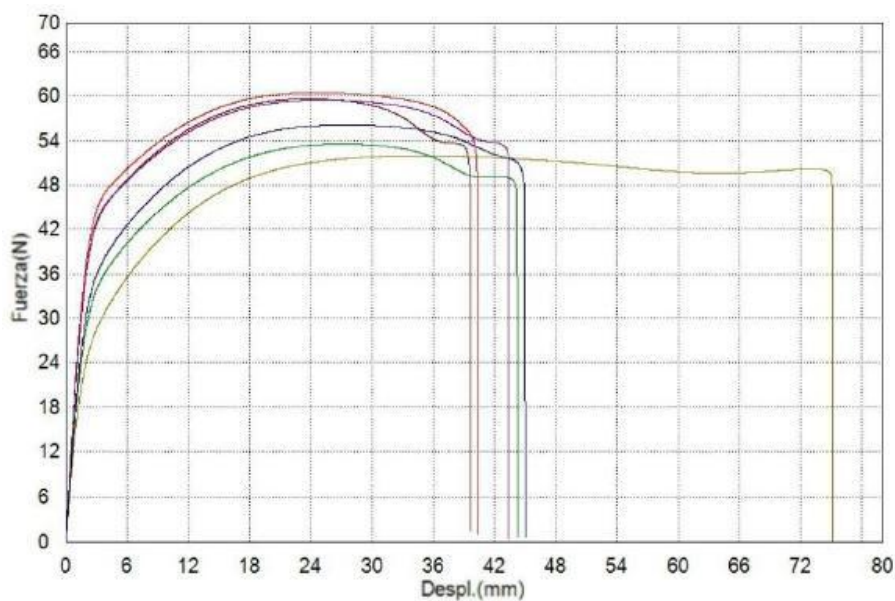


Fig. 62. Probetas de Duralón comercial de la 1 a la 3, después del ensayo de tracción mostrando la zona de cuello y fractura.



Fig. 63. Probetas de Duralón comercial de la 4 a la 6, después del ensayo de tracción mostrando la zona de cuello y fractura.

Curva fuerza-desplazamiento: Grilon comercial



Curva esfuerzo-deformación: Grilon comercial

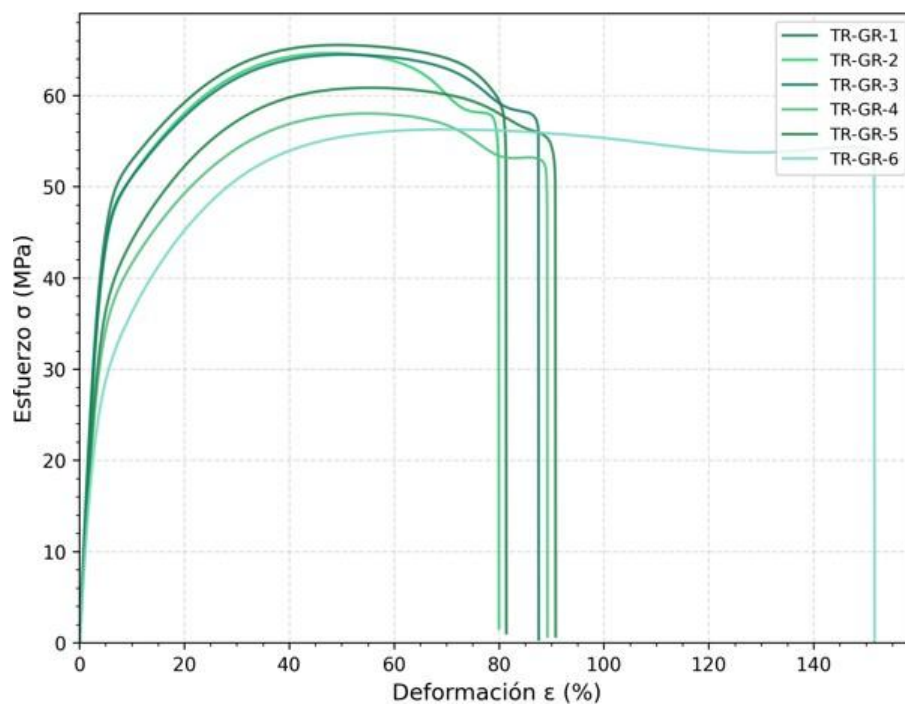


Fig. 64. Curva fuerza-desplazamiento y esfuerzo-deformación de las seis probetas del Grilon comercial obtenida del ensayo de tracción según ASTM D638-22.

La curva fuerza-desplazamiento del Grilon comercial presentada en la Figura 63 muestra las siguientes regiones características:

Región I: Zona elástica lineal (0 a 8 mm)

La fuerza aumenta linealmente hasta aproximadamente 8 mm de desplazamiento con un módulo de elasticidad promedio de 1944.41 MPa, el más alto de los cuatro materiales ensayados. Esta mayor rigidez inicial del Grilon respecto al Duralón y el Nylon lo posiciona como el material más adecuado para componentes que requieren alta resistencia a la deformación elástica como ruedas dentadas y guías de cadena en la maquinaria textil de Tungurahua.

Región II: Límite de fluencia y punto máximo (8 a 25 mm)

De acuerdo con estudios previos el Grilon alcanza una fuerza máxima promedio de 4991,71 N, equivalente a una resistencia a la tracción de 61,63 MPa, siendo la más alta del grupo ensayado. Por ello, en el presente estudio se observó que el punto de fluencia es claramente distinguible como el pico máximo de la curva, a diferencia del Duralón, donde $S_{ut} \approx S_y$.

Región III: Caída post-fluencia (25 a 45 mm)

Después del pico máximo la fuerza cae abruptamente hasta aproximadamente 4000 N indicando la formación de un cuello de fractura localizado. Esta caída es más pronunciada que en el Duralón evidenciando una menor capacidad de deformación plástica estable del material comercial denominado Grilon ensayado.

Región IV: Fractura (40 a 86 mm)

La fractura ocurre entre 40 y 86 mm de desplazamiento con la probeta TR-GR-6 mostrando la mayor elongación del grupo (82.44%), lo que puede atribuirse a variaciones en la orientación de las cadenas poliméricas durante el proceso de fabricación comercial de la plancha. La fractura es de tipo mixto con características dúctiles.

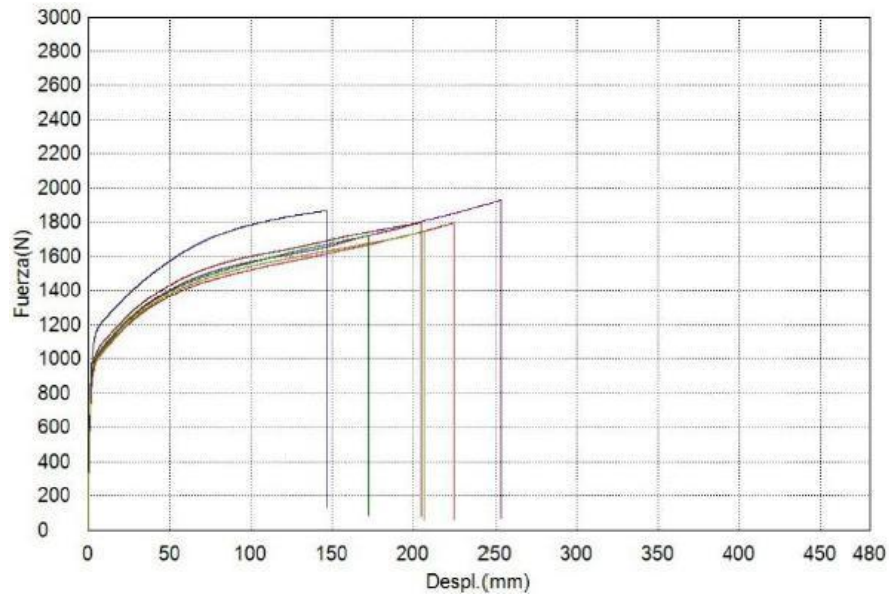


Fig. 65. Probetas de Grilon comercial de la 1 a la 3, después del ensayo de tracción mostrando la zona de cuello y fractura. Fuente: Elaboración propia.



Fig. 66. Probetas de Grilon comercial de la 4 a la 6, después del ensayo de tracción mostrando la zona de cuello y fractura. Fuente: Elaboración propia.

Curva fuerza-desplazamiento: Teflón comercial



Curva esfuerzo-deformación: Teflón comercial

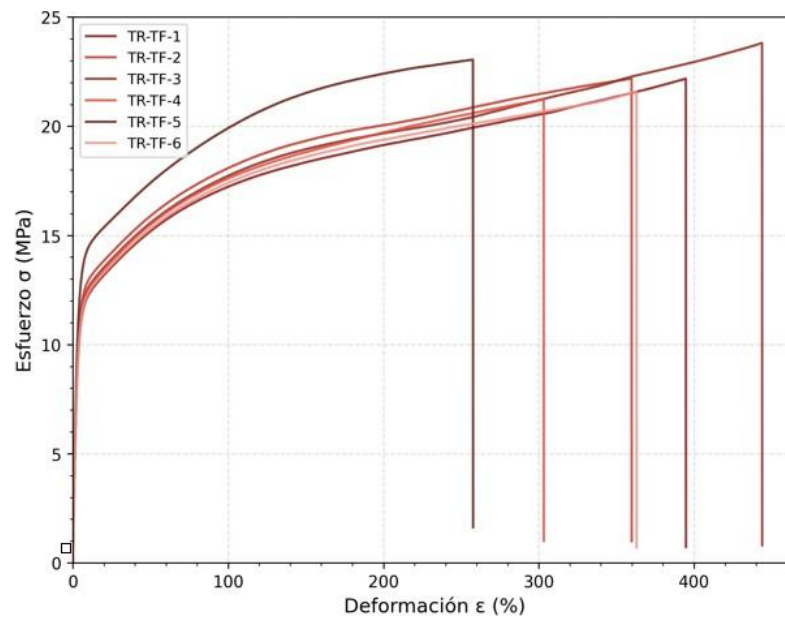


Fig. 67. Curva fuerza-desplazamiento y esfuerzo-deformación de las seis probetas del Teflón comercial obtenida del ensayo de tracción según ASTM D638-22.

La curva fuerza-desplazamiento del Teflón comercial presentada en la Figura 66 muestra un comportamiento fundamentalmente diferente a los demás materiales ensayados, con las siguientes regiones:

Región I: Zona de incremento gradual (0 a 150 mm)

A diferencia de los demás polímeros el Teflón no presenta una zona elástica lineal claramente definida sino un incremento continuo y gradual de la fuerza sin un punto de fluencia distinguible. La fuerza aumenta desde 0 hasta aproximadamente 1800 N a lo largo de 150 mm de desplazamiento con una curvatura que refleja el comportamiento viscoelástico altamente no lineal del Teflón comercial. Este comportamiento es consecuencia de su estructura molecular con cadenas de carbono completamente fluoradas que le confieren una extraordinaria flexibilidad molecular [16], documentado en el Capítulo 1.

Región II: Zona de endurecimiento por deformación (50 a 200 mm)

En esta región la curva muestra un incremento más pronunciado de la fuerza con el desplazamiento asociado al fenómeno de endurecimiento por deformación strain hardening donde las cadenas poliméricas del Teflón comercial se orientan progresivamente en la dirección de la carga aumentando la resistencia del material. La transición de fase cristalina de fase IV a fase I [16] contribuye a este comportamiento.

Región III: Fractura (150 a 260 mm)

La fractura ocurre de forma súbita entre 147 y 253 mm de desplazamiento con una amplia variabilidad entre probetas ($CV = 23.80\%$) atribuida a las variaciones en la microestructura cristalina local del Teflón comercial. La fractura es de tipo dúctil con elongaciones promedio de 171.48% medidas manualmente sobre la longitud calibrada de 57 mm según ASTM D638-22, confirmando la excepcional ductilidad del Teflón documentada en el Capítulo 1.

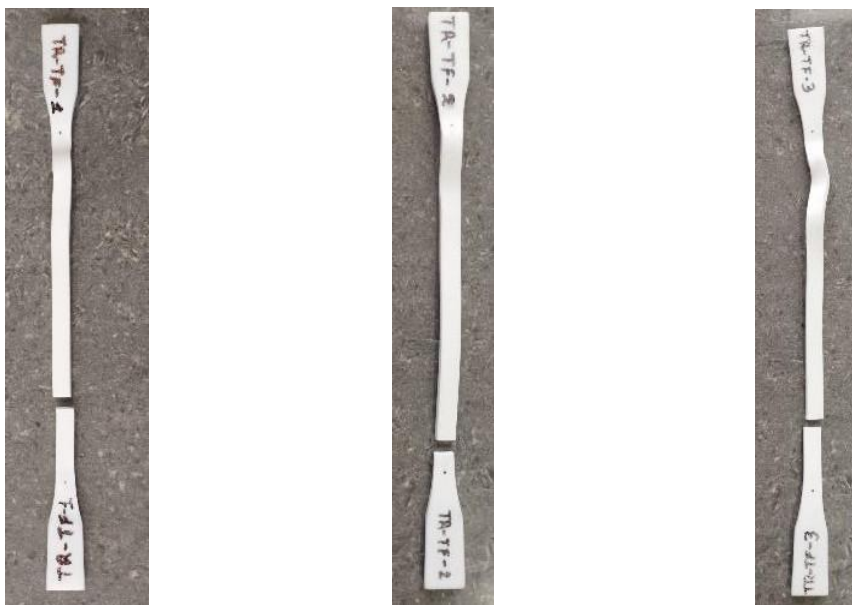
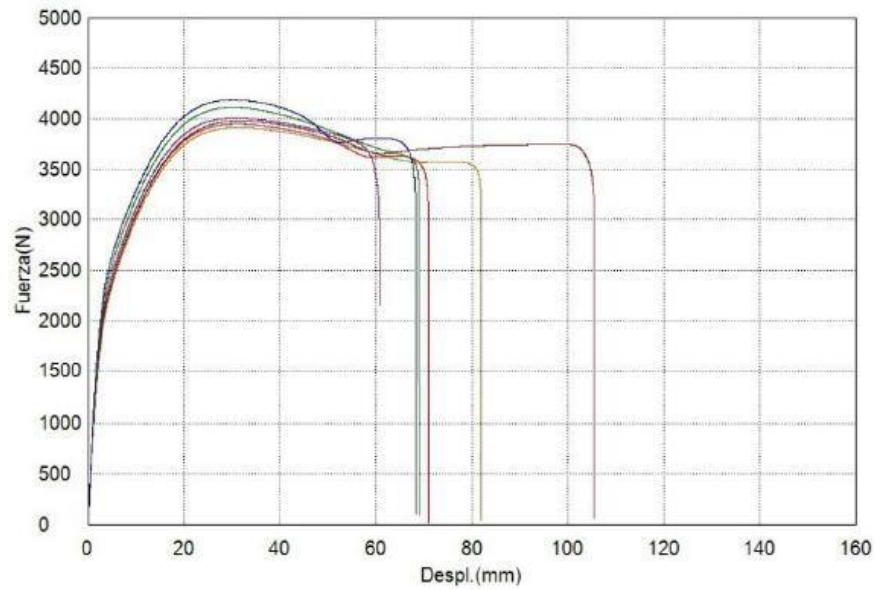


Fig. 68. Probetas de Teflón comercial de la 1 a la 3, después del ensayo de tracción mostrando la zona de cuello y fractura. Fuente: Elaboración propia.



Fig. 69. Probetas de Teflón comercial de la 4 a la 6, después del ensayo de tracción mostrando la zona de cuello y fractura. Fuente: Elaboración propia.

Curva fuerza-desplazamiento: Nylon comercial



Curva esfuerzo-deformación: Nylon comercial

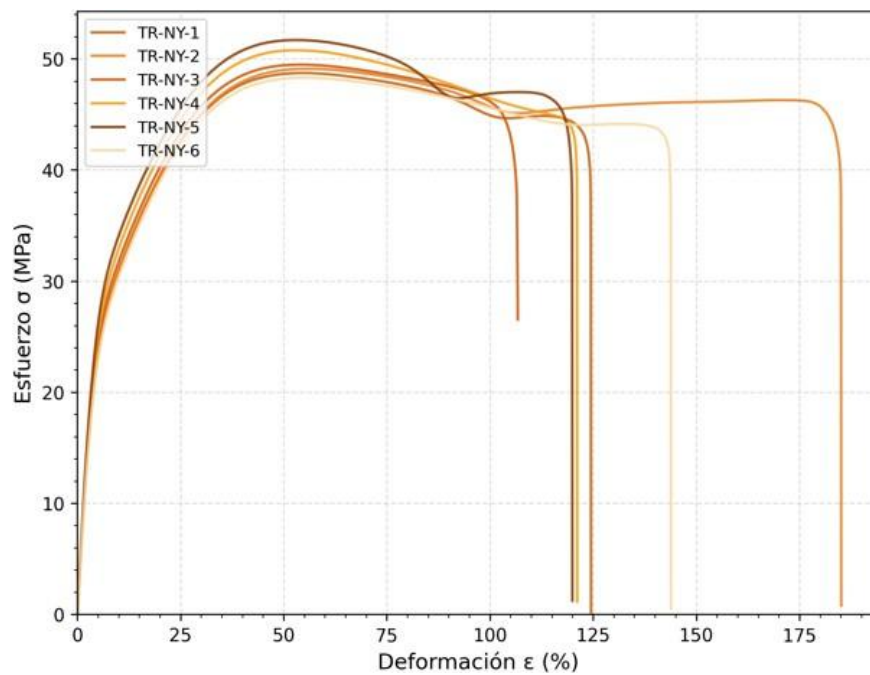


Fig. 70. Curva fuerza-desplazamiento y esfuerzo-deformación de las seis probetas del Nylon comercial obtenida del ensayo de tracción según ASTM D638-22.

La curva fuerza-desplazamiento del Nylon comercial presentada en la Figura 69 muestra las siguientes regiones:

Región I: Zona elástica lineal (0 a 10 mm)

La fuerza aumenta linealmente con un módulo de elasticidad promedio de 1467.26 MPa, valor inferior al del Grilon comercial pero superior al del Teflón comercial, reflejando las diferencias estructurales entre ambas poliamidas relacionadas con su diferente temperatura de transición vítrea y grado de cristalinidad [18] documentado en el Capítulo 1.

Región II: Límite de fluencia y punto máximo (10 a 30 mm)

La fuerza máxima promedio del Nylon fue de 4024,98 N, equivalente a una resistencia a la tracción de 49,69 MPa, con alta consistencia entre probetas ($CV = 2,61\%$). El punto de fluencia resulta claramente distinguible por la caída pronunciada de fuerza que sigue al pico máximo.

Región III: Zona de fluencia estable (30 a 65 mm)

Después del pico máximo la fuerza se estabiliza alrededor de 3600 N durante un amplio rango de desplazamiento mostrando un comportamiento de fluencia estable similar al del Duralón pero con mayor fuerza sostenida. Las seis probetas muestran una notable consistencia en esta región con el CV de resistencia a la tracción de apenas 2.61%, el más bajo de todos los materiales ensayados junto al CV del módulo de elasticidad de 3.70%.

Región IV: Fractura (60 a 105 mm)

La fractura ocurre entre 60 y 105 mm de desplazamiento con alta consistencia entre probetas. La fractura es de tipo dúctil con superficie fibrosa característica de las poliamidas de ingeniería. La predictibilidad del comportamiento mecánico del Nylon comercial ecuatoriano evidenciada por sus bajos coeficientes de variación confirma su adecuación para aplicaciones de precisión en componentes mecánicos de la industria carrocera y textil de Tungurahua.

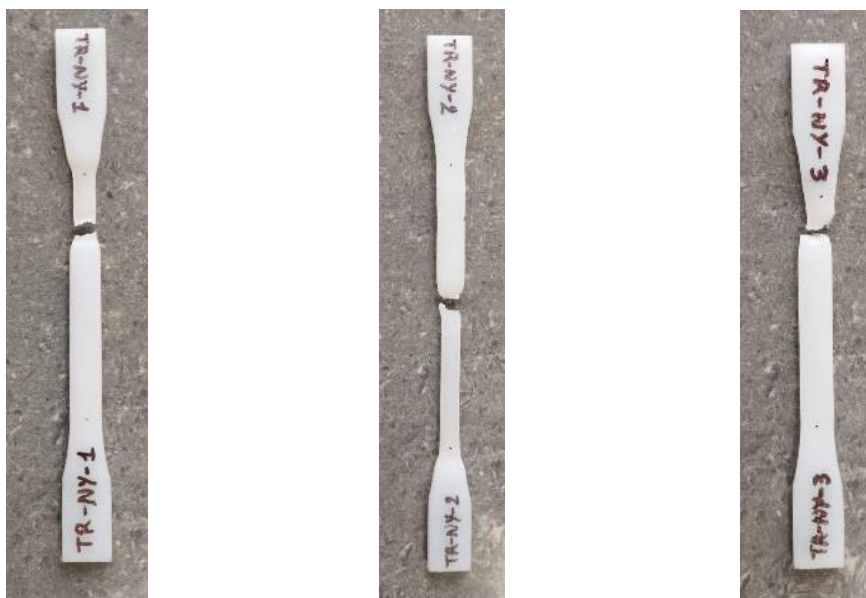


Fig. 71. Probetas de Nylon comercial de la 1 a la 3, después del ensayo de tracción mostrando la zona de cuello y fractura. Fuente: Elaboración propia.



Fig. 72. Probetas de Nylon comercial de la 4 a la 6, después del ensayo de tracción mostrando la zona de cuello y fractura. Fuente: Elaboración propia.

3.1.4 Análisis comparativo: Ensayo de tracción

Una vez obtenidos los resultados individuales de cada material, se realiza el análisis comparativo de las propiedades mecánicas de tracción de los cuatro polímeros comerciales ensayados. La Tabla XXI presenta el resumen estadístico comparativo.

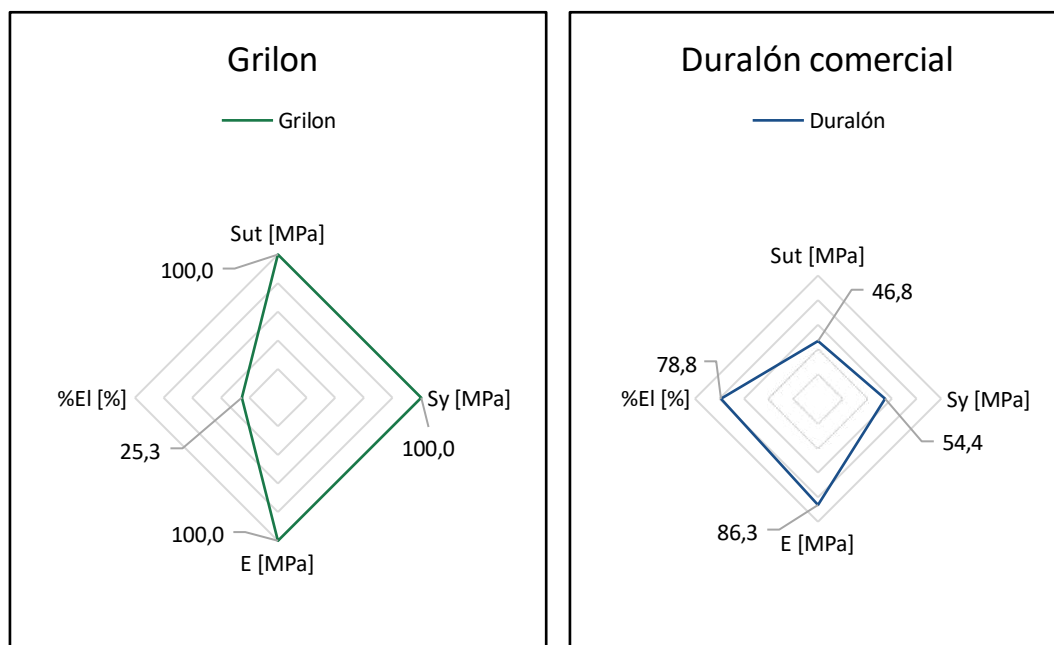
TABLA XXII. Comparativa de propiedades de tracción de los 4 polímeros.

Material	Sut (MPa)	Sy (MPa)	E (MPa)	%El
Duralón comercial	28.83	28.83	1678.66	135,16

Grilon comercial	61.63	52.99	1944.41	43.35
Teflón comercial	22.34	22.34	1062.45	171.48
Nylon comercial	49.69	38.02	1467.26	67.26

Fuente: Elaboración propia

Los resultados comparativos de la Tabla XXI revelan diferencias significativas entre los cuatro materiales poliméricos comerciales ensayados. El Grilon comercial presenta la mayor resistencia a la tracción con 61.63 MPa seguido del Nylon comercial con 49.69 MPa, el Duralón comercial con 28.83 MPa y el Teflón comercial con 22.34 MPa como el material de menor resistencia mecánica del grupo. En cuanto al módulo de elasticidad el orden es similar con el Grilon como el más rígido (1944.41 MPa) seguido del Duralón (1678.66 MPa), el Nylon (1467.26 MPa) y el Teflón (1062.45 MPa). La excepción notable es la elongación donde el Teflón supera ampliamente a todos los materiales con 171.48%, confirmando su clasificación como material blando y altamente deformable según la curva σ - ϵ descrita. [34] en el Capítulo 1.



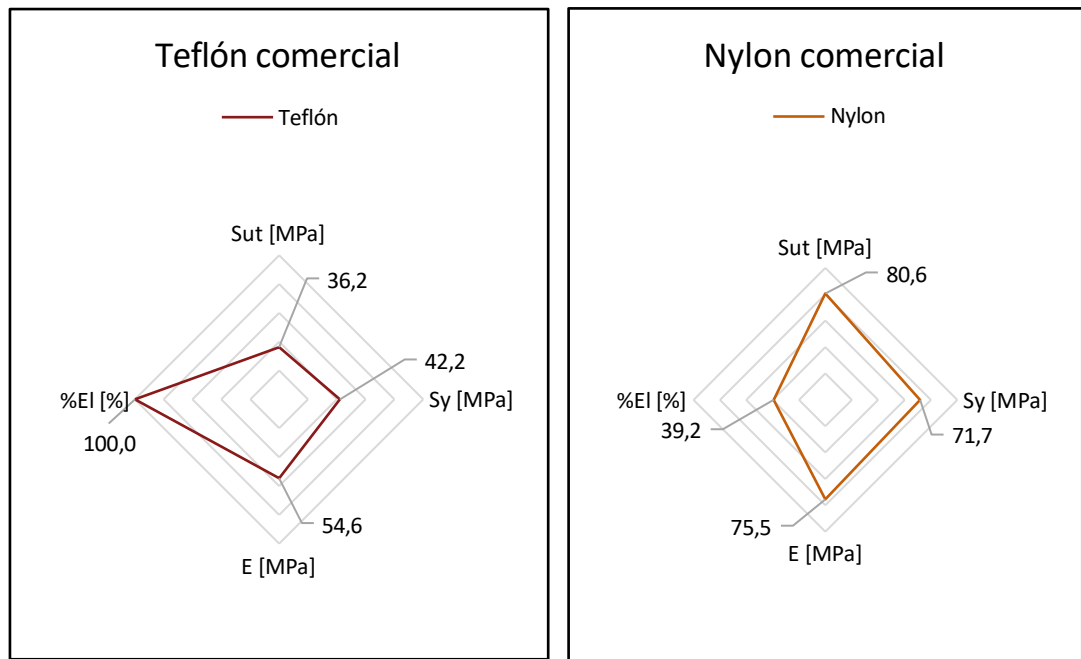


Fig. 73.Diagrama radiales individuales de las propiedades de tracción de cada polímero comercial ensayado. Fuente: Elaboración propia.

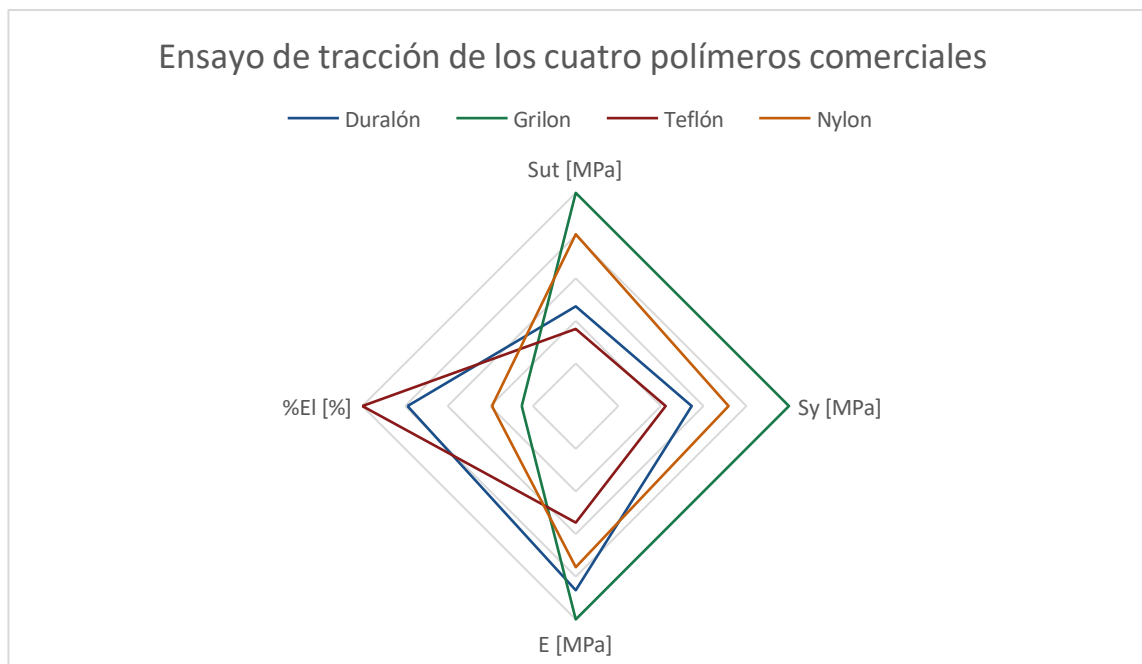


Fig. 74. Diagrama radial comparativo de las propiedades mecánicas de tracción de los cuatro polímeros comerciales: Duralón comercial, Grilon comercial, Teflón comercial y Nylon comercial . Fuente: Elaboración propia.

Las Figuras 74, 75, 76 y 77 presentan las gráficas de barras comparativas de la resistencia a la tracción, el límite de fluencia, el módulo de elasticidad y la elongación máxima de los cuatro materiales respectivamente.

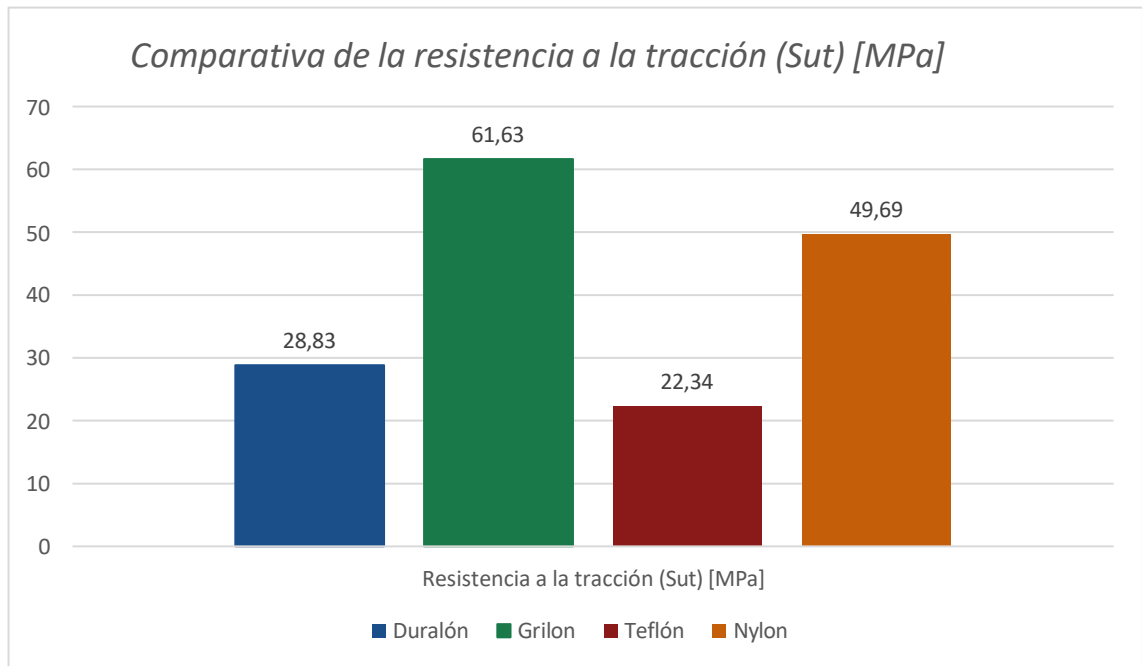


Fig. 75. Comparativa de la resistencia a la tracción (Sut) de los cuatro polímeros comerciales ensayados con barras de error representando la desviación estándar.

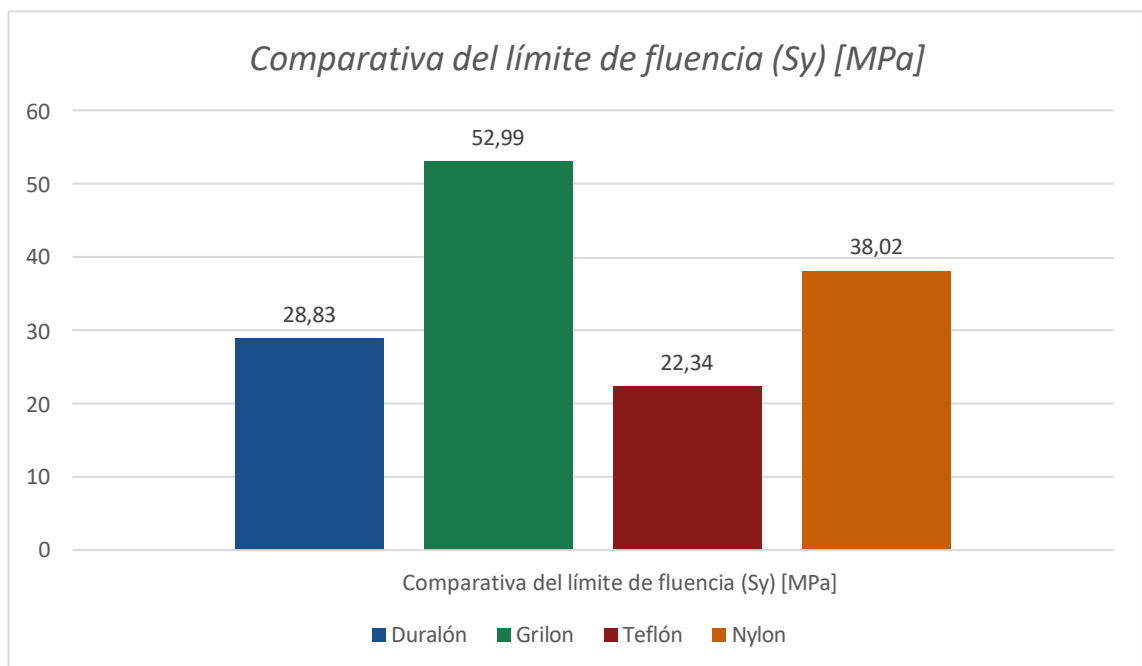


Fig. 76. Comparativa del límite de fluencia (Sy) de los cuatro polímeros comerciales ensayados con barras de error representando la desviación estándar.

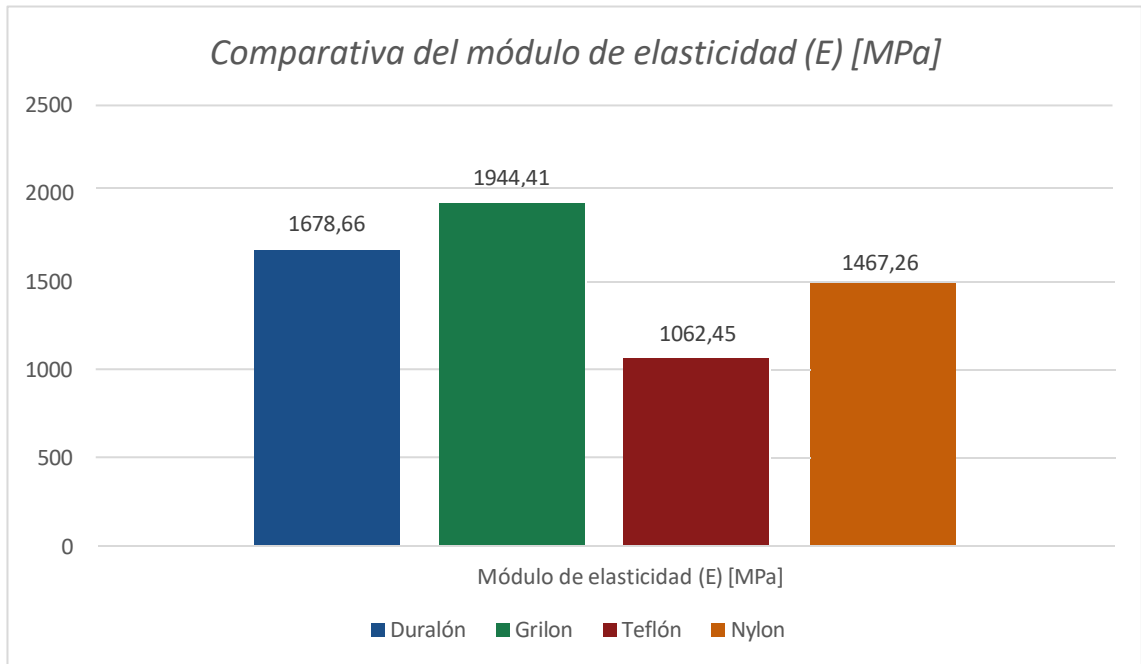


Fig. 77. Comparativa del módulo de elasticidad (E) de los cuatro polímeros comerciales ensayados con barras de error representando la desviación estándar.

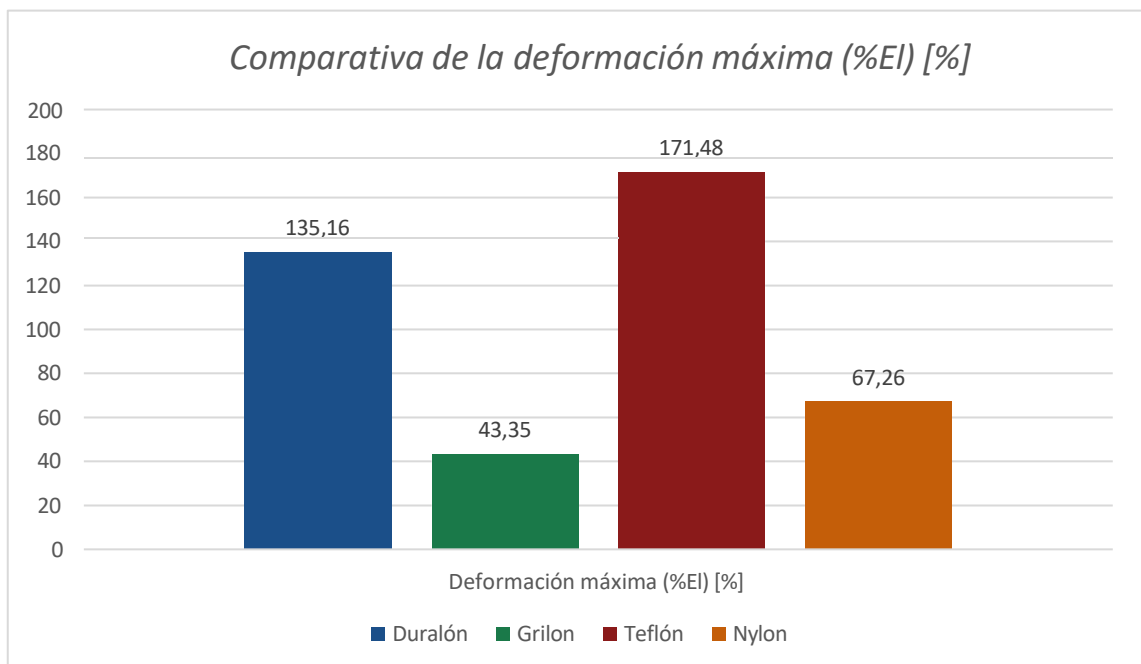


Fig. 78. Comparativa del porcentaje de elongación (%El) de los cuatro polímeros comerciales ensayados con barras de error representando la desviación estándar.

El análisis comparativo permite identificar que ningún material presenta superioridad en todas las propiedades simultáneamente, lo que confirma la necesidad de seleccionar el polímero adecuado según los requerimientos específicos del componente mecánico a diseñar. El Grilon destaca en resistencia y rigidez siendo ideal para engranajes y

elementos de transmisión de carga. El Nylon ofrece alta predictibilidad mecánica siendo el más adecuado para componentes de precisión. El Duralón presenta buena combinación de rigidez y ductilidad siendo apropiado para rodillos y levas. El Teflón por su parte destaca únicamente en ductilidad siendo su principal aplicación en sellos y juntas donde se requiere deformación elástica reversible.

3.1.5 Justificación de la norma ASTM D790-25

La norma ASTM D790-25 fue seleccionada para la caracterización mecánica a flexión de los materiales poliméricos comerciales Duralón comercial, Grilon comercial, Teflón comercial y Nylon comercial, ya que es el estándar internacional específicamente diseñado para la determinación de las propiedades flexurales de plásticos no reforzados, condición que corresponde exactamente a los materiales objeto de la presente investigación.

Los ensayos se realizaron bajo la configuración de flexión en tres puntos con viga simplemente apoyada y carga central. Para el Duralón comercial, el Grilon comercial y el Nylon comercial se aplicó el Procedimiento A con una velocidad de 2,56 mm/min, correspondiente a una tasa de deformación en la fibra extrema de 0,01 mm/mm/min para probetas de 6 mm de espesor y 96 mm de luz entre apoyos, conforme a la ecuación $v = ZL^2/6d$ de la norma ASTM D790-25. Para el Teflón comercial se aplicó el Procedimiento B con una velocidad de 25,6 mm/min, equivalente a una tasa de deformación de 0,10 mm/mm/min. Esta decisión se justifica porque el Teflón comercial presenta una elongación excepcionalmente alta (171,48%) y una curva fuerza-deflexión sin punto de fractura definido dentro del recorrido del equipo bajo el Procedimiento A, situación expresamente contemplada por la norma ASTM D790-25 en su sección de selección de procedimiento. La diferencia de velocidad entre materiales limita la comparación directa de valores absolutos entre el Teflón y los demás polímeros, razón por la cual los resultados del Teflón se interpretan de forma independiente en el análisis comparativo.

Cálculo de área de probetas de flexión

A continuación, se realiza el cálculo del área de la sección transversal de las probetas de flexión, utilizando las dimensiones reales medidas con el calibrador pie de rey digital Tronic Digital Caliper de resolución 0,01 mm.

El área de la sección transversal de la probeta rectangular de flexión se calcula como:

$$A = b * d$$

$$A = 19 \text{ mm} * 6 \text{ mm}$$

$$A = 114 \text{ mm}^2$$

La relación luz entre apoyos y espesor se verifica como:

$$\frac{L}{d}$$

$$\frac{96 \text{ mm}}{6 \text{ mm}}$$

$$16:1$$

La relación $L/d = 16:1$ cumple exactamente con lo prescrito por la norma ASTM D790-25 para ensayos de flexión en tres puntos, garantizando que el modo de falla predominante sea la flexión pura descartando la influencia del esfuerzo cortante.

3.1.6 Ensayo de flexión

En los ensayos de flexión, ninguna probeta alcanzó la fractura dentro del rango de desplazamiento disponible del equipo dado que el material tiene alta ductilidad en flexión. Por tanto, los valores de fuerza máxima, esfuerzo flexural y módulo flexural reportados corresponden a los máximos registrados durante el recorrido del travesaño y no necesariamente a valores de rotura del material.

Duralón comercial

En la Tabla XXII se presentan los resultados del ensayo de flexión de las seis probetas del Duralón comercial obtenidos mediante la Máquina Universal de Ensayos Shimadzu AGS-X y procesados por el software Trapezium X.

TABLA XXIII. Resultados del ensayo de flexión: Duralón comercial.

Probeta	b (mm)	d (mm)	A (mm ²)	F _{max} (N)	σ _f (MPa)	E _f (MPa)	ε _f
FL-DL-1	19	6	114	134.079	28.23	1118.46	0.04998

FL-DL-2	19	6	114	135.366	28.50	1150.27	0.05005
FL-DL-3	19	6	114	135.438	28.51	1178.29	0.05004
FL-DL-4	19	6	114	135.303	28.48	1153.32	0.05009
FL-DL-5	19	6	114	136.455	28.73	1163.96	0.05003
FL-DL-6	19	6	114	132.028	27.80	1137.46	0.05007
Media			114	134.778	28.37	1150.29	0.05004
Desviación Estándar				1.544	0.325	20.77	0.000038
IC95%				-	[28,03 - 28,71]	[1128,49 - 1172,09]	-
Coefficiente de Variación (%)				1.15	1.15	1.81	0.08

Fuente: Elaboración propia

El intervalo de confianza al 95% de la resistencia a la flexión del Duralón (IC95%: 28,03 - 28,71 MPa) es el más estrecho de todos los materiales en flexión, con una amplitud de apenas 0,68 MPa, confirmando la excepcional homogeneidad del Duralón comercial bajo carga de flexión. El IC95% del módulo flexural (1128,49 - 1172,09 MPa) evidencia igualmente una dispersión muy baja, coherente con el CV de 1,81%.

El Duralón comercial presenta en flexión la misma alta consistencia observada en tracción, con un CV de resistencia a la flexión de 1.15% y un CV del módulo flexura, de apenas 1,81%, los valores más bajos de todos los materiales ensayados en flexión. Este comportamiento confirma la homogeneidad del Duralón comercial ecuatoriano y su predictibilidad mecánica tanto en tracción como en flexión, características que lo posicionan como material confiable para el diseño de componentes mecánicos sometidos a cargas combinadas en la industria de Tungurahua. Cabe señalar que las probetas no alcanzaron la fractura durante el ensayo de flexión dado que el material tiene alta ductilidad en flexión, reportándose los valores de fuerza y esfuerzo máximos alcanzados dentro del rango de desplazamiento del equipo.

Verificación de cálculos

La probeta FL-DL-4 se tomó como representativa del Duralón comercial por registrar los valores más cercanos a la media del grupo.

Cálculo 1: Resistencia a la flexión (σ_f)

Aplicando la ecuación 5 del Capítulo 1, la resistencia a la flexión se calcula como:

$$\sigma_f = \frac{3FL [N]}{2bd^2 [mm^2]}$$
$$\sigma_f = \frac{(3 * 135.303 N * 96 mm)}{(2 * 19 mm * 36 mm^2)}$$
$$\sigma_f = \frac{38967.264 [N]}{1368 [mm^2]}$$
$$\sigma_f = 28.48 MPa$$

El valor calculado de 28.48 MPa coincide con el valor de la Tabla XXII, validando el proceso de cálculo.

Cálculo 2: Deformación de flexión en la fibra extrema (ϵ_f)

Aplicando la ecuación 6 del Capítulo 1:

$$\epsilon_f = \frac{6Dd}{L^2}$$
$$\epsilon_f = \frac{(6 * 12.8234 mm * 6 mm)}{(96 mm)^2}$$
$$\epsilon_f = \frac{461.6424 [mm^2]}{9216 [mm^2]}$$
$$\epsilon_f = 0.05009$$

El valor calculado de $\epsilon_f = 0.05009$ indica que la fibra extrema de la probeta se deformó un 5.009% en el punto de fuerza máxima

Cálculo 3: Módulo flexural (E_f)

$$Ef = \frac{L^3 * m}{(4bd^3)}$$

Donde m es la pendiente de la zona lineal de la curva fuerza-deflexión calculada desde el CSV:

$$m = 20.753 \frac{N}{mm}$$

$$Ef = \frac{(96^3 * 20.753) [mm^3 * \frac{N}{mm}]}{(4 * 19 * 6^3) [mm^4]}$$

$$Ef = \frac{(884736 * 20.753) [mm^2 * N/mm]}{(4 * 19 * 6^3) [mm^4]}$$

$$Ef = \frac{18360630.77 [N * mm^2]}{16416 [mm^4]}$$

$$Ef = 1118.46 MPa$$

El valor calculado del módulo flexural de 1118.46 MPa coincide con el valor reportado en la Tabla XXII, validando el proceso de cálculo.

Grilon comercial

En la Tabla XXIII se presentan los resultados del ensayo de flexión de las seis probetas del Grilon comercial . El Grilon presenta la mayor resistencia a la flexión de los cuatro materiales ensayados, comportamiento consistente con sus propiedades de tracción.

TABLA XXIV. Resultados del ensayo de flexión: Grilon comercial.

Probeta	b (mm)	d (mm)	A (mm ²)	F _{max} (N)	σ _f (MPa)	E _f (MPa)	ε _f
FL-GR-1	19	6	114	259.527	54.64	1893.75	0.05007
FL-GR-2	19	6	114	276.685	58.25	1979.10	0.05005
FL-GR-3	19	6	114	267.498	56.32	1971.77	0.05009

FL-GR-4	19	6	114	310.969	65.47	2251.03	0.05008
---------	----	---	-----	---------	-------	---------	---------

FL-GR-5	19	6	114	236.042	49.69	1680.02	0.05020
FL-GR-6	19	6	114	249.251	52.47	1831.91	0.05008
Media			114	266.662	56.14	1934.60	0.05009
Desviación Estándar				25.907	5.454	190,01	0.000050
IC95%				-	[50,42 - 61,86]	[1735,16 - 2134,04]	-
Coefficiente de Variación (%)				9.72	9.72	9.82	0.10

Fuente: Elaboración propia

El intervalo de confianza al 95% de la resistencia a la flexión del Grilon (IC95%: 50,42 - 61,86 MPa) es el más amplio del grupo en flexión, con una amplitud de 11,44 MPa, reflejando la heterogeneidad microestructural del material comercial denominado Grilon, particularmente notable en la probeta FL-GR-4 que presentó una resistencia significativamente superior al resto del grupo. El IC95% del módulo flexural (1735,16 - 2134,04 MPa) confirma esta variabilidad, con una amplitud de 398,88 MPa.

El Grilon comercial confirma en flexión su posición como el material de mayor resistencia mecánica del grupo con σ_f promedio de 56.14 MPa y E_f promedio de 1934.60 MPa. Sin embargo presenta el mayor CV de resistencia a la flexión (9.72%) y módulo flexural (9.82%) entre los cuatro materiales, ambos valores muy cercanos al umbral del 10%. Esta variabilidad es consistente con la observada en tracción y refleja la heterogeneidad microestructural del Grilon comercial denominado Grilon, particularmente notable en la probeta FL-GR-4 que presenta una resistencia a la flexión de 65.47 MPa significativamente superior a las demás, lo cual sugiere variaciones locales en el grado de cristalinidad del material en las planchas comerciales adquiridas.

Verificación de cálculos

La probeta FL-GR-3 se tomó como representativa del Grilon comercial por registrar

Cálculo 1: Resistencia a la flexión (σ_f)

Aplicando la ecuación 5 del Capítulo 1, la resistencia a la flexión se calcula como:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bd^2}$$
$$\sigma_f = \frac{(3 * 267.498 \text{ N} * 96 \text{ mm})}{(2 * 19 \text{ mm} * 36 \text{ mm}^2)}$$
$$\sigma_f = \frac{77039.424 \text{ [N]}}{1368 \text{ [mm}^2\text{]}}$$
$$\sigma_f = 56.32 \text{ MPa}$$

El valor calculado de 56.32 MPa coincide con el reportado en la Tabla XXIII, validando el proceso de cálculo.

Cálculo 2: Deformación de flexión en la fibra extrema (ε_f)

Aplicando la ecuación 6 del Capítulo 1:

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2}$$
$$\varepsilon_f = \frac{(6 * 12.8226 \text{ mm} * 6 \text{ mm})}{(96 \text{ mm})^2}$$
$$\varepsilon_f = \frac{461.6136 \text{ [mm}^2\text{]}}{9216 \text{ [mm}^2\text{]}}$$
$$\varepsilon_f = 0.05009$$

El valor calculado de $\varepsilon_f = 0.05009$ indica que la fibra extrema de la probeta se deformó un 5.009% en el punto de fuerza máxima, valor consistente con el comportamiento elástico del Grilon bajo carga de flexión.

Cálculo 3: Módulo flexural (E_f)

Aplicando la ecuación 8 del Capítulo 1, el módulo flexural se calcula como:

$$E_f = \frac{L^3 * m}{(4bd^3)}$$

Donde m es la pendiente de la zona lineal de la curva fuerza-deflexión calculada desde el CSV:

$$m = 36.586 \frac{N}{mm}$$

$$Ef = \frac{(884736 * 36.586) [mm^3 * \frac{N}{mm}]}{16416 [mm^4]}$$

$$Ef = \frac{32368554.71 [N]}{16416 [mm^2]}$$

$$Ef = 1971.77 MPa$$

El valor calculado coincide con el reportado en la Tabla XXIII, validando el proceso de cálculo.

Teflón comercial

En la Tabla XXIV se presentan los resultados del ensayo de flexión de las seis probetas del Teflón comercial . Este material presenta la menor resistencia a la flexión del grupo, comportamiento consistente con sus propiedades de tracción. El ensayo se realizó bajo el Procedimiento B de la norma ASTM D790-25 con una velocidad de 25,6 mm/min.

TABLA XXV. Resultados del ensayo de flexión: Teflón comercial.

Probeta	b (mm)	d (mm)	A (mm ²)	F_max (N)	σf (MPa)	Ef (MPa)	εf
FL-TF-1	19	6	114	83.939	17.67	708.65	0.05045
FL-TF-2	19	6	114	78.885	16.61	679.12	0.05004
FL-TF-3	19	6	114	79.203	16.67	670.52	0.05024
FL-TF-4	19	6	114	75.603	15.92	658.20	0.04999
FL-TF-5	19	6	114	84.233	17.73	676.53	0.05706
FL-TF-6	19	6	114	80.355	16.92	681.74	0.04981

Media	114	80.370	16.92	679.13	0.05127
Desviación Estándar		3.285	0.692	16.72	0.000279
IC95%		-	[16,19 - 17,65]	[661,58 - 696,68]	-
Coefficiente de Variación (%)		4.09	4.09	2.46	0.54

Fuente: Elaboración propia

El intervalo de confianza al 95% de la resistencia a la flexión del Teflón (IC95%: 16,19 - 17,65 MPa) indica una dispersión reducida y consistente entre probetas, coherente con el CV de 4,09%. El IC95% del módulo flexural (661,58 - 696,68 MPa) confirma la baja rigidez característica del Teflón comercial en flexión, con una amplitud de apenas 35,10 MPa.

El Teflón comercial presenta en flexión el mismo comportamiento diferenciado observado en tracción, con la menor resistencia a la flexión del grupo (16.92 MPa) y el menor módulo flexural (679.13 MPa). La consistencia entre probetas es buena con CV de 4.09% en resistencia y 2.46% en módulo, valores inferiores al umbral del 10%. La probeta FL-TF-5 presenta un ϵ_f de 0.05706, ligeramente superior a las demás (0.04981-0.05045), asociado a su mayor desplazamiento máximo de 14.61 mm que puede estar relacionado con las propiedades viscoelásticas del Teflón comercial y la mayor velocidad de ensayo aplicada bajo el Procedimiento B.

Verificación de cálculos

La probeta FL-TF-6 se tomó como representativa del Teflón comercial por registrar los valores más cercanos a la media del grupo.

Cálculo 1: Resistencia a la flexión (σ_f)

Aplicando la ecuación 5 del Capítulo 1, la resistencia a la flexión se calcula como:

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

$$\sigma_f = \frac{(3 * 80.355 \text{ N} * 96 \text{ mm})}{(2 * 19 \text{ mm} * 36 \text{ mm}^2)}$$

$$\sigma_f = \frac{23142.24 [N]}{1368 [mm^2]}$$

$$\sigma_f = 16.92 MPa$$

El valor calculado de 16.92 MPa coincide con el reportado en la Tabla XXIV, validando el proceso de cálculo.

Cálculo 2: Deformación de flexión en la fibra extrema (ϵ_f)

Aplicando la ecuación 6 del Capítulo 1

$$\epsilon_f = \frac{6Dd}{L^2}$$

$$\epsilon_f = \frac{(6 * 12.7512 mm * 6 mm)}{(96 mm)^2}$$

$$\epsilon_f = \frac{459.0432 [mm^2]}{9216 [mm^2]}$$

$$\epsilon_f = 0.04981$$

El valor calculado de $\epsilon_f = 0.04981$ indica que la fibra extrema de la probeta se deformó un 4.98% en el punto de fuerza máxima, valor consistente con el comportamiento elástico del Teflón bajo carga de flexión.

Cálculo 3: Módulo flexural (E_f)

Aplicando la ecuación 8 del Capítulo 1, el módulo flexural se calcula como:

$$E_f = \frac{L^3 * m}{(4bd^3)}$$

Donde m es la pendiente de la zona lineal de la curva fuerza-deflexión calculada desde el CSV:

$$m = 12.650 \frac{N}{mm}$$

$$E_f = \frac{(884736 * 12.650) [mm^3 * \frac{N}{mm}]}{16416 [mm^4]}$$

$$Ef = \frac{11191513.81 [N]}{16416 [mm^2]}$$

$$Ef = 681.74 MPa$$

El valor calculado coincide con el reportado en la Tabla XXIV, validando el proceso de cálculo.

Nylon comercial

En la Tabla XXV se presentan los resultados del ensayo de flexión de las seis probetas del Nylon comercial . Este material continúa demostrando en flexión la alta consistencia observada en tracción.

TABLA XXVI. Resultados del ensayo de flexión: Nylon comercial.

Probeta	b (mm)	d (mm)	A (mm ²)	F_max (N)	σf (MPa)	Ef (MPa)	εf
FL-NY-1	19	6	114	170.302	35.85	1073.56	0.05007
FL-NY-2	19	6	114	169.810	35.75	1074.66	0.05004
FL-NY-3	19	6	114	174.030	36.64	1137.52	0.05004
FL-NY-4	19	6	114	170.628	35.92	1096.37	0.05007
FL-NY-5	19	6	114	165.025	34.74	1027.31	0.05007
FL-NY-6	19	6	114	167.521	35.27	1043.23	0.05008
Media			114	169.553	35.70	1075.44	0.05006
Desviación Estándar				3.048	0.642	39.12	0.000018
IC95%				-	[35,03 - 36,37]	[1034,38 - 1116,50]	-
Coefficiente de Variación (%)				1.80	1.80	3.64	0.04

Fuente: Elaboración propia

El intervalo de confianza al 95% de la resistencia a la flexión del Nylon (IC95%: 35,03 - 36,37 MPa) confirma la alta consistencia del Nylon comercial bajo carga de flexión, con una amplitud de apenas 1,34 MPa. El IC95% del módulo flexural (1034,38 - 1116,50 MPa) evidencia igualmente una dispersión controlada, coherente con el CV de 3,64%, consolidando al Nylon como el material más predecible mecánicamente del grupo ensayado.

En flexión, el Nylon comercial ratifica su característica más destacada: la consistencia entre probetas. Los CV de resistencia a la flexión (1,80%) y módulo flexural (3,64%) se ubican muy por debajo del umbral del 10%, y la deformación en la fibra extrema promedio ($\epsilon_f = 0,05006$) registró un CV de apenas 0,04%, el más bajo de toda la investigación, lo que refleja una homogeneidad notable en el Nylon comercial. Esta predictibilidad mecánica lo posiciona como una opción confiable para componentes de alta precisión dimensional en la industria carrocera y textil de Tungurahua.

Verificación de cálculos

Se selecciona la probeta FL-NY-4 como representativa del Nylon comercial .

Cálculo 1: Resistencia a la flexión (σ_f)

Aplicando la ecuación 5 del Capítulo 1, la resistencia a la flexión se calcula como.

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

$$\sigma_f = \frac{(3 * 170.628 \text{ N} * 96 \text{ mm})}{(2 * 19 \text{ mm} * 36 \text{ mm}^2)}$$

$$\sigma_f = \frac{49140.864 \text{ [N]}}{1368 \text{ [mm}^2\text{]}}$$

$$\sigma_f = 35.92 \text{ MPa}$$

El valor calculado de 35.92 MPa coincide con el reportado en la Tabla XXV, validando el proceso de cálculo.

Cálculo 2: Deformación de flexión en la fibra extrema (ϵ_f)

Aplicando la ecuación 6 del Capítulo 1.

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2}$$

$$\varepsilon_f = \frac{(6 * 12.8174 \text{ mm} * 6 \text{ mm})}{(96 \text{ mm})^2}$$

$$\varepsilon_f = \frac{461.4264 [\text{mm}^2]}{9216 [\text{mm}^2]}$$

$$\varepsilon_f = 0.05007$$

El valor calculado de $\varepsilon_f = 0.05007$ indica que la fibra extrema de la probeta se deformó un 5.007% en el punto de fuerza máxima, valor consistente con el comportamiento elástico del Nylon bajo carga de flexión.

Cálculo 3: Módulo flexural (E_f).

Aplicando la ecuación 8 del Capítulo 1, el módulo flexural se calcula como:

$$E_f = \frac{L^3 * m}{(4bd^3)}$$

Donde m es la pendiente de la zona lineal de la curva fuerza-deflexión calculada desde el CSV:

$$m = 20.343 \frac{N}{mm}$$

$$E_f = \frac{(884736 * 20.343) [\text{mm}^3 * \frac{N}{mm}]}{16416 [\text{mm}^4]}$$

$$E_f = \frac{17997935.81 [N]}{16416 [\text{mm}^2]}$$

$$E_f = 1096.37 \text{ MPa}$$

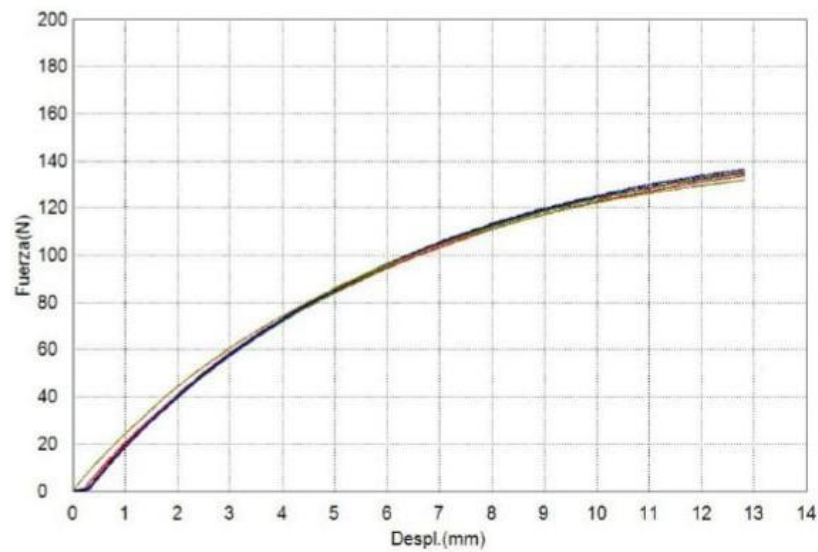
El valor calculado coincide con el reportado en la Tabla XXV, validando el proceso de cálculo.

3.1.7 Análisis técnico de las curvas fuerza-deflexión

Las curvas fuerza-deflexión obtenidas bajo carga de flexión en tres puntos. A

diferencia de los ensayos de tracción donde la mayoría de los materiales fracturaron, en los ensayos de flexión ninguna probeta alcanzó la fractura dentro del rango de desplazamiento del equipo (≈ 13 mm), reportándose los valores de fuerza y esfuerzo máximos alcanzados al final del recorrido disponible del travesaño. Este comportamiento es característico de los polímeros termoplásticos semicristalinos que exhiben alta ductilidad en flexión

Curva fuerza-deflexión: Duralón comercial



Curva esfuerzo-deformación: Duralón comercial

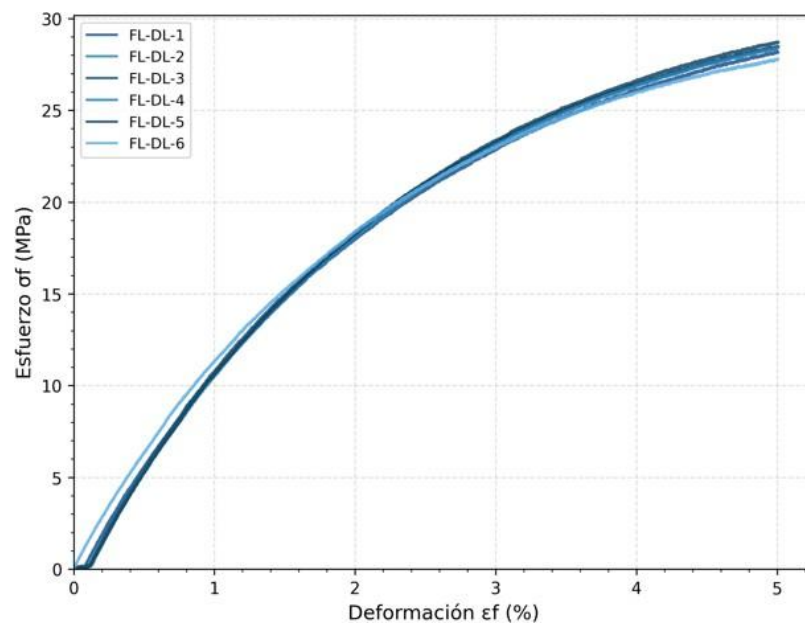


Fig. 79. Curva fuerza-deflexión y esfuerzo-deformación de las seis probetas del Duralón comercial obtenida del ensayo de flexión en tres puntos a 2,56 mm/min según ASTM D790-25.

La curva fuerza-deflexión del Duralón comercial muestra las siguientes regiones:

Región I: Zona elástica lineal (0 a 3 mm)

En los primeros 3 mm de deflexión la fuerza aumenta de forma aproximadamente lineal con una pendiente promedio de 20.6 N/mm correspondiente al módulo flexural de 1150.29 MPa. Esta zona define el rango de trabajo elástico del material en aplicaciones de flexión.

Región II: Zona de transición no lineal (3 a 8 mm)

A partir de los 3 mm la curva comienza a perder su linealidad mostrando un incremento progresivamente menor de la fuerza por unidad de deflexión. Este comportamiento refleja el inicio de la deformación viscoelástica del Duralón donde la velocidad de deformación supera la capacidad de relajación elástica del material.

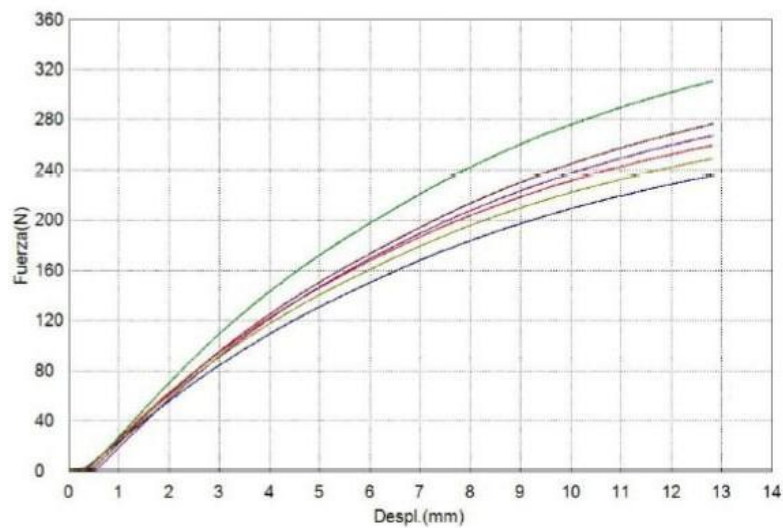
Región III: Zona de endurecimiento por deformación (8 a 13 mm)

En la zona final de la curva entre 8 y 13 mm la fuerza continúa aumentando pero con una pendiente aún menor evidenciando el endurecimiento progresivo por orientación de cadenas poliméricas bajo carga de flexión. La fuerza máxima promedio alcanzada fue de 134.778 N equivalente a una resistencia a la flexión de 28.37 MPa. Las seis probetas muestran una notable consistencia en toda la curva con CV de 1.15%.



Fig. 80. Probetas del Duralón comercial durante el ensayo de flexión en tres puntos mostrando la deflexión característica sin fractura.

Curva fuerza-deflexión: Grilon comercial



Curva esfuerzo-deformación: Grilon comercial

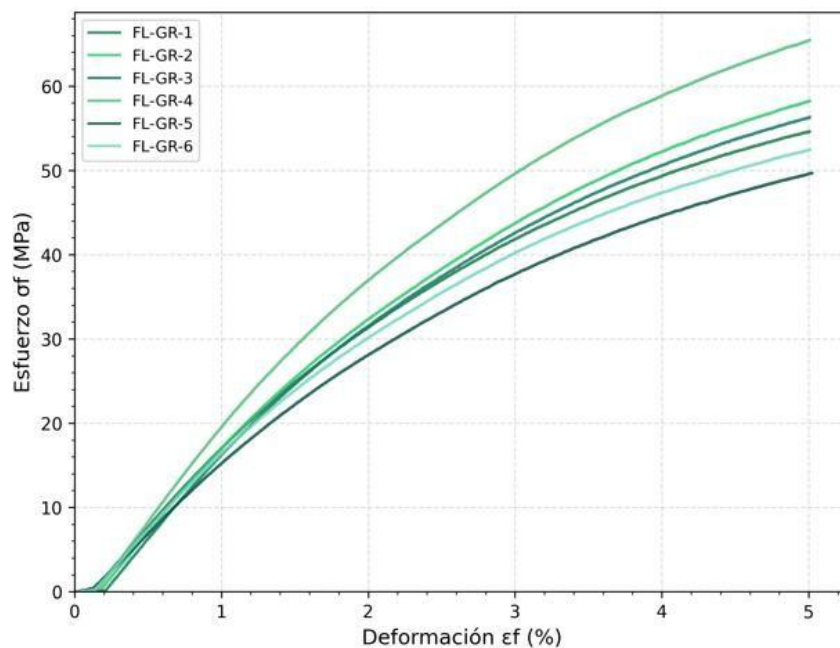


Fig. 81. Curva fuerza-deflexión y esfuerzo-deformación de las seis probetas del Grilon comercial obtenida del ensayo de flexión en tres puntos a 2,56 mm/min según ASTM D790-25.

La curva fuerza-deflexión del Grilon comercial muestra las siguientes regiones:

Región I: Zona elástica lineal (0 a 2 mm)

El Grilon presenta la pendiente inicial más pronunciada de los cuatro materiales con una pendiente promedio de 35.0 N/mm correspondiente al módulo flexural de 1934.60

MPa, el más alto del grupo. Esta mayor rigidez inicial confirma la superioridad del material comercial denominado Grilon ecuatoriano como material estructural para componentes que requieren alta resistencia a la deformación elástica en flexión.

Región II: Zona de transición no lineal (2 a 6 mm)

La pérdida de linealidad es más pronunciada en el Grilon que en los demás materiales evidenciando una mayor sensibilidad viscoelástica del Grilon comercial. La variabilidad entre probetas aumenta notablemente en esta región reflejando la heterogeneidad microestructural del material documentada en los resultados de tracción.

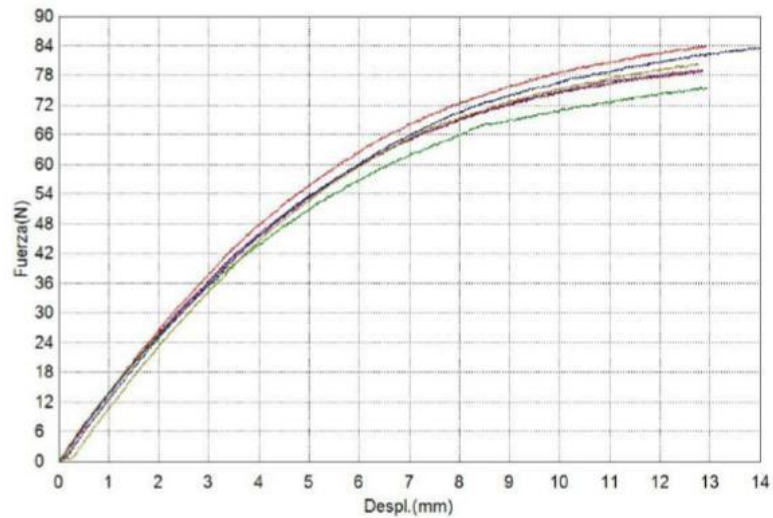
Región III: Zona de endurecimiento progresivo (6 a 13 mm)

La fuerza continúa aumentando hasta alcanzar valores entre 236 y 311 N al final del recorrido con una dispersión significativa entre probetas que genera el CV de 9.72%. La probeta FL-GR-4 supera ampliamente a las demás con 310.969 N equivalente a 65.47 MPa reflejando variaciones locales en el grado de cristalinidad del Grilon comercial.



Fig. 82. Probetas del Grilon comercial durante el ensayo de flexión en tres *puntos*.

Curva fuerza-deflexión: Teflón comercial



Curva esfuerzo-deformación: Teflón comercial

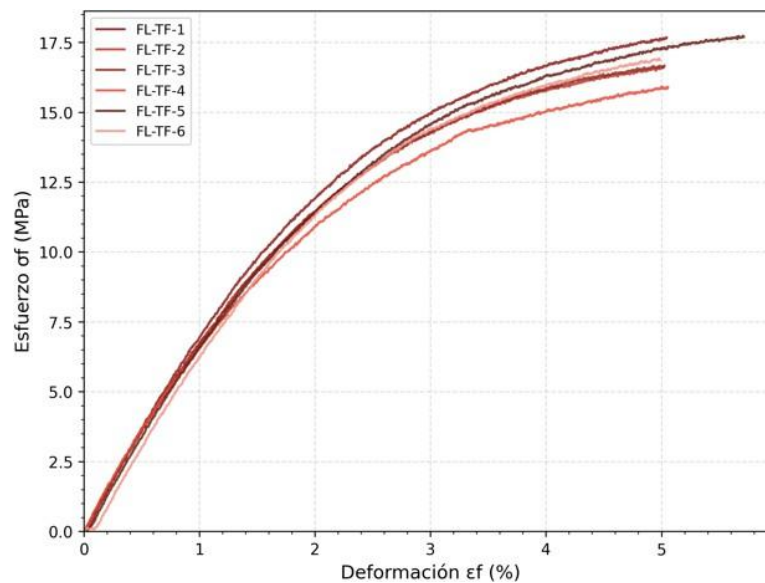


Fig. 83. Curva fuerza-deflexión y esfuerzo-deformación de las seis probetas del Teflón comercial obtenida del ensayo de flexión en tres puntos a 25,6 mm/min según ASTM D790-25 Procedimiento B.

La curva fuerza-deflexión del Teflón comercial muestra las siguientes regiones:

Región I: Zona de incremento gradual (0 a 3 mm)

Al igual que en tracción el Teflón no presenta una zona elástica lineal claramente definida sino un incremento continuo y gradual de la fuerza desde el inicio del ensayo. La pendiente inicial promedio de 12.4 N/mm genera el módulo flexural más bajo del grupo de 679.13 MPa evidenciando la baja rigidez característica del Teflón comercial en flexión.

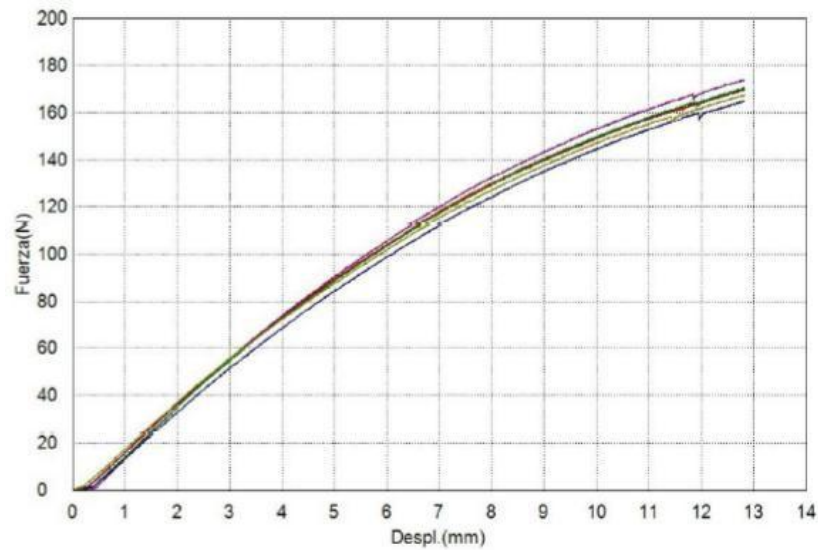
Región II: Zona de endurecimiento no lineal (3 a 13 mm)

La curva muestra un incremento continuo de la fuerza con una curvatura pronunciada que refleja el comportamiento viscoelástico no lineal del Teflón comercial. La fuerza aumenta de manera progresiva sin mostrar un punto de inflexión claro ni una zona de fluencia definida comportamiento consistente con el observado en tracción. La probeta FL-TF-5 muestra un comportamiento ligeramente diferente con mayor deflexión máxima (14.61 mm) asociado a las propiedades viscoelásticas del material bajo el Procedimiento B.



Fig. 84. Probetas del Teflón comercial durante el ensayo de flexión en tres puntos mostrando la alta flexibilidad característica de este material.

Curva fuerza-deflexión: Nylon comercial



Curva esfuerzo-deformación: Nylon comercial

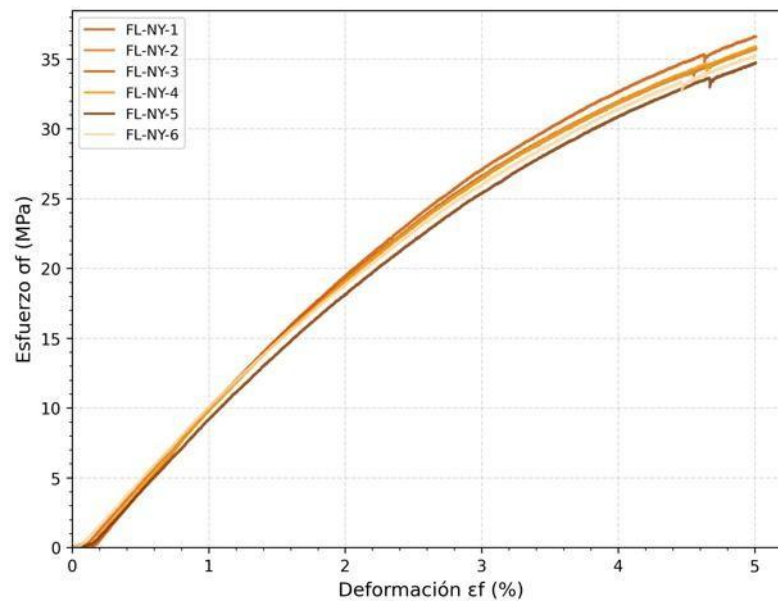


Fig. 85. Curva fuerza-deflexión y esfuerzo-deformación de las seis probetas del Nylon comercial obtenida del ensayo de flexión en tres puntos a 2,56 mm/min según ASTM D790-25.

La curva fuerza-deflexión del Nylon comercial muestra las siguientes regiones:

Región I: Zona elástica lineal (0 a 3 mm)

El Nylon presenta una pendiente inicial de 19.5 N/mm promedio correspondiente al módulo flexural de 1075.44 MPa. Este valor es similar al del Duralón (1150.29 MPa) pero ligeramente inferior lo que refleja las diferencias estructurales entre ambos polímeros comerciales.

Región II: Zona de transición no lineal (3 a 8 mm)

La transición de la zona lineal a la no lineal es suave y gradual en el Nylon con una pérdida de linealidad menos pronunciada que en el Grilon. Las seis probetas muestran una consistencia excepcional en toda esta región con un CV de σ_f de apenas 0.04%.

Región III: Zona de endurecimiento progresivo (8 a 13 mm)

La fuerza continúa aumentando hasta valores entre 165 y 174 N al final del recorrido con una dispersión mínima entre probetas que confirma la homogeneidad del Nylon comercial en flexión. Este comportamiento predecible y consistente es la característica más destacada del Nylon y la que fundamenta su amplia aplicación en componentes de precisión de la industria ecuatoriana.

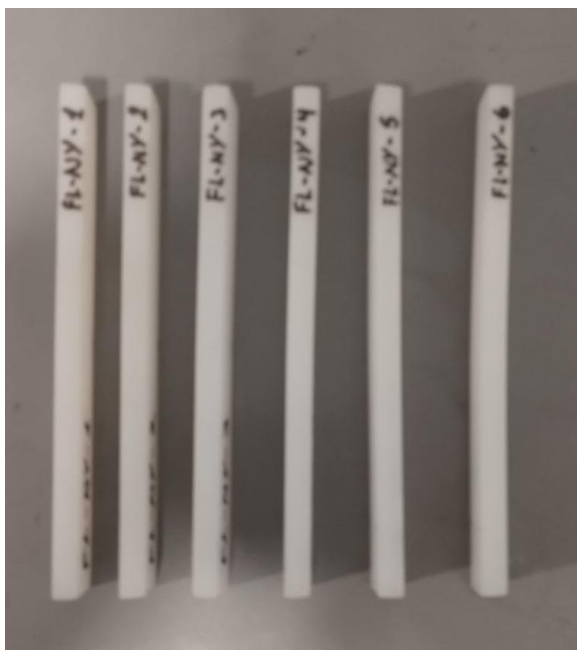


Fig. 86. Probetas del Nylon comercial durante el ensayo de flexión en tres puntos.

Análisis comparativo: ensayo de flexión

Una vez obtenidos los resultados individuales de cada material en flexión, se realiza el análisis comparativo de las propiedades mecánicas flexurales de los cuatro polímeros comerciales ensayados. La Tabla XXVI presenta el resumen estadístico comparativo. Cabe señalar que el Teflón comercial fue ensayado bajo el Procedimiento B (25,6 mm/min) mientras que los demás materiales se ensayaron bajo el Procedimiento A (2,56 mm/min), lo que limita la comparación directa de sus valores absolutos de σ_f y E_f con los otros tres materiales. No obstante, la diferencia en

velocidad no invalida la caracterización individual del Teflón ni su posición relativa en el grupo, dado que su resistencia mecánica es significativamente inferior a la de los demás materiales independientemente de la velocidad de ensayo.

TABLA XXVII. Comparativa de propiedades de flexión: los 4 polímeros.

Material	σ_f (MPa)	E_f (MPa)	ϵ_f
Duralón comercial	28.37	1150.29	0.05004
Grilon comercial	56.14	1934.60	0.05009
Teflón comercial	16.92	679.13	0.05127
Nylon comercial	35.70	1075.44	0.05006

Fuente: Elaboración propia

Los resultados comparativos de la Tabla XXVI revelan el mismo orden jerárquico de resistencia observado en tracción: Grilon comercial mayor que Nylon comercial este a su vez es mayor que el Duralón comercial y este a su vez es mayor que el Teflón comercial. Esta consistencia entre tracción y flexión valida la confiabilidad de los resultados experimentales y confirma que las propiedades mecánicas del material comercial ecuatoriano son reproducibles independientemente del tipo de sollicitación mecánica aplicada. Una observación notable es que la deformación en la fibra extrema (ϵ_f) es prácticamente idéntica para los cuatro materiales con valores entre 0.04981 y 0.05127, lo cual indica que todos los materiales alcanzaron el mismo nivel de deformación relativa al final del recorrido del equipo, siendo las diferencias en resistencia a la flexión atribuibles exclusivamente a las diferencias en rigidez de cada material.

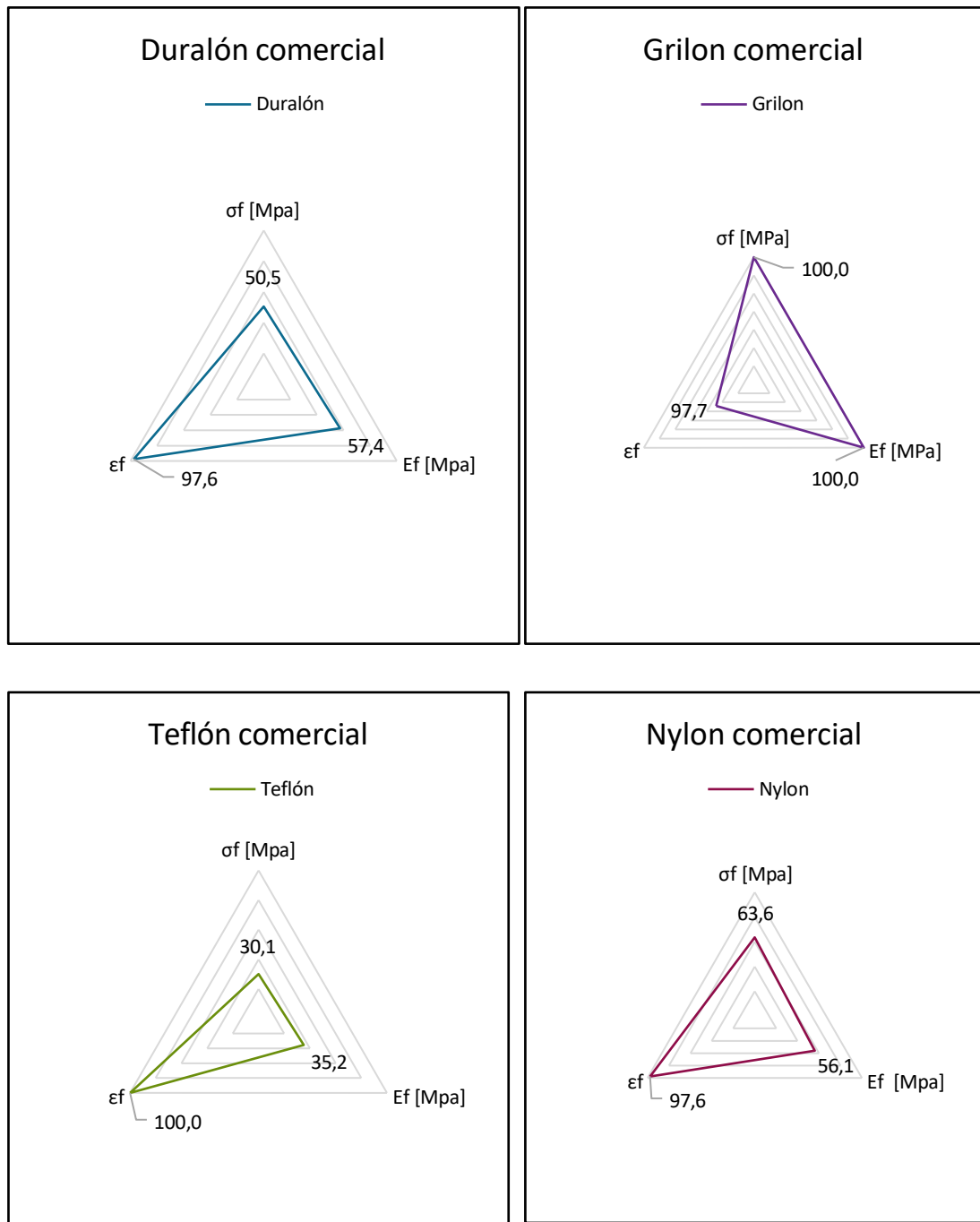


Fig. 87. Diagramas radiales individuales de las propiedades de flexión de cada polímero comercial ensayado. Fuente: Elaboración propia.

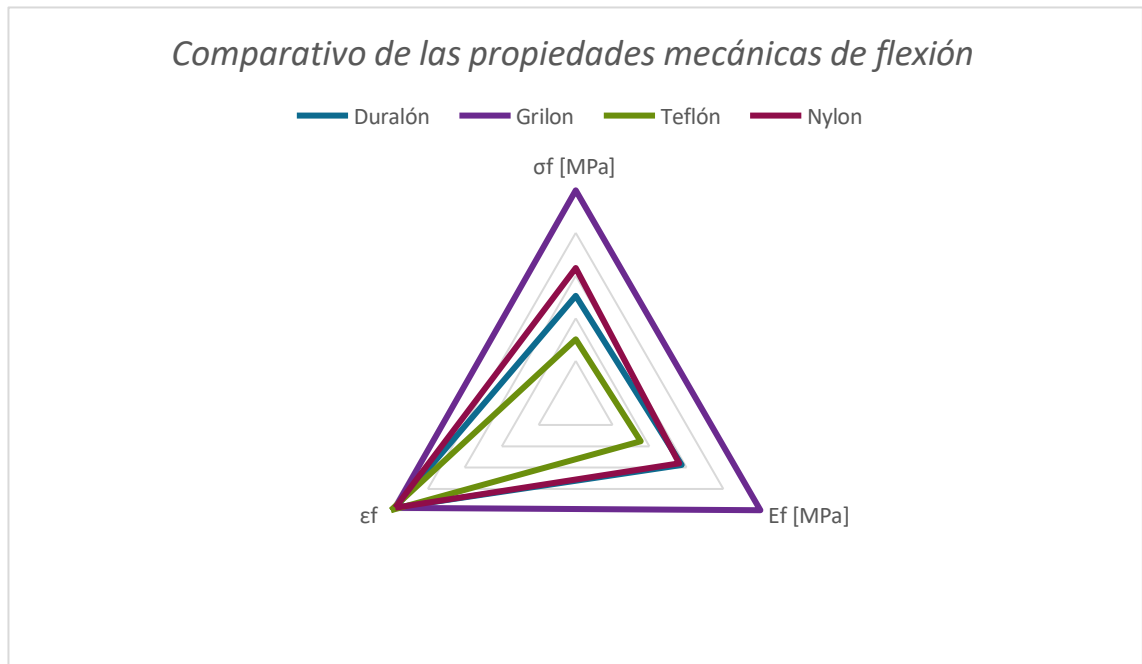


Fig. 88. Diagrama radial comparativo de las propiedades mecánicas de flexión de los cuatro polímeros comerciales: Duralón, Grilon, Teflón y Nylon. Fuente: Elaboración propia.

Las Figuras 88, 89 y 90 presentan las gráficas de barras comparativas de la resistencia a la flexión, el módulo flexural y la deformación de flexión (ϵ_f) de los cuatro materiales respectivamente.

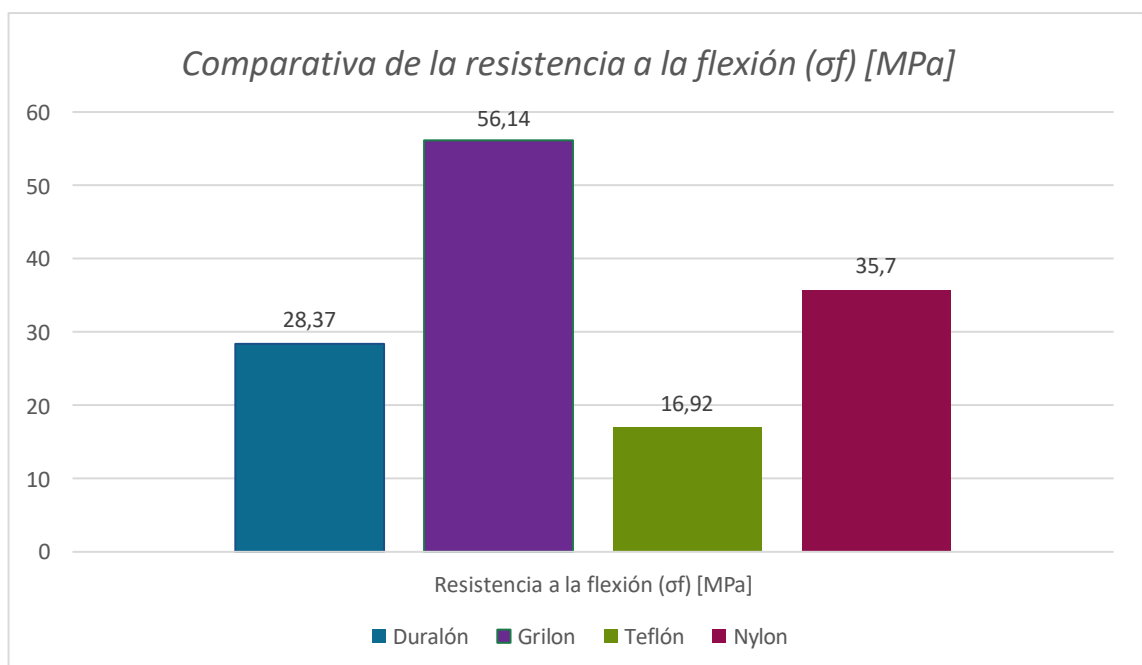


Fig. 89. Comparativa de la resistencia a la flexión (σ_f) de los cuatro polímeros comerciales ensayados con barras de error representando la desviación estándar.

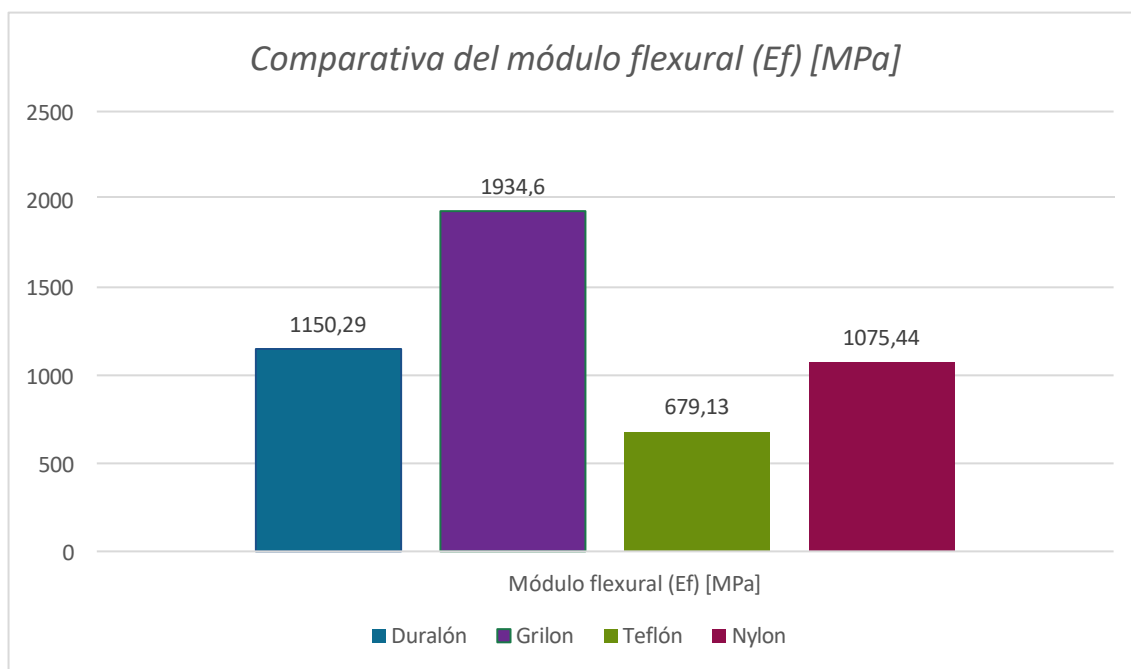


Fig. 90. Comparativa del módulo flexural (E_f) de los cuatro polímeros comerciales ensayados con barras de error representando la desviación estándar.

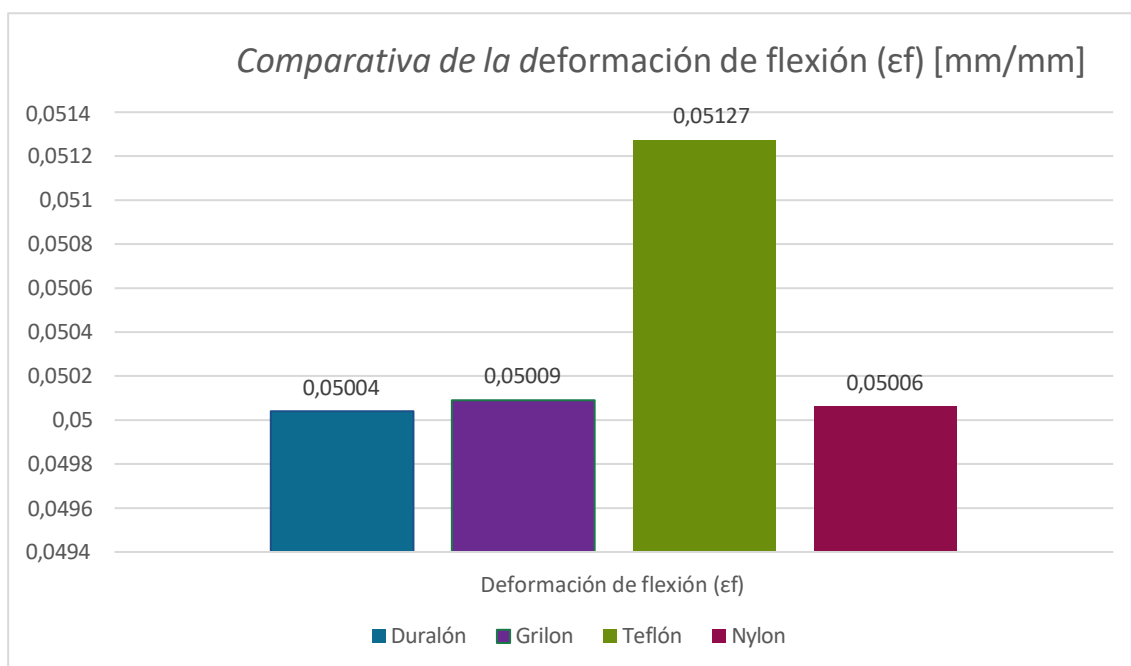


Fig. 91. Comparativa de la deformación de flexión (ϵ_f) de los cuatro polímeros comerciales ensayados con barras de error representando la desviación estándar.

Análisis comparativo general

La Tabla XXVII presenta el resumen consolidado de todas las propiedades mecánicas obtenidas en los ensayos de tracción y flexión de los cuatro materiales poliméricos

comerciales ensayados, constituyendo la base de datos técnica experimental generada por la presente investigación.

TABLA XXVIII. Resumen general de propiedades mecánicas: tracción y flexión.

Material	Sut (MPa)	Sy (MPa)	E (MPa)	%El	σ_f (MPa)	Ef (MPa)	ϵ_f
Duralón comercial	28.83	28.83	1678.66	135,16	28.37	1150.29	0.050
Grilon comercial	61.63	52.99	1944.41	43.35	56.14	1934.60	0.050
Teflón comercial	22.34	22.34	1062.45	171.48	16.92	679.13	0.051
Nylon comercial	49.69	38.02	1467.26	67.26	35.70	1075.44	0.050

Fuente: Elaboración propia

La Tabla XXVII revela patrones consistentes entre los ensayos de tracción y flexión para los materiales comerciales evaluados. El Grilon comercial mantiene su posición de liderazgo en resistencia tanto en tracción (61.63 MPa) como en flexión (56.14 MPa), seguido por el Nylon comercial con 49.69 MPa en tracción y 35.70 MPa en flexión. El Duralón comercial presenta valores de resistencia similares en tracción y flexión (28.83 y 28.37 MPa respectivamente) evidenciando una notable isotropía mecánica del material comercial. El Teflón comercial mantiene los valores más bajos en resistencia en ambos ensayos, pero con la mayor elongación a la rotura en tracción de 171.48%, su propiedad más destacada para aplicaciones de sellado y juntas en la industria ecuatoriana.

Comparación con valores de referencia de la literatura

La Tabla XXVIII contrasta los valores experimentales obtenidos en esta investigación con los reportados en la literatura científica internacional para los mismos materiales, lo que permite evaluar qué tan representativo es el material comercial ecuatoriano frente a los estándares internacionales.

La comparación con literatura internacional se realiza únicamente con fines referenciales. Los valores bibliográficos corresponden a familias poliméricas o grados técnicos reportados en estudios previos, los cuales no necesariamente coinciden con el

lote, proveedor, presentación, grado comercial, acondicionamiento o composición exacta de los materiales ensayados en esta investigación. Por tanto, las diferencias porcentuales se interpretan como desviaciones respecto a valores de referencia y no como una verificación directa de incumplimiento del material comercial.

TABLA XXIX. Comparación referencial entre resultados experimentales y valores de literatura.

Propiedad	Material	Resultado experimental	Rango literatura	Diferencia (%)	Referencia
Sut (MPa)	Duralón comercial	28.83	69.9-74.3	61.2%	Schrank et al. [2]
Sut (MPa)	Grilon comercial	61.63	70–85	18.3%	Song et al. [8]
Sut (MPa)	Teflón comercial	22.34	14–35	Dentro del rango	Mazur et al. [15]
Sut (MPa)	Nylon comercial	49.69	68–88	27.0%	Liao et al. [18]
E tracción (MPa)	Duralón comercial	1678.66	2999–3278	46.6%	Schrank et al. [2]
E tracción (MPa)	Grilon comercial	1944.41	1617–2277	Dentro del rango	Song et al. [8]
E tracción (MPa)	Teflón comercial	1062.45	400–700	51.8%	Mazur et al. [15]
E tracción (MPa)	Nylon comercial	1467.26	1412–1548	Dentro del rango	Liao et al. [18]
% El	Duralón comercial	135,16	36.7–64.4	Superior al rango	Schrank et al. [2]
% El	Grilon comercial	43.35	≥ 50	69.7%	Song et al. [8]
% El	Teflón comercial	171.48	127–220	Dentro del rango	Mazur et al. [15]
% El	Nylon comercial	67.26	~300	92.4%	Liao et al. [18]
σ_f (MPa)	Duralón comercial	28.37	83–100	65.9%	Fombuena [34]

σ_f (MPa)	Grilon comercial	56.14	85–110	34.0%	Fombuena [34]
σ_f (MPa)	Teflón comercial	16.92	11–24	Dentro del rango	Mazur et al. [15]
σ_f (MPa)	Nylon comercial	35.70	100–120	64.3%	Fombuena [34]
E_f (MPa)	Duralón comercial	1150.29	2600–3500	57.3%	Fombuena [34]
E_f (MPa)	Grilon comercial	1934.60	2500–3500	24.6%	Fombuena [34]
E_f (MPa)	Teflón comercial	679.13	500–700	Dentro del rango	Mazur et al. [15]
E_f (MPa)	Nylon comercial	1075.44	2800–3500	62.3%	Fombuena [34]

Fuente: Elaboración propia con base en referencias del Capítulo 1.

Los resultados de la Tabla XXVIII revelan una tendencia general: los materiales poliméricos comerciales ecuatorianos presentan propiedades mecánicas inferiores a los reportados en la literatura internacional. El Teflón comercial presenta valores dentro del rango de referencia en Sut, σ_f y E_f . El Duralón comercial presenta un %El de 135,16% que supera el rango de la literatura (36,7–64,4%), diferencia atribuible a la medición manual sobre la longitud calibrada de 57 mm sin extensómetro, mientras que su Sut y módulos son significativamente inferiores. El Grilon comercial presenta E y Sut parcialmente dentro del rango, pero %El muy inferior. El Nylon comercial presenta E dentro del rango, pero Sut y %El inferiores a la literatura.

En primer lugar, la velocidad de ensayo de 50 mm/min utilizada en tracción es superior a la empleada en los estudios de referencia (5 mm/min) lo que puede inducir efectos viscoelásticos que reducen los valores de módulo de elasticidad medidos. En segundo lugar, la ausencia de extensómetro genera valores de módulo de elasticidad aparentes que incluyen las deformaciones del sistema de sujeción reduciendo los valores calculados respecto a los reales. En tercer lugar, el origen comercial del material puede implicar diferencias en el grado molecular o en el proceso de fabricación respecto a los materiales de referencia internacionales. En cuarto lugar, el espesor de 6 mm de las

probetas es superior al estándar de 3.2 mm lo cual puede influir en la distribución de esfuerzos durante el ensayo.

Diagrama de araña general de los 4 polímeros

La Figura 91 presenta el diagrama de araña general comparativo de todas las propiedades mecánicas obtenidas en los ensayos de tracción y flexión de los cuatro polímeros comerciales, donde cada eje representa una propiedad mecánica normalizada respecto al valor máximo del grupo.

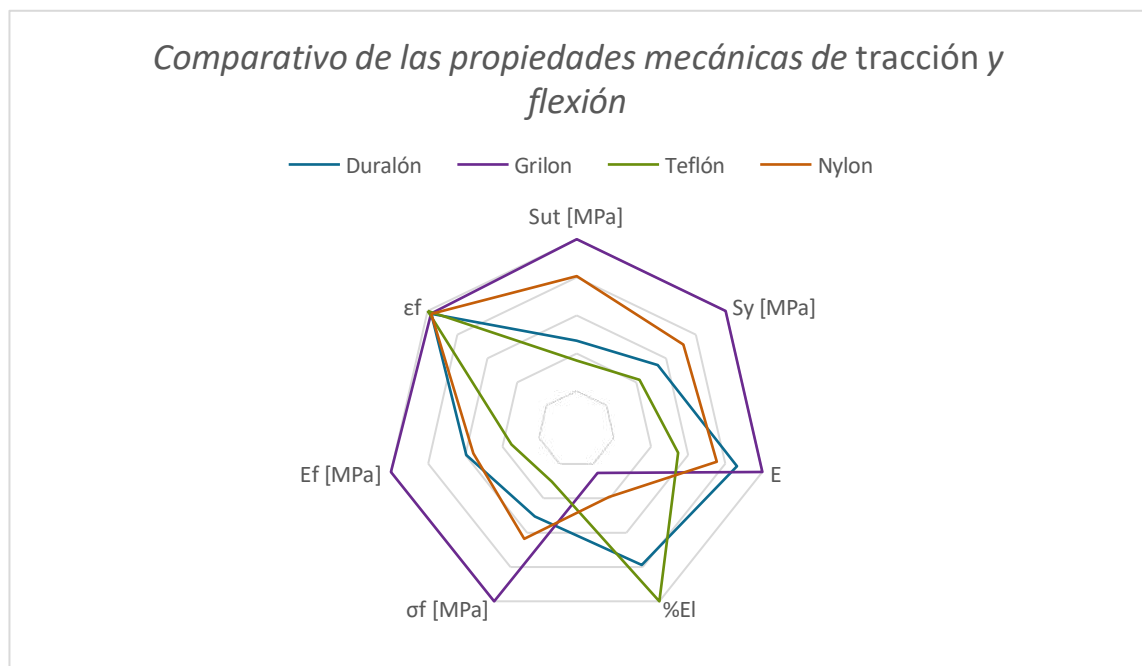


Fig. 92. Diagrama radial general comparativo de las propiedades mecánicas de tracción y flexión de los cuatro polímeros comerciales: Duralón, Grilon, Teflón y Nylon. Fuente: Elaboración propia.

3.2. Verificación de hipótesis

Con base en los resultados experimentales obtenidos en los ensayos de tracción y flexión de los cuatro materiales poliméricos comerciales, se procede a verificar la hipótesis de investigación planteada en el Capítulo 2.

Hipótesis planteada:

Existen diferencias estadísticamente significativas en las propiedades mecánicas de tracción y flexión entre los materiales poliméricos comerciales denominados Duralón, Grilon, Teflón y Nylon, evaluados bajo condiciones normalizadas ASTM.

Análisis estadístico ANOVA

El ANOVA de un factor se aplicó considerando como factor independiente el tipo de material comercial y como variables respuesta las propiedades mecánicas evaluadas. Debido a que se trabajó con seis probetas por material y por ensayo bajo condiciones experimentales controladas, el análisis se empleó como herramienta estadística para contrastar diferencias entre medias. Los resultados deben interpretarse dentro del alcance del tamaño muestral y del lote comercial ensayado.

Para validar la hipótesis se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, sobre las propiedades de resistencia a la tracción (Sut), módulo de elasticidad (E), resistencia a la flexión (σ_f) y módulo flexural (Ef) de los cuatro materiales ensayados.

El ANOVA contrasta dos hipótesis estadísticas internas:

H_0 (hipótesis nula): $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$ (las medias de las propiedades mecánicas son iguales entre los cuatro materiales evaluados)

H_1 (hipótesis alternativa): al menos una $\mu_i \neq \mu_j$ (al menos una de las medias difiere significativamente de las demás)

Si los datos permiten rechazar la hipótesis nula (H_0), queda validada la hipótesis del presente trabajo.

TABLA XXX. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) de las propiedades mecánicas.

Propiedad	F calculado	F crítico	Valor p	Decisión
Resistencia a la tracción (Sut) [MPa]	450,90	3.10	$1,58 \times 10^{-18}$	Se rechaza H_0
Módulo de elasticidad (E) [MPa]	48,04	3.10	$2,52 \times 10^{-9}$	Se rechaza H_0
Resistencia a la flexión (σ_f) [MPa]	212,23	3.10	$2,51 \times 10^{-15}$	Se rechaza H_0
Módulo flexural (Ef) [MPa]	172,86	3.10	$1,81 \times 10^{-14}$	Se rechaza H_0

Fuente: Elaboración propia.

El análisis ANOVA permite determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los materiales evaluados.

Conclusión estadística:

Con base en los resultados del ANOVA, se rechaza la hipótesis nula en las cuatro propiedades evaluadas: resistencia a la tracción, módulo de elasticidad en tracción, resistencia a la flexión y módulo flexural. Por tanto, existe evidencia estadística suficiente para afirmar que los materiales poliméricos comerciales ensayados presentan diferencias significativas en sus propiedades mecánicas bajo las condiciones experimentales aplicadas.

En consecuencia, se acepta la hipótesis de investigación para el conjunto de materiales comerciales evaluados, el lote adquirido, las geometrías normalizadas empleadas y las condiciones de ensayo establecidas por ASTM D638-22 y ASTM D790-25.

Se valida estadísticamente la hipótesis planteada en el Capítulo 2: existen diferencias estadísticamente significativas en las propiedades mecánicas de tracción y flexión entre los materiales poliméricos comerciales denominados Duralón, Grilon, Teflón y Nylon, evaluados bajo condiciones normalizadas ASTM D638-22 y ASTM D790-25.

Este resultado confirma cuantitativamente que los cuatro materiales presentan comportamientos mecánicos diferenciados, lo cual respalda la importancia de la caracterización experimental para la selección adecuada del material en el diseño de componentes mecánicos.

Con el objetivo de visualizar las diferencias entre los materiales poliméricos comerciales evaluados, se presenta en la Fig. 92 una comparación de las cuatro propiedades mecánicas: resistencia a la tracción (S_{ut}), módulo de elasticidad en tracción (E), resistencia a la flexión (σ_f) y módulo flexural (E_f). Los valores corresponden a las medias obtenidas de seis probetas por material, y los módulos se expresan en GPa para facilitar la comparación visual en una misma escala.

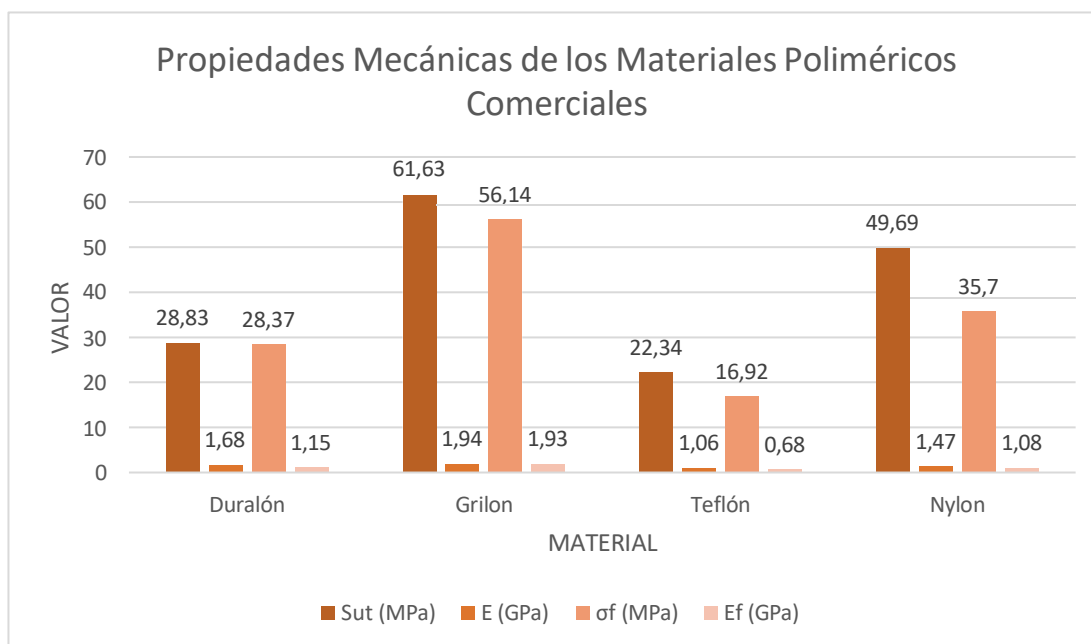


Fig. 93. Comparación de propiedades mecánicas de los materiales poliméricos comerciales evaluados. Los valores corresponden a las medias obtenidas de seis probetas por material. Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Fig. 92, el Grilon presenta los valores más elevados en las cuatro propiedades mecánicas evaluadas, posicionándose como el material de mayor resistencia y rigidez dentro del grupo. El Nylon ocupa el segundo lugar en resistencia, mientras que el Duralón destaca por su estabilidad dimensional y comportamiento intermedio. El Teflón presenta los valores más bajos en resistencia y rigidez, lo cual es consistente con su comportamiento mecánico característico documentado en la literatura. Estas diferencias visualmente evidentes son consistentes con la validación estadística obtenida mediante el análisis de varianza (ANOVA) presentado en esta sección.

3.2.1 Discusión de resultados

Significado de los resultados

Los resultados obtenidos constituyen un conjunto de datos experimentales de referencia sobre las propiedades mecánicas de tracción y flexión de los materiales poliméricos comerciales Duralón, Grilon, Teflón y Nylon, evaluados bajo condiciones normalizadas ASTM D638-22 y ASTM D790-25. Debido a que la identificación de los materiales se basó en su denominación comercial y no en ensayos de identificación química, los resultados son representativos únicamente del lote adquirido, la presentación ensayada, el proveedor, las geometrías normalizadas y las condiciones experimentales aplicadas.

Comparación con la literatura y análisis de diferencias

Las diferencias observadas entre los resultados experimentales y los valores de referencia de la literatura pueden atribuirse a los siguientes factores:

Los ensayos de tracción se realizaron a 50 mm/min, velocidad superior a los 5 mm/min empleados en la mayoría de los estudios de referencia como Schrank et al. [2] que usaron ISO 527 con probetas de inyección. A mayor velocidad de ensayo los polímeros termoplásticos exhiben mayor rigidez aparente pero menor capacidad de deformación, lo cual puede explicar parcialmente los menores valores de elongación observados. Sin embargo este factor no explica completamente las diferencias en resistencia a la tracción que también son significativas.

La ausencia de extensómetro durante los ensayos implica que el módulo de elasticidad calculado por el software Trapezium X corresponde al desplazamiento del travesaño de la máquina, el cual incluye las deformaciones elásticas del sistema de sujeción y las mordazas. Este efecto genera valores de módulo de elasticidad aparentes inferiores a los reales, siendo esta la principal causa de los valores de E inferiores a los reportados en la literatura para el Duralón y el Nylon.

A diferencia de los materiales de referencia empleados en la literatura, que corresponden generalmente a grados técnicos certificados con propiedades controladas, los materiales ensayados en esta investigación fueron adquiridos en el mercado ecuatoriano como insumos industriales de uso general, sin especificaciones de grado molecular ni información sobre el proceso de fabricación. Las diferencias en pureza, aditivos incorporados y condiciones de almacenamiento pueden incidir de forma considerable en las propiedades mecánicas finales del material comercial.

Por otro lado, las probetas fabricadas tienen un espesor de 6 mm, mayor al estándar de 3,2 mm prescrito por ASTM D638-22. Este mayor espesor puede generar gradientes de temperatura y cristalización durante la extrusión de la plancha comercial, afectando la homogeneidad microestructural del material y, con ello, sus propiedades mecánicas.

3.2.2 Implicaciones prácticas para la industria ecuatoriana

Los resultados obtenidos tienen las siguientes implicaciones prácticas directas para la industria mecánica ecuatoriana:

Los ingenieros de diseño en la industria carrocera, textil y metalmecánica de Tungurahua deben utilizar los valores experimentales obtenidos en la presente investigación en lugar de los valores de referencia internacionales para el dimensionamiento de componentes fabricados con materiales adquiridos en el mercado ecuatoriano. El uso de valores de referencia internacionales puede conducir a sobrestimación de las propiedades mecánicas de hasta un 65.9% en el caso del Duralón y hasta un 64.3% en el caso del Nylon.

Para aplicaciones que requieren máxima resistencia mecánica se recomienda el Grilon comercial con $S_{ut} = 61.63 \text{ MPa}$ y $\sigma_f = 56.14 \text{ MPa}$. Para aplicaciones que requieren alta predictibilidad y consistencia mecánica se recomienda el Nylon comercial con el CV más bajo en resistencia a la tracción (2.61%) y módulo de elasticidad (3.70%) de todos los materiales ensayados. Para aplicaciones de sellado y juntas que requieren alta deformación elástica se recomienda el Teflón comercial con elongación de 171.48%. En aplicaciones que demanden buena rigidez combinada con facilidad de procesamiento, el Duralón comercial resulta una opción adecuada dado su comportamiento consistente entre lotes.

La variabilidad entre probetas del Grilon comercial, con CV de hasta 12,87% en el módulo de elasticidad, indica que las propiedades del material comercial pueden diferir entre lotes de producción. Por ello, en aplicaciones críticas de seguridad conviene realizar ensayos de caracterización periódicos sobre cada lote adquirido.

Limitaciones del trabajo

La presente investigación presenta las siguientes limitaciones que deben considerarse al interpretar y aplicar los resultados obtenidos:

La no utilización de extensómetro durante los ensayos de tracción implica que los valores de módulo de elasticidad reportados corresponden a valores aparentes calculados a partir del desplazamiento del travesaño de la máquina Shimadzu AGS-X. Estos valores incluyen las deformaciones elásticas del sistema de sujeción y son inferiores a los valores reales del material. Para obtener valores de módulo de elasticidad más precisos se recomienda repetir los ensayos con extensómetro calibrado según ASTM E83.

La velocidad de tracción de 50 mm/min fue seleccionada para cumplir el criterio de tiempo máximo de 5 minutos por probeta de la norma ASTM D638-22. Sin embargo esta velocidad es superior a los 5 mm/min empleados en la mayoría de los estudios de referencia lo cual limita la comparabilidad directa de los resultados con la literatura internacional. Los valores de módulo de elasticidad y elongación son particularmente sensibles a la velocidad de ensayo en materiales poliméricos viscoelásticos.

Si bien la norma ASTM D638-22 establece 6 probetas por material como mínimo recomendado, ampliar el tamaño de muestra a 10 o más probetas por material fortalecería la caracterización estadística, especialmente para el Grilon comercial, que registró la mayor variabilidad entre probetas de todo el grupo.

Los ensayos se ejecutaron sobre un único lote de material adquirido por un proveedor local, lo cual limita la generalización de los resultados, ya que las propiedades mecánicas pueden variar entre lotes del mismo proveedor o entre distintos distribuidores del mercado ecuatoriano. Extender el estudio a múltiples lotes y proveedores permitiría obtener una caracterización más representativa del material comercial disponible localmente.

Ninguna probeta alcanzó la fractura en los ensayos de flexión debido a la alta ductilidad de los materiales en esa sollicitación. Los valores reportados corresponden a la fuerza y el esfuerzo máximos alcanzados dentro del rango de desplazamiento del equipo (≈ 13 mm), no a los valores reales de rotura. Para determinar la resistencia máxima a la flexión hasta fractura se requiere un equipo con mayor recorrido del travesaño.

El acondicionamiento de las probetas se realizó bajo las condiciones ambientales del laboratorio CIDIIE durante 70 horas. Aunque las condiciones registradas de 23.6 °C y 50% HR son consistentes con las prescritas por la norma ASTM D618-21, no se dispuso de una cámara de acondicionamiento con control automático de temperatura y humedad que garantice la uniformidad exacta de las condiciones durante todo el período.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Se fabricaron exitosamente 56 probetas normalizadas de los cuatro materiales poliméricos comerciales mediante corte por chorro de agua en ALUVID GLASS CIA. LTDA. de la ciudad de Ambato, obteniendo 28 probetas Tipo I según ASTM D638 para los ensayos de tracción y 28 probetas rectangulares según ASTM D790 para los ensayos de flexión, verificando una relación $L/d = 16:1$ conforme a la norma. El proceso de corte por chorro de agua permitió obtener probetas con dimensiones controladas sin generar alteraciones térmicas en las propiedades mecánicas de los materiales poliméricos ensayados.
- Los ensayos de tracción bajo la norma ASTM D638 determinaron que el Grilon comercial presenta la mayor resistencia a la tracción con $S_{ut} = 61.63$ MPa y el mayor módulo de elasticidad con $E = 1944.41$ MPa del grupo ensayado, seguido del Duralón comercial con $E = 1678.66$ MPa y del Nylon con $E = 1467.26$ MPa. El Nylon comercial supera al Duralón comercial en resistencia a la tracción ($S_{ut} = 49.69$ MPa vs 28.83 MPa). El Teflón comercial presenta la menor resistencia mecánica con $S_{ut} = 22.34$ MPa pero la mayor elongación a la rotura con $\%El = 171.48\%$ medido sobre la longitud calibrada de 57 mm según ASTM D638. Estos resultados corresponden al lote de material adquirido por un distribuidor local en la ciudad de Ambato y no deben generalizarse a la totalidad de materiales poliméricos comerciales disponibles en el mercado ecuatoriano.
- Los ensayos de flexión en tres puntos realizados bajo la norma ASTM D790 con una luz entre apoyos de 96 mm (relación $L/d = 16:1$) determinaron que el Grilon comercial presenta la mayor resistencia a la flexión con $\sigma_f = 56.14$ MPa y el mayor módulo flexural con $E_f = 1934.60$ MPa, seguido del Nylon comercial con $\sigma_f = 35.70$ MPa y $E_f = 1075.44$ MPa, el Duralón comercial con $\sigma_f = 28.37$ MPa y $E_f = 1150.29$ MPa, y el Teflón comercial con los valores más bajos del grupo con $\sigma_f = 16.92$ MPa y $E_f = 679.13$ MPa. Ninguna probeta

alcanzó la fractura dentro del rango de desplazamiento disponible del equipo, reportándose los valores máximos alcanzados al límite del recorrido del travesaño.

- El análisis comparativo de los resultados experimentales con los valores reportados en la literatura científica internacional revela que los materiales poliméricos comerciales adquiridos en el contexto local analizado presentan diferencias respecto a los valores bibliográficos de referencia en la mayoría de las propiedades evaluadas. El Duralón comercial presenta un $\%El = 135,16\%$ superior al rango de la literatura (36,7–64,4%), siendo el único parámetro del Duralón comercial que supera el rango de referencia internacional. Por su parte, el Teflón comercial presenta Sut , σ_f y E_f dentro de los rangos de referencia. Sin embargo, Sut , E , σ_f y E_f del Duralón, Grilon y Nylon comerciales son inferiores a los rangos internacionales con diferencias de hasta 65,9%, atribuibles al origen comercial del material, la velocidad de ensayo de 50 mm/min y la ausencia de extensómetro durante los ensayos. Estas diferencias son válidas para el lote ensayado y no pueden extrapolarse a otros proveedores, lotes o espesores de plancha distintos a los empleados en esta investigación.
- Se cumple el objetivo de la investigación: se analizaron experimentalmente las propiedades mecánicas de tracción y flexión de los materiales poliméricos comerciales denominados Duralón, Grilon, Teflón y Nylon, demostrándose estadísticamente mediante el análisis de varianza (ANOVA) que existen diferencias significativas entre los cuatro materiales en las propiedades evaluadas ($p < 0.001$ en todos los casos). La resistencia a la tracción varía entre 22,34 MPa (Teflón comercial) y 61,63 MPa (Grilon comercial) con una diferencia de 176%, el módulo de elasticidad varía entre 1062,45 MPa (Teflón comercial) y 1944,41 MPa (Grilon comercial) con una diferencia de 83%, la elongación varía entre 43,35% (Grilon comercial) y 171,48% (Teflón comercial) con una diferencia de 296%, la resistencia a la flexión varía entre 16,92 MPa (Teflón comercial) y 56,14 MPa (Grilon comercial) con una diferencia de 232% y el módulo flexural varía entre 679,13 MPa (Teflón comercial) y 1934,60 MPa (Grilon comercial) con una diferencia de 185%.

- La caracterización mecánica experimental de los materiales poliméricos comerciales denominados Duralón, Grilon, Teflón y Nylon adquiridos en la presente investigación, generó un conjunto de datos experimentales de propiedades mecánicas de tracción y flexión obtenidos bajo condiciones normalizadas ASTM D638 y ASTM D790. Los resultados obtenidos constituyen un aporte técnico de referencia para la selección preliminar de materiales en componentes mecánicos, válido para el lote, proveedor, espesor y condiciones de ensayo empleadas en esta investigación. El uso de valores de referencia internacionales puede conducir a una sobrestimación de las propiedades mecánicas del orden del 65,9% para los materiales y condiciones específicas analizadas en esta investigación.

4.2. Recomendaciones

- Desde el punto de vista estadístico, ampliar el número de probetas a un mínimo de 10 por material así el ensayo fortalecería la confiabilidad de los resultados. Esto es especialmente necesario para el Grilon comercial y el Duralón comercial, ya que presentan variaciones significativas.
- Para evaluar la consistencia del suministro comercial, se recomienda extender el estudio a varios lotes de material provenientes de diferentes distribuidores. Este análisis de variabilidad entre lotes y proveedores es fundamental para el control de calidad en aplicaciones industriales de la industria carrocera y metalmecánica regional.
- Con el fin de completar el perfil mecánico de los materiales caracterizados, resulta conveniente incorporar ensayos de impacto (ASTM D256), dureza (ASTM D785) y resistencia a la fatiga (ASTM D671). Contar con estas propiedades adicionales ampliaría considerablemente las posibilidades de aplicación en el diseño de componentes sometidos a distintos tipos de sollicitación.
- Finalmente, se propone extender la metodología desarrollada a otros polímeros presentes en el mercado ecuatoriano, tales como el Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular, la Poliamida 12 y el Policarbonato. Ello permitiría construir una base de datos técnica más amplia y representativa de los materiales poliméricos disponibles localmente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Harun-Ur-Rashid and A. Bin Imran, «Emerging Trends in Engineering Polymers: A Paradigm Shift in Material Engineering», *Recent Progress in Materials*, vol. 6, n° .3, pp. 1-37, sep. 2024, doi: 10.21926.
- [2] T. Schrank, B. Ramoa, M. Feuchter, G. Pinter, R. Pantani, y M. Berer, «Morphological structure and mechanical properties of a nucleated Polyoxymethylene (POM) homopolymer resin processed under conventional injection molding conditions», *Polym. Test.*, vol. 134, p. 108444, may 2024, doi: 10.1016/J.POLYMERTESTING.2024.108444.
- [3] M. Fischer, C. Blanco, Y. Spoerer, M. Stommel, y I. Kuehnert, «Correlations between molecular weight, mechanical properties and morphology of micro-injection molded polyoxymethylene (POM)», *Polym. Test.*, vol. 140, p. 108626, nov. 2024, doi: 10.1016/J.POLYMERTESTING.2024.108626.
- [4] H. Zhang *et al.*, «Comparative study on the mechanical, tribological, and thermal properties of POM composites filled with different PTFE», *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 35, n.º 9, pp. 1319-1341, sep. 2022, doi: 10.1177/0892705720932620.
- [5] Y. Su, Q. Gao, Y. Chang, G. Chen, C. Wei, y C. Ren, «Study on the mechanical, friction and wear properties of modified polyoxymethylene under free abrasive condition», *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 140, n.º 26, jul. 2023, doi: 10.1002/APP.53997.
- [6] M. Jain y S. Patil, «A review on materials and performance characteristics of polymer gears», *Proc. Inst. Mech. Eng. C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 237, n.º 12, pp. 2762-2790, jun. 2023, doi: 10.1177/09544062221142155.
- [7] M. Hriberšek y S. Kulovec, «Thermal and durability characterization of polyacetal and polyamide gear pairs», *Journal of Mechanical Science and Technology 2021 35:8*, vol. 35, n.º 8, pp. 3389-3394, jul. 2021, doi: 10.1007/S12206-021-0712-Z.
- [8] P. Song, A. Trivedi, N. Hawkins, A. Graham, D. Chapman, y C. R. Siviour, «Thermomechanical characterisation of polyamide 6 over a wide range of rates

- and temperatures», *Polymer (Guildf)*, vol. 300, p. 126907, abr. 2024, doi: 10.1016/J.POLYMER.2024.126907.
- [9] P. Song *et al.*, «Thermomechanical and damage characterisation of short glass fibre reinforced polyamide 6 and impact-modified polyamide 6 composites», *Compos. B Eng.*, vol. 287, p. 111767, dic. 2024, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2024.111767.
- [10] L. Feroz Ali, R. Raghul, M. Yogesh Muthu Ram, V. Harshavardhan Reddy, y N. Shakil Kanna, «Evaluation of the polyamide's mechanical properties for varying infill percentage in FDM process», *Mater. Today Proc.*, vol. 68, pp. 2509-2514, ene. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2022.09.227.
- [11] I. Pivdiablyk, P. Rozycki, F. Jacquemin, L. Gornet, y S. Auger, «Experimental analysis of mechanical performance of glass fibre reinforced polyamide 6 under varying environmental conditions», *Compos. Struct.*, vol. 245, p. 112338, ago. 2020, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2020.112338.
- [12] «Practice for Conditioning Plastics for Testing», jul. 2021, doi: 10.1520/D0618-21.
- [13] «Test Method for Tensile Properties of Plastics», jul. 2022, doi: 10.1520/D0638-22.
- [14] M. Chernets, Y. Chernets, Y. Skvarok, y J. Zubrzycki, «Investigation of Wear Resistance of Polyamide PA6 Based Composite Materials for Metal-Polymer Plain Bearings and Gears», *Tribology in Industry*, vol. 45, n.º 4, pp. 643-649, 2023, doi: 10.24874/TI.1526.07.23.09.
- [15] K. Mazur, A. Gadek-Moszczak, A. Liber-Knec, y S. Kuciel, «Mechanical Behavior and Morphological Study of Polytetrafluoroethylene (PTFE) Composites under Static and Cyclic Loading Condition», *Materials 2021, Vol. 14, Page 1712*, vol. 14, n.º 7, p. 1712, mar. 2021, doi: 10.3390/MA14071712.
- [16] C. Luo, J. Pei, W. Zhuo, Y. Niu, y G. Li, «Phase transition behavior and deformation mechanism of polytetrafluoroethylene under stretching», *RSC Adv.*, vol. 11, n.º 63, pp. 39813-39820, dic. 2021, doi: 10.1039/D1RA06333B.

- [17] N. Vidakis *et al.*, «Nanocomposites with Optimized Polytetrafluoroethylene Content as a Reinforcement Agent in PA12 and PLA for Material Extrusion Additive Manufacturing», *Polymers* 2023, Vol. 15, Page 2786, vol. 15, n.º 13, p. 2786, jun. 2023, doi: 10.3390/POLYM15132786.
- [18] G. Liao, Z. Li, C. Luan, Z. Wang, X. Yao, y J. Fu, «Additive Manufacturing of Polyamide 66: Effect of Process Parameters on Crystallinity and Mechanical Properties», *Journal of Materials Engineering and Performance* 2021 31:1, vol. 31, n.º 1, pp. 191-200, ago. 2021, doi: 10.1007/S11665-021-06149-6.
- [19] N. Rosic, M. Mollo, C. Bernal, y F. Cosmi, «The effect of microstructure on the tensile and impact behaviour of short-glass fibre-reinforced polyamide 6.6 as assessed by micro-computed tomography», *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 238, n.º 1, pp. 39-49, ene. 2024, doi: 10.1177/14644207231181315.
- [20] T. Pilz, F. Melzer, R. Dahlmann, y C. Hopmann, «Calculation of the macroscopic mechanical properties of polyamide 6.6 underwater influence using molecular dynamics simulations, hyperelastic material modeling of the amorphous fraction, and homogenization schemes», *Polym. Adv. Technol.*, vol. 34, n.º 12, pp. 3722-3734, dic. 2023, doi: 10.1002/PAT.6172.
- [21] R. Beyaz, A. Ekinici, Z. Yurtbasi, M. Oksuz, M. Ates, y I. Aydin, «Thermal, electrical and mechanical properties of carbon fiber/copper powder/carbon black reinforced hybrid Polyamide 6,6 composites», *High Perform. Polym.*, vol. 35, n.º 2, pp. 103-114, mar. 2023, doi: 10.1177/09540083221114752.
- [22] M. M. Y. Zaghloul, K. Steel, M. Veidt, y M. T. Heitzmann, «Mechanical and Tribological Performances of Thermoplastic Polymers Reinforced with Glass Fibres at Variable Fibre Volume Fractions», *Polymers* 2023, Vol. 15, Page 694, vol. 15, n.º 3, p. 694, ene. 2023, doi: 10.3390/POLYM15030694.
- [23] S. Shashikumar y M. S. Sreekanth, «Investigation on mechanical properties of polyamide 6 and carbon fiber reinforced composite manufactured by fused deposition modeling technique», *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 37, n.º 5, pp. 1730-1747, may 2024, doi: 10.1177/08927057231200006.

- [24] I. O. Oladele, T. F. Omotosho, y A. A. Adediran, «Polymer-Based Composites: An Indispensable Material for Present and Future Applications», *Int. J. Polym. Sci.*, vol. 2020, n.º 1, p. 8834518, ene. 2020, doi: 10.1155/2020/8834518.
- [25] S. Kangishwar, N. Radhika, A. A. Sheik, A. Chavali, y S. Hariharan, «A comprehensive review on polymer matrix composites: material selection, fabrication, and application», *Polymer Bulletin*, vol. 80, n.º 1, pp. 47-87, ene. 2023, doi: 10.1007/S00289-022-04087-4.
- [26] «Caracterización de las propiedades mecánicas del Duralón - R | REDI». Accedido: 6 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://redi.cedia.edu.ec/document/75119>
- [27] W. F. J. Castro y R. Z. Sánchez, «Diagnóstico del sector automotriz del Ecuador. Caso fabricación de autobuses en la provincia de Tungurahua», *REVISTA ENIAC PESQUISA*, vol. 9, n.º 2, pp. 212-226, ago. 2020, doi: 10.22567/REP.V9I2.638.
- [28] J. G. P. Salinas, C. F. P. Salinas, y C. B. C. Miniguano, «Análisis de las propiedades mecánicas del compuesto de matriz poliéster reforzado con fibra de vidrio 375 y cabuya aplicado a la industria automotriz», *Enfoque UTE*, vol. 8, n.º 3, pp. 1-15, jun. 2017, doi: 10.29019/ENFOQUEUTE.V8N3.163.
- [29] M. P. L. Encalada y Á. D. S. Cueva², «Efectos post pandemia en el desempeño del sector industrial textil ecuatoriano de ropa liviana: periodo 2020-2021», *ECA Sinergia*, vol. 14, n.º 3, pp. 129-141, sep. 2023, doi: 10.33936/ECASINERGIA.V14I3.5665.
- [30] «Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials», dic. 2025, doi: 10.1520/D0790-25.
- [31] M. P. . Groover, *Fundamentals of modern manufacturing : materials, processes, and systems*, 3.^a ed. México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana Editores, 2007.
- [32] «Practices for Force Calibration and Verification of Testing Machines», sep. 2024, doi: 10.1520/E0004-24.
- [33] «Terminology Relating to Plastics», ene. 2025, doi: 10.1520/D0883-25.

- [34] Vicent. Fombuena Borràs, O. A. Fenollar Gimeno, y N. Montañes Moñoz, *Caracterización de materiales poliméricos*. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, 2016.
- [35] A. Aristizábal Castrillón y M. R. Manrique Torres, *Ensayos y propiedades de los materiales*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA, 2017. Accedido: 12 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://elibro.net/es/lc/uta/titulos/145913>
- [36] «Test Methods for Physical Dimensions of Solid Plastics Specimens», abr. 2024, doi: 10.1520/D5947-24.

ANEXOS

Anexo 1: Informe técnico de ensayos de Tracción de los 4 polímeros comerciales.

Anexo 2: Informe técnico de ensayos de Flexión de los 4 polímeros comerciales.

Anexo 3: Fichas técnicas de los materiales comerciales proporcionadas por
proveedores locales.

Anexo 4: Plano de la probeta para ensayos de Tracción y Flexión.

ANEXO 1



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN DEL DISEÑO INDUSTRIAL
INNOVACIÓN Y EMPRENDIMIENTO**

CIDIIE

INFORME TÉCNICO DE PRÁCTICA

ENSAYO DE TRACCIÓN

Nombre del estudiante/investigador: Paúl Tamayo

Carrera/Facultad: Ingeniería Mecánica

Fecha: 14/05/2026



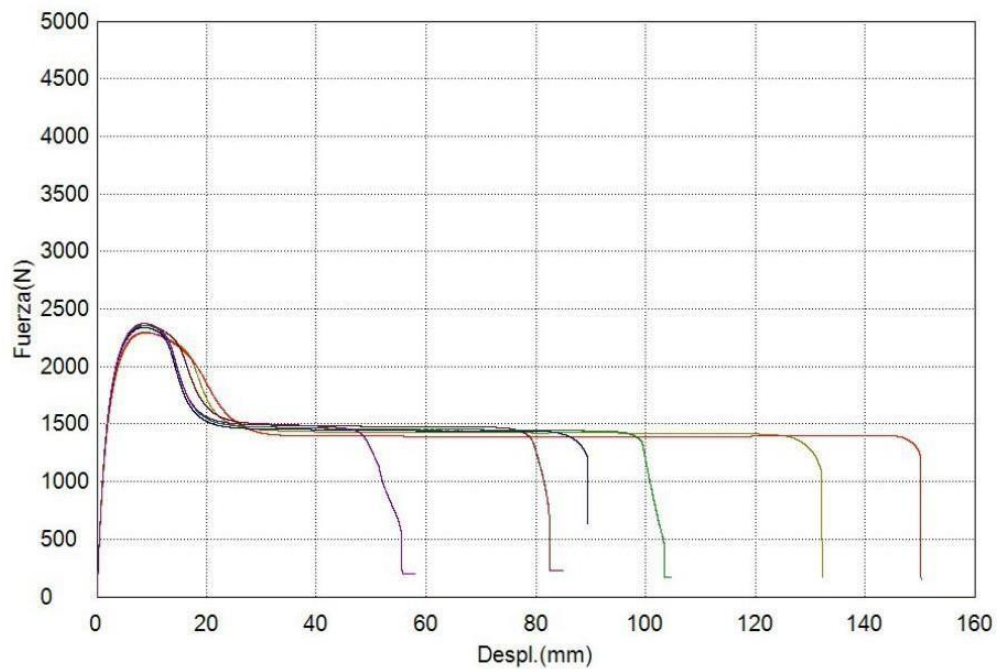
Ensayo Duralón

Palabra llave		Nombre de producto	
Nombre de archivo de ensayo	Ensayo duralon.xtas	Nombre de metodo de ensayo	Paul Tamayo duralón.xmas
Fecha de informe	22/5/2026	Fecha de ensayo	4/5/2026
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Traccion
Velocidad	50mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Nº de muestras:	6

Nombre	Rotura_Fuerza	Max_Fuerza	Max_Desplazamiento	Max_Deformacion
Parametros	Sensibilidad 10	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	N	N	mm	%
TR-DL-1	1198.03	2296.25	8.85962	7.70402
TR-DL-2	661.103	2355.76	8.72626	7.58805
TR-DL-3	547.147	2372.17	8.57627	7.45762
TR-DL-4	-	2358.54	8.62628	7.50111
TR-DL-5	1211.42	2338.79	8.49294	7.38517
TR-DL-6	1078.87	2291.68	9.02628	7.84894
Media	939.314	2335.53	8.71794	7.58082
Desviacion Estandar	312.909	33.9340	0.19714	0.17142
Rango	664.273	80.4900	0.53334	0.46377

Nombre	Max_Tiempo	M.Elastico	Rotura_Tension	Max_Tension
Parametros	Calc. at Entire Areas	Fuerza 10 – 20 N	Sensibilidad 10	Calc. at Entire Areas
Unidad	seg	MPa	MPa	MPa
TR-DL-1	10.6400	1634.10	14.7905	28.3488
TR-DL-2	10.4800	1624.78	8.16177	29.0834
TR-DL-3	10.3000	1685.68	6.75490	29.2860
TR-DL-4	10.3600	1749.53	-	29.1178
TR-DL-5	10.2000	1708.71	14.9558	28.8740
TR-DL-6	10.8400	1669.15	13.3194	28.2923
Media	10.4700	1678.66	11.5965	28.8337
Desviacion Estandar	0.23656	46.8058	3.86308	0.41893
Rango	0.64000	124.750	8.20090	0.99370

Nombre	Rotura_Desplazamiento
Parametros	Sensibilidad 10
Unidad	mm
TR-DL-1	150.185
TR-DL-2	82.5180
TR-DL-3	55.5263
TR-DL-4	-
TR-DL-5	89.4180
TR-DL-6	132.126
Media	101.955
Desviacion Estandar	38.4936
Rango	94.6587



Comentarios

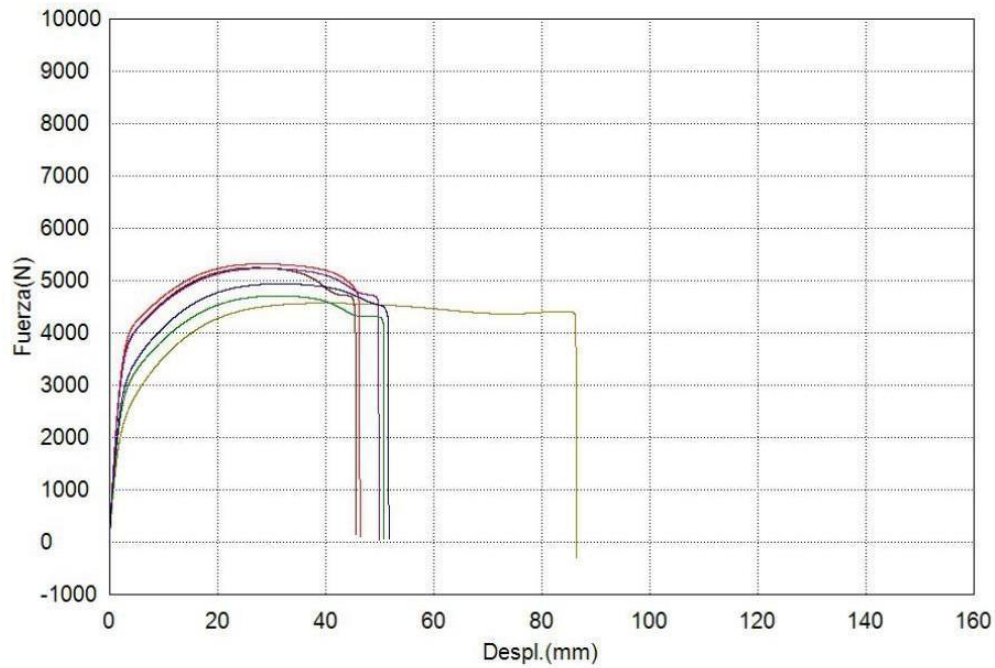
Ensayo Grilón

Palabra llave		Nombre de producto	
Nombre de archivo de ensayo	Ensayo grilon.xtas	Nombre de metodo de ensayo	Paul Tamayo grilón.xmas
Fecha de informe	22/5/2026	Fecha de ensayo	6/5/2026
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Traccion
Velocidad	50mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Nº de muestras:	6

Nombre	Rotura_Fuerza	Rotura_Tension	M.Elastico	Max_Fuerza
Parametros	Sensibilidad 10	Sensibilidad 10	Fuerza 10 – 20 N	Calc. at Entire Areas
Unidad	N	MPa	MPa	N
TR-GR-1	4418.35	50.3516	1932.01	5307.79
TR-GR-2	4295.21	48.9482	2155.28	5234.94
TR-GR-3	4575.38	52.1411	2277.17	5222.34
TR-GR-4	4036.84	46.0039	1617.32	4698.71
TR-GR-5	4181.10	47.6479	1719.38	4928.01
TR-GR-6	4247.82	48.4082	1965.30	4558.46
Media	4292.45	48.9168	1944.41	4991.71
Desviacion Estandar	187.422	2.13586	250.365	313.008
Rango	538.540	6.13720	659.850	749.330

Nombre	Max_Desplazamiento	Max_Deformacion	Max_Tiempo	Rotura_Desplazamiento
Parametros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Sensibilidad 10
Unidad	mm	%	seg	mm
TR-GR-1	28.3596	24.6605	34.0400	46.3263
TR-GR-2	27.4263	23.8489	32.9200	45.5263
TR-GR-3	28.6680	24.9287	34.4100	49.8429
TR-GR-4	31.4346	27.3344	37.7300	50.8013
TR-GR-5	31.8096	27.6605	38.1800	51.6846
TR-GR-6	40.1263	34.8924	48.1600	86.3513
Media	31.3041	27.2209	37.5733	55.0888
Desviacion Estandar	4.66391	4.05557	5.59669	15.5117
Rango	12.7000	11.0435	15.2400	40.8250

Nombre	Max_Tension
Parametros	Calc. at Entire Areas
Unidad	MPa
TR-GR-1	60.4876
TR-GR-2	59.6575
TR-GR-3	59.5138
TR-GR-4	53.5465
TR-GR-5	56.1597
TR-GR-6	51.9483
Media	56.8856
Desviacion Estandar	3.56704
Rango	8.53930



Comentarios

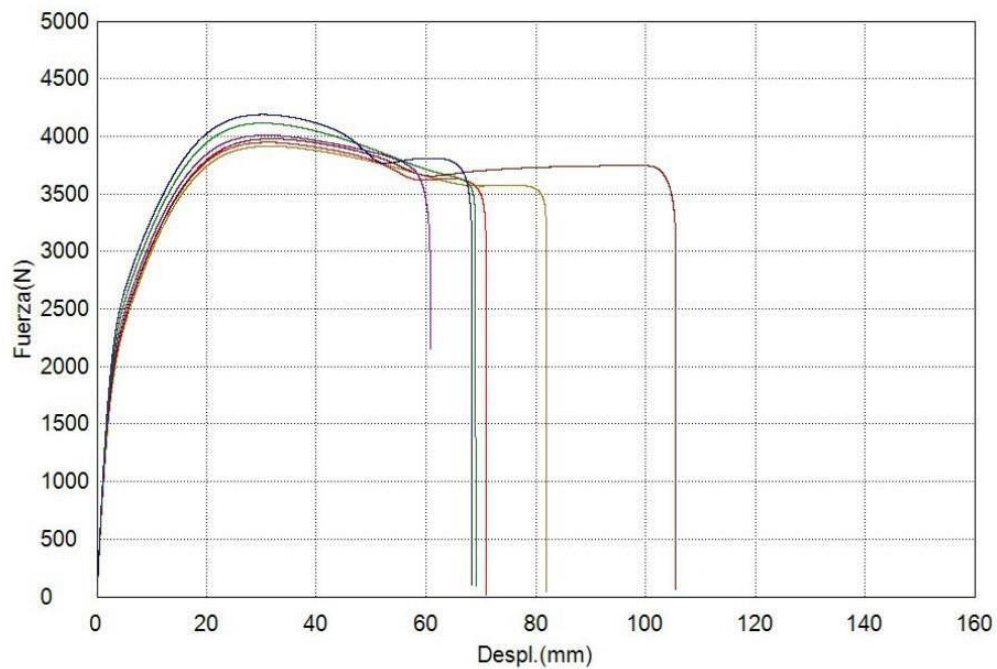
Ensayo Nylon

Palabra llave		Nombre de producto	
Nombre de archivo de ensayo	Ensayo nylon.xtas	Nombre de metodo de ensayo	Paul Tamayo nylon.xmas
Fecha de informe	22/5/2026	Fecha de ensayo	4/5/2026
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Traccion
Velocidad	50mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Nº de muestras:	6

Nombre	Max_Fuerza	Max_Desplazamiento	Max_Tiempo	M.Elastico
Parametros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Fuerza 10 – 20 N
Unidad	N	mm	seg	MPa
TR-NY-1	3947.64	31.1013	37.3300	1451.42
TR-NY-2	3978.47	31.7513	38.1100	1412.15
TR-NY-3	4008.35	30.8513	37.0300	1493.76
TR-NY-4	4113.21	30.2179	36.2700	1491.03
TR-NY-5	4188.11	30.4346	36.5300	1548.17
TR-NY-6	3914.08	31.6763	38.0200	1407.03
Media	4024.98	31.0055	37.2150	1467.26
Desviacion Estandar	104.991	0.63014	0.75614	54.2759
Rango	274.030	1.53340	1.84000	141.140

Nombre	Rotura_Fuerza	Rotura_Desplazamiento	Rotura_Tension	Max_Deformacion
Parametros	Sensibilidad 10	Sensibilidad 10	Sensibilidad 10	Calc. at Entire Areas
Unidad	N	mm	MPa	%
TR-NY-1	3147.52	70.8846	38.8583	27.0446
TR-NY-2	3161.48	105.451	39.0306	27.6098
TR-NY-3	2702.59	60.7763	33.3653	26.8272
TR-NY-4	3243.36	68.9846	40.0415	26.2765
TR-NY-5	3140.83	68.3096	38.7757	26.4649
TR-NY-6	3080.52	81.9429	38.0311	27.5446
Media	3079.38	76.0582	38.0171	26.9613
Desviacion Estandar	191.844	15.9308	2.36846	0.54792
Rango	540.770	44.6747	6.67620	1.33330

Nombre	Max_Tension
Parametros	Calc. at Entire Areas
Unidad	MPa
TR-NY-1	48.7363
TR-NY-2	49.1169
TR-NY-3	49.4858
TR-NY-4	50.7803
TR-NY-5	51.7050
TR-NY-6	48.3220
Media	49.6911
Desviacion Estandar	1.29616
Rango	3.38300



Comentarios

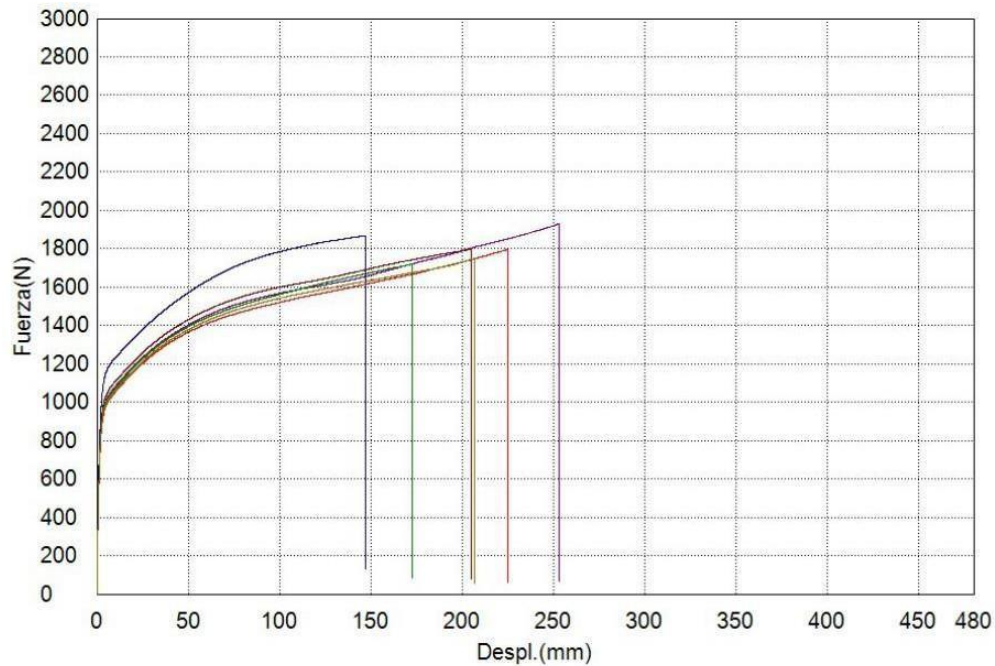
Ensayo Teflón

Palabra llave		Nombre de producto	
Nombre de archivo de ensayo	Ensayo teflon.xtas	Nombre de metodo de ensayo	Paul Tamayo teflón.xmas
Fecha de informe	22/5/2026	Fecha de ensayo	6/5/2026
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Traccion
Velocidad	50mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Nº de muestras:	6

Nombre	Rotura_Fuerza	Rotura_Tension	Rotura_Desplazamiento	M.Elastico
Parametros	Sensibilidad 10	Sensibilidad 10	Sensibilidad 10	Fuerza 10 – 20 N
Unidad	N	MPa	mm	MPa
TR-TF-1	1796.64	22.1807	224.960	1026.46
TR-TF-2	1796.87	22.1836	205.043	1063.65
TR-TF-3	1928.91	23.8137	252.910	1053.87
TR-TF-4	1719.97	21.2342	172.776	1034.34
TR-TF-5	1866.97	23.0490	146.826	1134.88
TR-TF-6	1748.92	21.5916	206.851	1061.48
Media	1809.71	22.3421	201.561	1062.45
Desviacion Estandar	76.9048	0.94944	37.5469	38.4904
Rango	208.940	2.57950	106.084	108.420

Nombre	Max_Fuerza	Max_Desplazamiento	Max_Deformacion	Max_Tiempo
Parametros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	N	mm	%	seg
TR-TF-1	1796.64	224.960	195.617	269.960
TR-TF-2	1797.01	205.018	178.277	246.030
TR-TF-3	1928.99	252.893	219.907	303.480
TR-TF-4	1720.07	172.760	150.226	207.320
TR-TF-5	1866.97	146.826	127.675	176.200
TR-TF-6	1748.92	206.851	179.871	248.230
Media	1809.77	201.551	175.262	241.870
Desviacion Estandar	76.9016	37.5442	32.6471	45.0530
Rango	208.920	106.067	92.2320	127.280

Nombre	Max_Tension
Parametros	Calc. at Entire Areas
Unidad	MPa
TR-TF-1	22.1807
TR-TF-2	22.1853
TR-TF-3	23.8147
TR-TF-4	21.2354
TR-TF-5	23.0490
TR-TF-6	21.5916
Media	22.3428
Desviacion Estandar	0.94941
Rango	2.57930



Comentarios

ANEXO 2



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN DEL DISEÑO INDUSTRIAL
INNOVACIÓN Y EMPRENDIMIENTO**

CIDIIE

INFORME TÉCNICO DE PRÁCTICA

ENSAYO DE FLEXIÓN

Nombre del estudiante/investigador: Paúl Tamayo

Carrera/Facultad: Ingeniería Mecánica

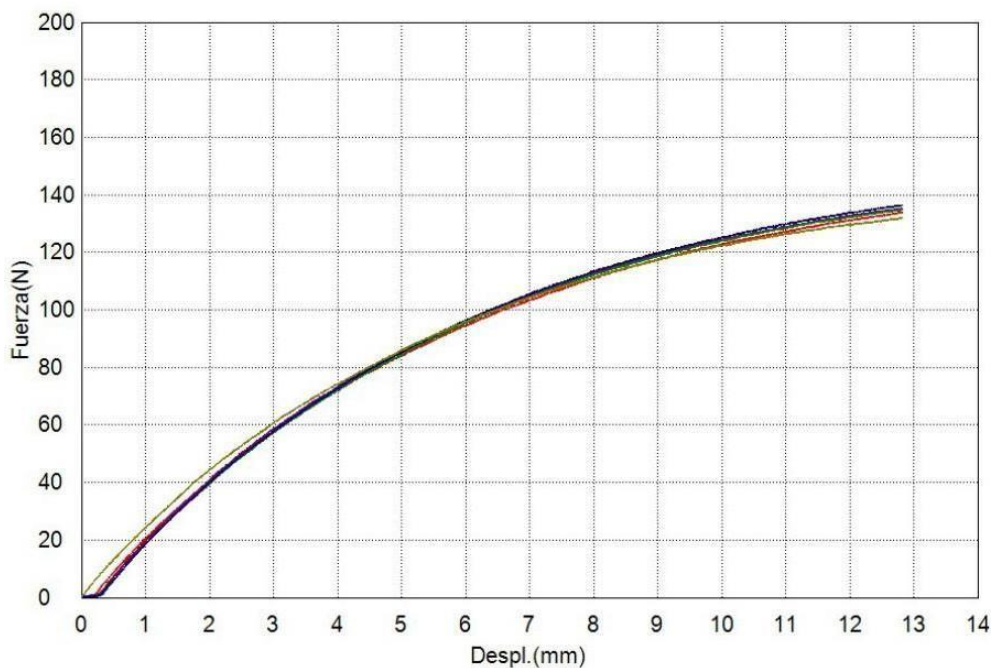
Fecha: 14/05/2026



Ensayo Flexión Duralón

Palabra llave		Nombre de producto	
Nombre de archivo de ensayo	Ensayo Flexión Duralón.xtas	Nombre de metodo de ensayo	Ensayo flexión duralón.xmas
Fecha de informe	22/5/2026	Fecha de ensayo	14/5/2026
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	
Velocidad	2.56mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Nº de muestras:	6

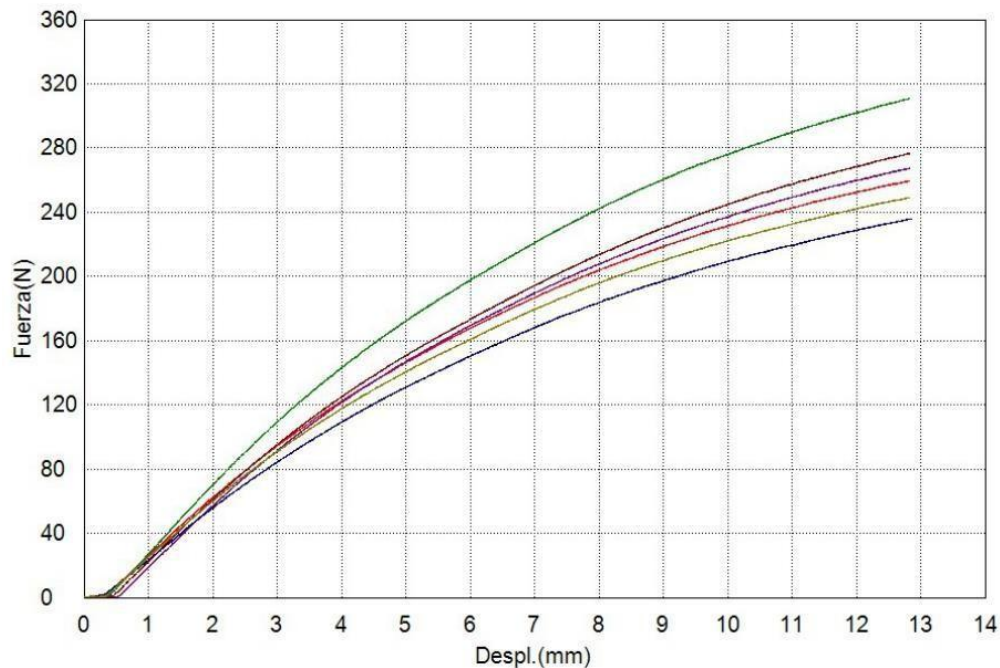
Nombre	Max_Fuerza	Max_Desplazamiento	M.Elastico	Max_Tension
Parametros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Fuerza 10 – 20 N	Calc. at Entire Areas
Unidad	N	mm	MPa	MPa
FL-DL-1	134.079	12.7948	0.05740	0.05428
FL-DL-2	135.366	12.8136	0.05979	0.05480
FL-DL-3	135.438	12.8093	0.05876	0.05483
FL-DL-4	135.303	12.8234	0.06047	0.05478
FL-DL-5	136.455	12.8063	0.05855	0.05524
FL-DL-6	132.028	12.8190	0.94486	0.05345
Media	134.778	12.8111	0.20664	0.05456
Desviacion Estandar	1.54405	0.01012	0.36165	0.00062
Rango	4.42700	0.02860	0.88746	0.00179



Ensayo Flexión Grilón

Palabra llave		Nombre de producto	
Nombre de archivo de ensayo	Ensayo Flexión Grilón.xtas	Nombre de metodo de ensayo	Ensayo flexión.xmas
Fecha de informe	22/5/2026	Fecha de ensayo	14/5/2026
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	
Velocidad	2.56mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Nº de muestras:	6

Nombre	M.Elastico	Max_Fuerza	Max_Desplazamiento	Max_Tension
Parametros	Fuerza 10 – 20 N	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	MPa	N	mm	MPa
FL-GR-1	0.09044	259.527	12.8174	0.10507
FL-GR-2	0.11446	276.685	12.8114	0.11549
FL-GR-3	0.09662	267.498	12.8226	0.10830
FL-GR-4	0.10362	310.969	12.8212	0.12590
FL-GR-5	0.07950	236.042	12.8507	0.09556
FL-GR-6	0.08832	249.251	12.8208	0.10091
Media	0.09549	266.662	12.8240	0.10854
Desviacion Estandar	0.01233	25.9072	0.01368	0.01085
Rango	0.03496	74.9270	0.03930	0.03034

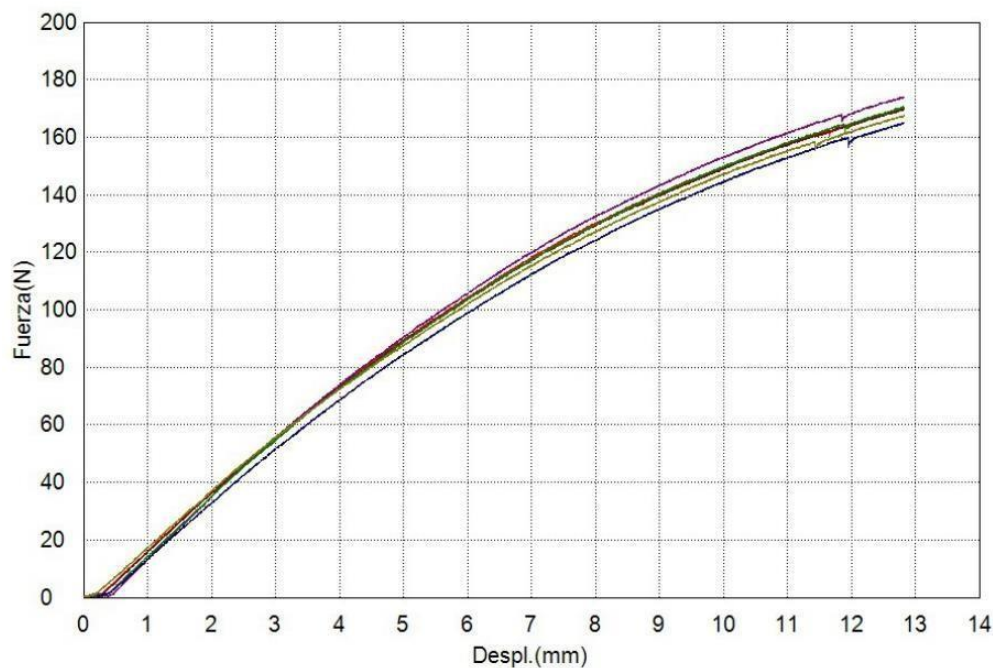


Comentarios

Ensayo de Flexión Nylon

Palabra llave		Nombre de producto	
Nombre de archivo de ensayo	Ensayo Flexión Nylon.xtas	Nombre de metodo de ensayo	Ensayo flexión nylon.xmas
Fecha de informe	22/5/2026	Fecha de ensayo	14/5/2026
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	
Velocidad	2.56mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Nº de muestras:	6

Nombre	Max_Fuerza	Max_Desplazamiento	M.Elastico	Max_Tension
Parametros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Fuerza 10 – 20 N	Calc. at Entire Areas
Unidad	N	mm	MPa	MPa
FL-NY-1	170.302	12.8174	0.05255	0.07109
FL-NY-2	169.810	12.8110	0.05195	0.07088
FL-NY-3	174.030	12.8106	0.05455	0.07264
FL-NY-4	170.628	12.8174	0.05298	0.07122
FL-NY-5	165.025	12.8184	0.05115	0.06888
FL-NY-6	167.521	12.8208	0.05081	0.06992
Media	169.553	12.8159	0.05233	0.07077
Desviacion Estandar	3.04822	0.00417	0.00136	0.00127
Rango	9.00501	0.01020	0.00374	0.00376

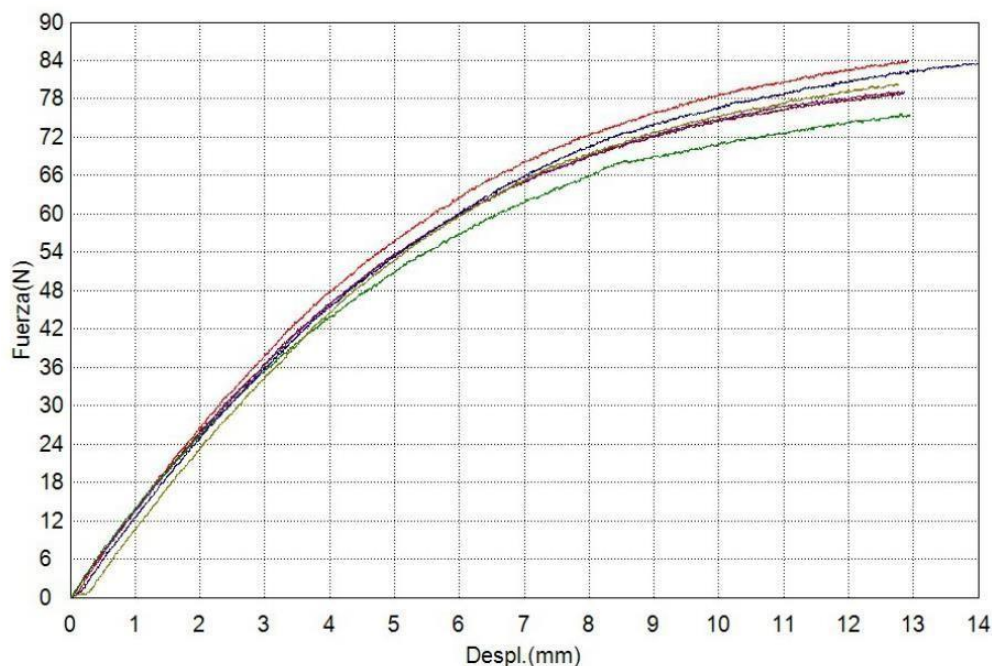


Comentarios

Ensayo de Flexión Teflón

Palabra llave		Nombre de producto	
Nombre de archivo de ensayo	Ensayo Flexión Teflón.xtas	Nombre de metodo de ensayo	Ensayo flexión teflón.xmas
Fecha de informe	22/5/2026	Fecha de ensayo	15/5/2026
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	
Velocidad	25.6mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Nº de muestras:	6

Nombre	Max._Fuerza	Max._Desplazamiento	M.Elastico	Max._Tension
Parametros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Fuerza 10 – 20 N	Calc. at Entire Areas
Unidad	N	mm	MPa	MPa
FL-TF-1	83.9392	12.9159	0.03275	0.03425
FL-TF-2	78.8848	12.8109	0.03111	0.03181
FL-TF-3	79.2027	12.8621	0.03099	0.03207
FL-TF-4	75.6025	12.8194	0.02996	0.03085
FL-TF-5	84.2333	14.6115	0.03109	0.03410
FL-TF-6	80.3550	12.7512	0.03156	0.03253
Media	80.3696	13.1285	0.03124	0.03260
Desviacion Estandar	3.28518	0.72859	0.00091	0.00134
Rango	8.63080	1.86030	0.00279	0.00340



Comentarios



Technical data sheet

SUSTAMID® 6

Product characteristics

- High impact strength
- Excellent noise and vibration absorption
- Excellent sliding properties

Typical fields of application

- Mechanical engineering
- Vehicle construction
- Food processing industry

	Test method	Unit	Value
General properties			
Density	DIN EN ISO 1183-1	g/cm ³	1,14
Water absorption	DIN EN ISO 62	%	3,0
Flammability (Thickness 3 mm / 6 mm)	UL 94		HB / HB
Mechanical properties			
Yield stress	DIN EN ISO 527	MPa	80
Elongation at break	DIN EN ISO 527	%	≥50
Tensile modulus of elasticity	DIN EN ISO 527	MPa	3200
Notched impact strength (charpy)	DIN EN ISO 179	kJ/m ²	≥3,0
Ball indentation hardness	DIN EN ISO 2039-1	MPa	170
Shore hardness	DIN EN ISO 868	scale D	82
Thermal properties			
Melting temperature	ISO 11357-3	°C	220
Thermal conductivity	DIN 52612-1	W / (m * K)	0,23
Thermal capacity	DIN 52612	kJ / (kg * K)	1,7
Coefficient of linear thermal expansion	DIN 53752	10 ⁻⁶ K ⁻¹	90
Service temperature, long term	Average	°C	-40 ... 85
Service temperature, short term (max.)	Average	°C	160
Heat deflection temperature	DIN EN ISO 75, method A	°C	75
Electrical properties			
Dielectric constant	IEC 60250		3,9
Dielectric dissipation factor (50Hz)	IEC 60250		0,02
Volume resistivity	IEC 60093	Ω *cm	10 ¹⁵
Surface resistivity	IEC 60093	Ω	10 ¹³
Comparative tracking index	IEC 60112		600
Dielectric strength	IEC 60243	kV/mm	20

The following applies to Polyamides: Under the influence of moisture absorption, the mechanical properties change. The material becomes tougher and more resistant to impact, the modulus of elasticity declines. Depending on the environmental atmosphere, the temperature and the period of moisture absorption, only the surface layer is affected by alterations of property to a certain depth. On thick-walled parts, the center area remains unaffected. The short-term maximum application temperature only applies to very low mechanical stress for a few hours. The long-term maximum application temperature is based on the thermal ageing of plastics by oxidation, resulting in a decrease of the mechanical properties. This applies to an exposure to temperatures for at least 5,000 hours causing a 50% loss of the tensile strength from the original value (measured at room temperature). This value says nothing about the mechanical strength of the material at high application temperatures. In case of thick-walled parts, only the surface layer is affected by oxidation from high temperatures. With the addition of antioxidants, a better protection of the surface layer is achieved. In any case, the center area of the material remains unaffected. The minimum application temperature is basically influenced by possible stress factors like impact and/or shock under application. The values stated refer to a minimum degree of impact stress. The electrical properties as stated result from measurements on natural, dry material. With other colours (in particular black) or saturated material, there may be clear differences in the electrical properties. The data stated above are average values ascertained by statistical tests on a regular basis. They are in accordance with DIN EN 15860. They serve as information about our products and are presented as a guide to choose from our range of materials. This, however, does not include an assurance of specific properties or the suitability for particular application purposes that are legally binding. Since the properties also depend on the dimension of the semi-finished products and the degree of crystallization (e.g. nucleating by pigments), the actual values of the properties of a particular product may differ from the indicated values.

Date: 04/11/2014

Nota: Las fichas técnicas incluidas en este anexo fueron proporcionadas por proveedores locales durante el proceso de adquisición de los materiales utilizados en la investigación. Se incorporan únicamente como documentación técnica de referencia.

Invoice No. NHI-180922
Certificate No. HT18S818

NHC NEWIDEAL CO., LTD.

7F-6, No. 12, Ln. 81, Yongping Rd., Yonghe Dist.
New Taipei City, Taiwan, R.O.C.
TEL: 886-2-29298431

Item No.	Commodity	Size Ø(mm)	Q'ty (kgs)	Properties & Test Method						
				Density	Tensile strength	Elongation at break	Flexural strength	Hardness Shore D	Impact strength	Coefficient of friction
				g/cm ³	Kg/cm ²	%	Kg/cm ²		Kg cm/cm	
1	NYLON 6A ROD	20mm x 1M	96.2	1.13	750	60	1000	75	19	0.37
2	NYLON 6A ROD	25mm x 1M	132.0							
3	NYLON 6A ROD	30mm x 1M	111.5							
4	NYLON 6A ROD	35mm x 1M	176.2							
5	NYLON 6A ROD	40mm x 1M	304.3							
6	NYLON 6A ROD	50mm x 1M	474.2							
7	NYLON 6A ROD	60mm x 1M	167.9							
8	NYLON 6A ROD	65mm x 1M	82.5							
9	NYLON 6A ROD	70mm x 1M	98.8							
10	NYLON 6A ROD	75mm x 1M	221.4							
11	NYLON 6A ROD	80mm x 1M	213.3							
12	NYLON 6A ROD	100mm x 1M	197.5							
13	NYLON 6A ROD	150mm x 1M	214.7							
14	NYLON 6A ROD	200mm x 1M	225.2							
15	NYLON 6A ROD	15mm x 1M	9.0							
16	NYLON 6A ROD	16mm x 1M	6.0							
17	NYLON 6A SHEET	10mmx1Mx2M	112.2							
18	NYLON 6A SHEET	15mmx1Mx2M	82.6							
19	NYLON 6A SHEET	20mmx1Mx2M	52.0							
1. We hereby certify that above products comply with the specification, and this information is a true representation of the data which has been furnished by our supplier.						Max. service temperature: 120 °C		Date: 2018.10.03		
2. This certificate dose not warrant the suitability for certain applications.										

Nota: Las fichas técnicas incluidas en este anexo fueron proporcionadas por proveedores locales durante el proceso de adquisición de los materiales utilizados en la investigación. Se incorporan únicamente como documentación técnica de referencia.

PTFE ROD TEST REPORT

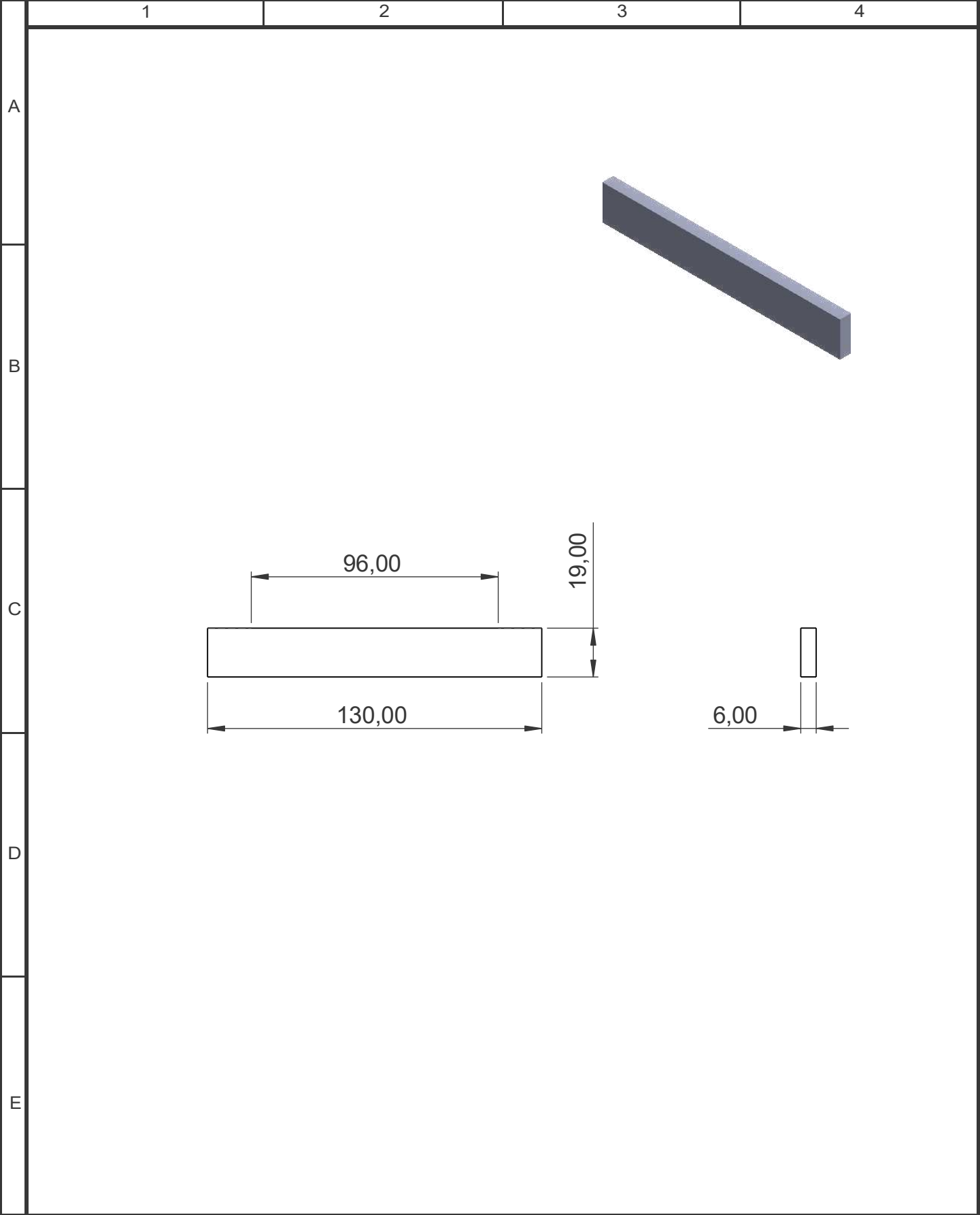
Properties	Unit	Method	Standard	Test results
PHYSICAL MECHANICAL				
Density	g/cm ³	ASTM D792	2.1-2.3	2.1
Hardness Shore D	/	ASTM D2240	≥ 51	53
Tensile Strength CD	Mpa	ISO 12086 ISO 527	≥28	30
Elongation at break CD	%	ISO 12086 ISO 527	≥ 280	295
Compressive strength at 1% deformation - CD N	N/mm ²	ASTM D695	4-5	4.5
Deformation under load at room temperature after 24 hours at 13,7 N/mm ² - CD	%	ASTM D621	≤ 17	15.5
Permanent deformation as above after 24 hours of rest at room temperature - CD	%	ASTM D621	≤ 9	8.5
Deformation under load at 260 °C after 24 hours at 41N/mm ² - CD	%	ASTM D621	≤ 32	30
Permanent deformation as above after 24 hours of rest at room temperature - CD		ASTM D621	≤ 19	18
Impact strength Izod	J/m	ASTM D656	153	153
TRIBOLOGICAL				
Dynamic coefficient of friction	/	ASTM D1894 ASTM D3702	0.06	0.06
Wear factor K	/	ASTM D3702	2.900	2.900
PV limit at 3 m/min at 30 m/min at 300 m/min	N/mm ² •m/min	/	2,4 4,2 5,7	2,4 4,2 5,7
THERMAL				
Service Temperature (min - max)	°C	/	-200/+265	-200/+265
Thermal expansion coefficient (linear) 25 - 100°C	10 ⁻⁵ (mm/mm)/ °C	Similar to ASTM D696	12-13	12
	105 (mm/mm)/ °C			
ELECTRICAL				
Dielectric strength (specimen 0,5 mm thick)	KV/mm	ASTM D149	≥ 40	47
Dielectric Constant at 60 Hz and 10 ⁶ Hz 10 ¹⁸	/	ASTM D150	2.05-2.10	2.10
Volume Resistivity	Ω -cm	ASTM D257	10 ¹⁸	10 ¹⁸
Surface Resistivity	Ω	ASTM D257	10 ¹⁷	10 ¹⁷

JOINTEFLON dedicates in developing, manufacturing and marketing teflon products. Our purpose is help you establish your own workshops with our decades years of professional techniques.

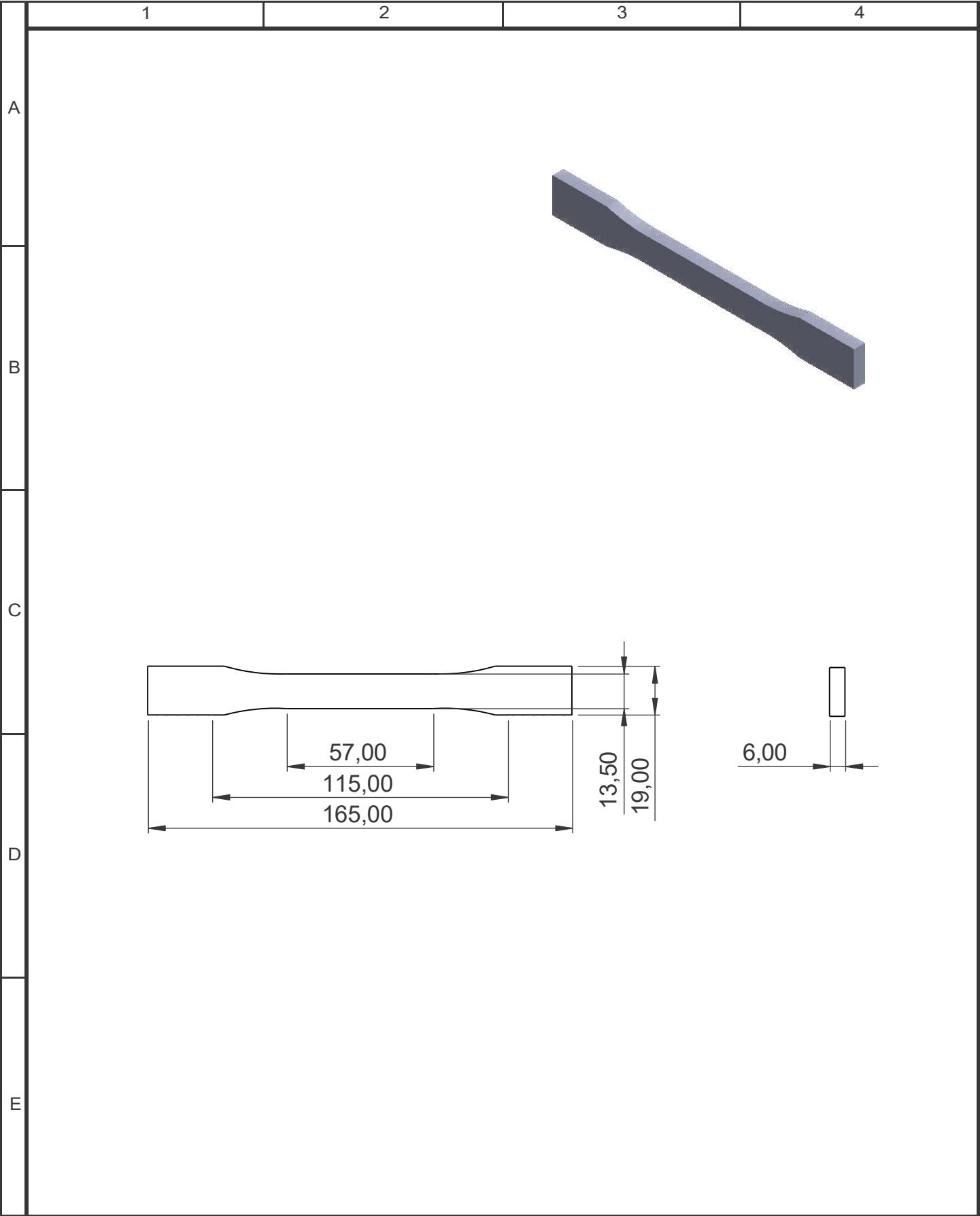
www.jointeflons.com

jointeflon@jointeflon.com

Nota: Las fichas técnicas incluidas en este anexo fueron proporcionadas por proveedores locales durante el proceso de adquisición de los materiales utilizados en la investigación. Se incorporan únicamente como documentación técnica de referencia.



				Tolerancia		Peso	Materiales		
				± 0.5 mm		13 gr	POLÍMERO COMERCIAL		
					Fecha	Nombre	Denominación		Escala
				Dib.	01/04/26	Tamayo P.	PROBETA DE FLEXIÓN		1:2
				Rev.	02/04/26	Ing. Vaca H.			
				Apro.	02/04/26	Ing. Vaca H.			
				Empresa			Nº del dibujo		Registro
				U T A			1 de 2		
Edi.	Modifi.	Fecha	Nom.				Sustitución		
							na		



				Tolerancia		Peso	Materiales		
				±0.5 mm		13 gr	POLÍMERO COMERCIAL		
					Fecha	Nombre	Denominación		Escala
				Dib.	01/04/26	Tamayo P.	PROBETA DE TRACCIÓN		1:2
				Rev.	02/04/26	Ing. Vaca H.			
				Apro.	02/04/26	Ing. Vaca H.			
				Empresa			Nº del dibujo		Registro
				U T A			2 de 2		
Edi.	Modifi.	Fecha	Nom.				Sustitución		