



ING. AUTOMOTRIZ

Trabajo de integración Curricular previa a la obtención del título de Ingeniería en Mecánica Automotriz

AUTORES:

Aldahir Wilson Chipantiza Fogacho
Steven Geovanny Galárraga Cuenca
Juan Daniel Ordóñez Robledo

TUTOR:

Ing. Luis Homero Ibujés Villacís, MSc.

CO-DIRECTOR:

Ph.D. Denny Javier Guanuche Larco

Evaluación del desempeño de impresoras 3D
Prusa MK3.5 y Artillery SidewinderX1
mediante análisis de resistencia mecánica en
probetas PETG

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, **ALDAHIR WILSON CHIPANTIZA FOGACHO, STEVEN GEOVANNY GALÁRRAGA CUENCA Y JUAN DANIEL ORDOÑEZ ROBLEDO**, declaramos bajo juramento, que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

Cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, su reglamento y demás disposiciones legales.



Aldahir Wilson Chipantiza Fogacho

Ci: 175035723



Steven Geovanny Galárraga Cuenca

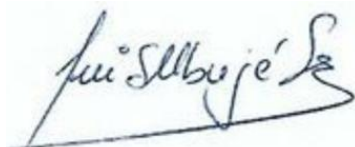
Ci: 1750871376



Juan Daniel Ordoñez Robledo

Ci: 2101140198

Yo, **Luis Homero Ibujés Villacís**, certifico a los señores, **Aldahir Wilson Chipantiza Fogacho, Steven Geovanny Galárraga Cuenca y Juan Daniel Ordoñez Robledo**, autores exclusivos de la presente investigación, siendo el responsable exclusivo de su originalidad y autenticidad, como de su contenido



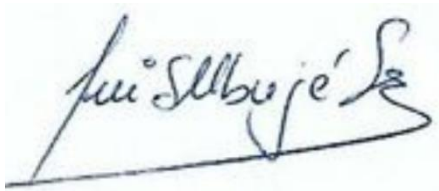
Ing. Luis Homero Ibujés Villacís MSc.

Director del trabajo de titulación

Ci: 0501317754

APROBACIÓN DEL TUTOR

Yo, **LUIS HOMERO IBUJÉS VILLACIS**, certifico que conozco a los autores del presente trabajo, siendo el responsable exclusivo tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Luis Homero Ibufés Villacís". The signature is written in a cursive style and is positioned above a horizontal line.

Ing. Luis Homero Ibufés Villacís MSc.

Director del trabajo de titulación

Ci: 0501317754

APROBACIÓN DEL CO-DIRECTOR

Yo, **DENNY JAVIER GUANUCHE LARCO**, certifico que conozco a los autores del presente trabajo, siendo el responsable exclusivo tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.



Ph.D. Denny Javier Guanuche Larco Ing.

Co-Director del trabajo de titulación

Ci: 1715882450

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía, mi refugio y mi fuerza cuando mis manos ya no podían más.

Por las veces que callé y aun así me escuchaste, por los días grises en los que me diste un motivo para seguir, y por recordarme que los planes divinos siempre llegan a su tiempo. Este logro también es tu obra, Señor.

A mis padres, Klever y Blanca, por ser el pilar y el corazón de todo lo que soy.

Por cada sacrificio silencioso, por las noches sin descanso y por los sueños que dejaron en pausa para que yo pudiera cumplir los míos. Su amor ha sido mi refugio, su ejemplo mi mayor lección, y su orgullo, la fuerza que me impulsa a seguir creciendo.

A mis hermanos Jessica, Jefferson y Gabriela, por ser mi espejo y mi inspiración. Por mostrarme, con su ejemplo, que el trabajo constante y la fe dan frutos, por acompañarme en los momentos difíciles y recordarme siempre de dónde vengo.

En cada logro que hoy celebro, también vive la huella que ustedes dejaron en mí.

A mi abuelito, que, aunque partió hace años, sigue presente en mis pensamientos y en mi corazón. Sé que desde el cielo sonrío al ver que el niño al que alguna vez aconsejó hoy cumple una de sus mayores metas. Este logro es también un homenaje a tu memoria, abuelito, porque tu amor sigue siendo mi guía.

A mi sobrino Sebastián, ese pequeño gran amor que llenó mis días de alegría. Tú risa, tus preguntas curiosas y tu mirada brillante me recordaron cada día por qué vale la pena seguir adelante. Este trabajo también es para ti, para que sepas que los sueños, con amor y esfuerzo, se hacen realidad.

Y finalmente, a mí mismo, por no rendirme cuando todo parecía demasiado. Por levantarme cada vez que el cansancio o la tristeza quisieron detenerme, por abrazar mis miedos y convertirlos en fuerza, por creer, incluso cuando dudaba. Hoy miro atrás y veo el camino recorrido, las lágrimas, las noches sin dormir, las veces que estuve a punto de caer, y me abrazo con orgullo. Hoy abrazo a mi niño interior y le digo: lo estas logrando

Aldahir Wilson Chipantiza Fogacho

DEDICATORIA

Dedico este trabajo con todo mi amor y gratitud a las personas más importantes en mi vida.

A mi Padre Geovanny y mi madre Diana, por su amor incondicional, por enseñarme con su ejemplo el valor del esfuerzo, la perseverancia y la honestidad. Gracias por brindarme su apoyo en cada etapa de mi vida, por creer en mí incluso cuando las dificultades parecían imposibles de superar, y por ser mi mayor inspiración para seguir adelante.

A mis hermanos Sebastián y Doménica, por acompañarme con alegría, consejos y motivación en este largo camino académico. Su cariño y confianza me dieron la fuerza necesaria para continuar.

A mi abuelita Carmen, con todo mi corazón, por sus oraciones, su ternura y por ser un pilar de sabiduría en mi vida. Su amor y sus palabras de aliento siempre me recordaron la importancia de nunca rendirme y de valorar cada logro, por pequeño que parezca.

A mi novia Jessenia, por su paciencia, comprensión y por estar a mi lado en los momentos de mayor exigencia. Su apoyo constante, sus palabras de ánimo y su confianza en mis capacidades fueron una luz en los días más difíciles.

Y finalmente, a toda mi familia, por su unión, cariño y apoyo incondicional. Cada uno de ustedes ha sido parte esencial de este logro, que no solo representa el cumplimiento de una meta personal, sino también el fruto del amor y los valores que me han inculcado desde siempre.

Steven Geovanny Galárraga Cuenca

DEDICATORIA

Dedico este trabajo con toda la gratitud primero a Dios por darme la oportunidad de vivir y haber puesto todas las circunstancias a mi favor para llegar hasta esta etapa de mi vida.

A mi padre Nilo, que nunca se dio por vencido a pesar de los momentos difíciles siempre me demostró un gran carácter y fuerza para continuar para saber guiarme con sabiduría por este camino y entender que la constancia es fundamental para lograr nuestros objetivos.

A mi madre Jenny, por todo su apoyo y sus valores y ser la motivación más importante en mi vida para ser una buena persona y gran profesional del cual se sienta orgullosa, por más que nada, por su amor.

A mi novia Mishell, que siempre ha estado conmigo y me ha brindado su apoyo incluso hasta en los peores momentos demostrándome desde su ejemplo que con esfuerzo y perseverancia se pueden lograr grandes cosas.

A mi hermana Amparo, por ser un apoyo incondicional y uno de los puntos clave más importantes que tuvieron gran influencia en mí para tomar buenas decisiones y brindarme la fuerza para continuar a pesar de las circunstancias negativas.

A mis sobrinos Jeral y Sebastián, que me inspiraron mucho para ser un gran ejemplo de superación para ellos, que fue muy importante para alcanzar este logro personal y tratar de ser una mejor persona cada día en todos los ámbitos.

Y por último a mi familia en general ya que gracias a los valores y a el ejemplo que me han mostrado y que han sido de total importancia para alcanzar este logro tan importante y que me servirán para toda la vida.

Juan Daniel Ordoñez Robledo

AGRADECIMIENTO

En este punto culminante de mi formación, deseo expresar mi más profunda gratitud a Dios, por acompañarme en cada paso de este camino. Por darme la fortaleza cuando las fuerzas parecían agotarse, por llenarme de esperanza en los momentos de incertidumbre y por guiarme con sabiduría hasta alcanzar esta meta.

A mis padres, quienes con amor, sacrificio y paciencia han sido el fundamento de todo lo que soy. Gracias por su apoyo incondicional, por creer en mí incluso cuando dudaba de mis propias capacidades, y por enseñarme que, con esfuerzo, humildad y fe, todo es posible.

A mis hermanos, por su presencia constante, por sus palabras de aliento y por ser ejemplo de perseverancia y cariño. En cada logro que hoy celebro, también vive la huella que ustedes dejaron en mí.

A mis amigos y compañeros, por las experiencias compartidas, por las risas en medio del cansancio y por la compañía en los días más difíciles.

Gracias por estar ahí, por su comprensión y por recordarme que ningún logro tiene sentido si no se comparte con quienes apreciamos.

Extiendo mi sincero agradecimiento a mis profesores, por su dedicación, su compromiso con la enseñanza y por transmitir mucho más que conocimientos: principios, valores y el deseo constante de superación.

A la Universidad Internacional del Ecuador, por haberme brindado las herramientas y el entorno necesarios para desarrollarme como profesional y como ser humano.

Gracias por ser parte esencial de esta etapa que marcará mi vida para siempre.

Y finalmente, a mi director, Mgs. Luis Ibujés, y Co-Director, Dr. Denny Guanuche por su guía, orientación y paciencia durante el desarrollo de esta investigación.

Su apoyo, consejos y acompañamiento fueron fundamentales para la culminación exitosa de este trabajo. A todos quienes, de una u otra manera, aportaron su tiempo, su energía o sus palabras de aliento, gracias por ser parte de este logro que hoy celebro con orgullo y gratitud.

Aldahir Wilson Chipantiza Fogacho

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a Dios, por guiarme en cada paso de este camino, por darme salud, sabiduría y fortaleza para superar los desafíos y alcanzar este logro tan importante en mi vida. A mi familia, que ha sido el pilar fundamental en todo momento. A mis padres, por su amor incondicional, su sacrificio y el ejemplo de esfuerzo y honestidad que siempre me han transmitido. A mis hermanos, por su cariño, motivación y por compartir conmigo las alegrías y los retos de esta etapa. A mi abuelita, por sus oraciones, por su ternura y por enseñarme el valor de la perseverancia. Y a mi novia, por su apoyo constante, su comprensión y por acompañarme con paciencia durante este proceso académico.

A la Universidad Internacional del Ecuador (UIDE), por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente y proporcionarme las herramientas necesarias para desarrollarme como ingeniero.

Mi sincero agradecimiento al Ing. Luis Ibujés, mi tutor, por su guía, paciencia y asesoramiento durante el desarrollo de este trabajo de titulación. Sus conocimientos, experiencia y dedicación fueron fundamentales para orientar correctamente esta investigación y llevarla a buen término.

A la Escuela Politécnica Nacional (EPN), por su valiosa colaboración en la realización de los análisis experimentales y técnicos que fueron esenciales para el desarrollo y validación de los resultados obtenidos.

Extiendo también mi gratitud a mis docentes por su compromiso y enseñanza a lo largo de mi formación, y a mis compañeros y amigos, por compartir conmigo largas jornadas de trabajo, aprendizaje y compañerismo, convirtiendo este proceso en una experiencia inolvidable.

Finalmente, a todas las personas e instituciones que, de una u otra forma, aportaron con su apoyo, sus consejos y su tiempo para hacer posible este logro. A todos ustedes, mi más sincero y profundo agradecimiento.

Steven Geovanny Galárraga Cuenca

AGRADECIMIENTO

A Dios, fuente de sabiduría y fortaleza, por acompañarme en cada paso de este camino académico, por darme la salud, la perseverancia y la claridad necesarias para alcanzar esta meta tan significativa en mi vida.

A mi familia, que ha sido mi mayor inspiración y mi apoyo incondicional. A mis padres, por su amor, sacrificio y ejemplo de trabajo honesto, valores que me han guiado siempre. A mi hermana y a mis sobrinos, por su compañía, comprensión y ánimo constante en los momentos de mayor esfuerzo. Y a mi novia, por su paciencia, apoyo y cariño inquebrantable durante todo este proceso.

A la Universidad Internacional del Ecuador (UIDE), por abrirme las puertas al conocimiento y brindarme una formación profesional integral que me permitió desarrollar mis capacidades como futuro ingeniero.

Mi especial agradecimiento al Ing. Luis Ibujés, tutor de este trabajo, por su orientación, compromiso y valiosos aportes que guiaron el desarrollo de esta investigación hasta su culminación con éxito.

A la Escuela Politécnica Nacional (EPN), por su colaboración y apoyo técnico en la ejecución de los ensayos experimentales, los cuales resultaron esenciales para la validación de los resultados obtenidos.

Extiendo también mi gratitud a todos los docentes que contribuyeron a mi formación, por compartir sus conocimientos con dedicación y pasión. A mis compañeros y amigos, por su colaboración, entusiasmo y las horas compartidas entre proyectos, desafíos y aprendizajes que hicieron de esta etapa una experiencia enriquecedora y memorable.

Finalmente, a todas las personas e instituciones que, directa o indirectamente, aportaron su tiempo, conocimiento y apoyo para que este logro sea posible, les expreso mi más sincero y profundo agradecimiento.

Juan Daniel Ordoñez Robledo

Índice de Contenido

Índice de Tablas	XIII
Índice de Figuras	XIV
Índice de Anexos.....	XV
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
Introducción	3
Marco Teórico.....	5
Diagrama esfuerzo, deformación (Ensayo de Tracción).....	5
Diagrama esfuerzo–deflexión (Ensayo de flexión).....	6
Tecnología FDM/FFF	7
Influencia de parámetros de impresión	7
Normativa para el diseño de probetas en ensayos de tracción.	8
Normativa para el diseño de probetas en ensayos de flexión.....	8
Simulación numérica del comportamiento mecánico en software CAD.....	9
Materiales y Métodos.....	9
Materiales:.....	9
Método Deductivo.....	13
Parámetros de impresión.....	14
Simulación numérica de los ensayos mecánicos en ANSYS Workbench 2025	15
Ensayo de tracción	15
Ensayo de Flexión.....	16
Análisis de resultados.....	20
Ensayos de tracción.....	20
Ensayos de flexión	20
Simulaciones	21
Interpretación general.....	21
Conclusiones	24
Referencias.....	25

Índice de Tablas

Tabla 1.	Características técnicas de la impresora Prusa MK3.5.....	10
Tabla 2.	Características técnicas de la impresora Artillery Sidewinder X1	11
Tabla 3.	Ficha técnica del filamento PETG.....	12
Tabla 4.....		14
	Parámetros de impresión	14
Tabla 5.	Resultados del ensayo de tracción para las probetas del grupo Artillery Sidewinder X1 y Prusa MK3.5.	16
Tabla 6.	Resultados del ensayo de flexión para las probetas del grupo Artillery Sidewinder X1 y Prusa MK3.5.	17
Tabla 7.	Comparación entre resultados experimentales de tracción, simulación y datos teóricos del material.....	18
Tabla 8.	Comparación entre resultados experimentales de flexión, simulación y datos teóricos del material.....	19
Tabla 9.	Datos obtenidos de análisis ANOVA.....	23

Índice de Figuras

Figura 1.	Diagrama teórico, esfuerzo, deformación en materiales poliméricos	5
Figura 2.	Diagrama teórico, esfuerzo, deflexión para ensayo de flexión.....	7
Figura 3.	Análisis ANOVA.	22

Índice de Anexos

Anexo 1.	Dimensiones para el diseño de probetas en ensayos de tracción.....	28
Anexo 2.	Dimensiones para el diseño de probetas en ensayos de flexión.	28
Anexo 3.	Proceso de preparación de probetas en el software Prusa Slicer.	29
Anexo 4.	Proceso de impresión de probetas en Artillery Sidewinder X1.....	30
Anexo 5.....	31
Anexo 6.....	32
Anexo 7.	Proceso de preparación e impresión de probetas en Prusa MK3.5.....	33
Anexo 8.....	34
Anexo 9.....	35
Anexo 10.	Proceso de ensayo de Tracción y Flexión en el laboratorio de la EPN.	36
Anexo 11.	Proceso de ensayo de Tracción y rotura en el laboratorio de la EPN.....	37
Anexo 12.	Ejecución de ensayo de tracción en el laboratorio de la EPN	38
Anexo 13.	Ejecucion de ensayo de flexión en el laboratorio de la EPN.....	40
Anexo 14.	Condiciones finales de las probetas del grupo “Artillery” después de los ensayos de resistencia a la tracción.	41
Anexo 15.	Condiciones finales de las probetas del grupo “Prusa” después de los ensayos de resistencia a la tracción.	42
Anexo 16.	Condiciones finales de las probetas del grupo “Artillery” después de los ensayos de resistencia a la flexión.....	43
Anexo 17.	Condiciones finales de las probetas del grupo “Prusa” después de los ensayos de resistencia a la flexión.....	44
Anexo 18.	Distribución de la deformación total en la simulación de tracción del PETG en ASYS Workbench (2025).....	45
Anexo 19.	Esfuerzo máximo y deformación unitaria generado por tracción axial de tracción del PETG en ANSYS Workbench (2025).	46
Anexo 20.	Resultados de la simulación de flexión del PETG en ANSYS Workbench (2025).....	47
Anexo 21.	Ficha técnica de Artillery Sidewinder X1.	48
Anexo 22.	Ficha técnica de Prusa MK3.5.....	49
Anexo 23.	Normativa ASTM-D638-14 normativa para determinar la propiedades de tracción de plásticos no reformados y reforzados para tracción.....	50
Anexo 24.	Normativa ASTM D790-17 normativa para determinar las propiedades de flexión y plásticos reforzados y no reforzados y materiales aislantes eléctricos.....	58

Anexo 25. Informe de resultado de ensayos de tracción y flexión emitido por LANUM	
-EPN.....	65

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE IMPRESORAS 3D PRUSA MK3.5 Y ARTILLERY SIDEWINDERX1 MEDIANTE ANÁLISIS DE RESISTENCIA MECÁNICA EN PROBETAS PETG

Ing. Luis Homero Ibujés Villacis MSc. luibujesvi@uide.edu.ec

Dr. Denny Javier Guanuche Larco Ing. deguanuchela@uide.edu.ec

Aldahir Wilson Chipantiza Fogacho. alchipantizafo@uide.edu.ec

Steven Geovanny Galárraga Cuenca. stgalarragacu@uide.edu.ec

Juan Daniel Ordoñez Robledo. juordonezro@uide.edu.ec

Ingeniería Automotriz Universidad Internacional del Ecuador, Quito – Ecuador

RESUMEN

Comparar el desempeño de las impresoras 3D Prusa MK3.5 y Artillery Sidewinder X1 mediante ensayos de tracción y flexión en probetas de PETG, con el fin de determinar diferencias en resistencia, rigidez y eficiencia. Fabricar veinte probetas normalizadas según las normas ASTM D638-22 y D790-17, distribuidas equitativamente entre ambas impresoras. Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Nuevos Materiales (LANUM) de la EPN bajo condiciones controladas, complementados con simulaciones en ANSYS Workbench 2025 para correlacionar los resultados experimentales y numéricos. Las probetas impresas con la Artillery presentaron mayor resistencia a la tracción (38,11 MPa) y flexión (68,06 MPa) que las de la Prusa (30,62 MPa y 61,55 MPa), con discrepancias menores al 6 %. Se concluye que la Artillery ofrece mayor resistencia mecánica, mientras que la Prusa destaca por estabilidad dimensional y calidad superficial. En costo-beneficio, la Prusa resulta más equilibrada, y la Artillery más adecuada para piezas de alta exigencia estructural, confirmando la utilidad de la simulación como herramienta de validación.

Palabras clave: impresión 3D, manufactura aditiva, ensayo de tracción, ensayo de flexión, PETG, simulación numérica.

ABSTRACT

Compare the performance of the 3D printers Prusa MK3.5 and Artillery Sidewinder X1 through tensile and flexural tests on PETG specimens to determine differences in strength, stiffness, and efficiency. Twenty standardized specimens were fabricated according to ASTM D638-22 and D790-17, evenly distributed between both printers. Tests were conducted at the New Materials Laboratory (LANUM) of the National Polytechnic School under controlled conditions, complemented by simulations in ANSYS Workbench 2025 to correlate experimental and numerical results. Specimens printed with the Artillery showed higher tensile (38.11 MPa) and flexural (68.06 MPa) strength than those printed with the Prusa (30.62 MPa and 61.55 MPa), with discrepancies below 6%. It is concluded that the Artillery offers greater mechanical strength, while the Prusa provides better dimensional stability and surface quality. In terms of cost-benefit, the Prusa proves more balanced, whereas the Artillery is suitable for parts requiring high structural strength, confirming the usefulness of simulation as a validation tool.

Keywords: 3D printing, additive manufacturing, tensile test, flexural test, PETG, numerical simulation.

Introducción

En la actualidad, la impresión 3D se ha consolidado como una herramienta fundamental en los procesos de manufactura moderna, al permitir la creación de piezas funcionales y prototipos con alta precisión, bajo costo y gran flexibilidad de diseño (Asanchez, 2025). Esta tecnología, basada principalmente en el modelado por deposición fundida (FDM), ha experimentado un crecimiento significativo tanto en el ámbito académico como industrial, ofreciendo nuevas posibilidades en investigación, educación y producción ligera (Magazine, 2024). Sin embargo, la amplia variedad de impresoras 3D disponibles en el mercado, con distintas configuraciones y costos, genera incertidumbre sobre si las diferencias de precio se traducen realmente en un mejor desempeño mecánico de las piezas fabricadas (López Daniel,2024).

Uno de los aspectos más importantes para evaluar la calidad de las impresiones es la resistencia mecánica del material y el tiempo de fabricación, factores determinantes cuando se requiere producir elementos funcionales y no solo prototipos visuales. De acuerdo con SVLS et al. (2024), el material PETG demuestra propiedades de resistencia superiores cuando se optimizan parámetros de impresión como el espesor de capa y la densidad de relleno. Asimismo, Alarifi et al. (2023) señalan que las probetas de PETG fabricadas por FDM presentan un aumento significativo en resistencia a la tracción y flexión cuando se controlan las condiciones de temperatura y velocidad de impresión. Estos estudios evidencian que los resultados mecánicos pueden variar notablemente según el tipo de impresora y los parámetros aplicados (Alarifi et al,2023).

En este contexto, la presente investigación tiene como propósito analizar comparativamente el desempeño mecánico de las impresoras 3D Prusa MK3.5 y Artillery Sidewinder X1 mediante ensayos de tracción y flexión en probetas fabricadas con material PETG. Las probetas fueron elaboradas bajo los lineamientos de las normas ASTM D638-22 y ASTM D790-17, y los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Nuevos Materiales (LANUM) de la Escuela Politécnica Nacional, en condiciones ambientales controladas. De manera complementaria, se efectuaron simulaciones numéricas en el software ANSYS Workbench 2025, con el objetivo de correlacionar los resultados experimentales con modelos computacionales y validar la consistencia de los datos obtenidos.

El objetivo principal de esta investigación es determinar si existen diferencias significativas en las propiedades mecánicas y estructurales de las piezas producidas por ambos equipos, considerando variables como resistencia máxima, rigidez, deformación unitaria y precisión dimensional. Los resultados permitirán establecer criterios técnicos que orienten la selección y optimización de impresoras 3D en entornos educativos e industriales, contribuyendo al desarrollo de procesos de manufactura aditiva más eficientes, reproducibles y sostenibles en el contexto ecuatoriano.

Marco Teórico

Diagrama esfuerzo, deformación (Ensayo de Tracción)

El ensayo de tracción es una de las pruebas más importantes para determinar las propiedades mecánicas de un material, ya que permite obtener parámetros como el esfuerzo máximo, el módulo de elasticidad, la ductilidad y la energía de deformación (Callister & Rethwisch, 2021).

Durante el ensayo, la probeta se somete a una fuerza axial creciente y se registra la relación entre el esfuerzo (σ) y la deformación unitaria (ϵ).

El comportamiento resultante se representa mediante el diagrama esfuerzo–deformación, mostrado en la Figura 1.

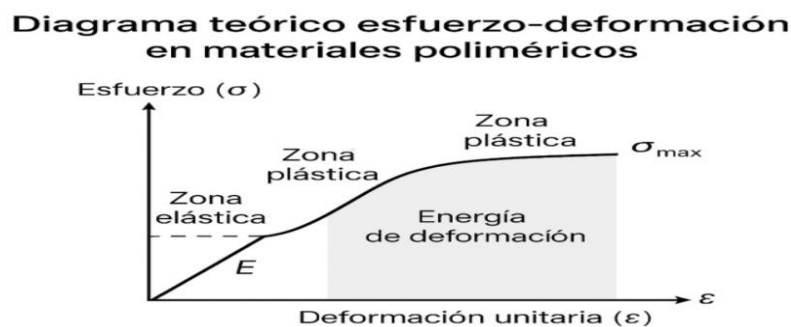
En materiales termoplásticos como el PETG, este diagrama se caracteriza por tres zonas bien definidas:

1. **Zona elástica:** El material se deforma de forma reversible; al retirar la carga, recupera su forma original. Su pendiente representa el módulo de Young (E), indicador de la rigidez.
2. **Zona plástica:** Aparecen deformaciones permanentes y se acumula energía de deformación, que refleja la tenacidad del material.
3. **Zona de fractura:** El material alcanza su esfuerzo máximo (σ_{\max}) y se rompe, mostrando su resistencia última.

El área bajo la curva representa la energía total absorbida antes de la fractura, que mide la capacidad del material para resistir deformaciones. Esta información es esencial para comprender el comportamiento de los polímeros impresos en 3D, como el PETG, utilizados en esta investigación (Callister & Rethwisch, 2021).

Figura 1.

Diagrama teórico, esfuerzo, deformación en materiales poliméricos



Fuente: Elaboración propia con base a ASTM D638-25

Diagrama esfuerzo–deflexión (Ensayo de flexión)

El ensayo de flexión en tres puntos, se utiliza para determinar la resistencia a la flexión, el módulo de elasticidad en flexión (E^f) y el comportamiento estructural de un material sometido a esfuerzos combinados de tracción y compresión (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2025b).

Durante este ensayo, una carga central se aplica sobre la probeta hasta que se produce su deformación o fractura, registrándose la relación entre el esfuerzo flexional (σ_f) y la deflexión (δ).

A partir de estos datos se obtiene el diagrama esfuerzo deflexión, representado en la Figura 2.

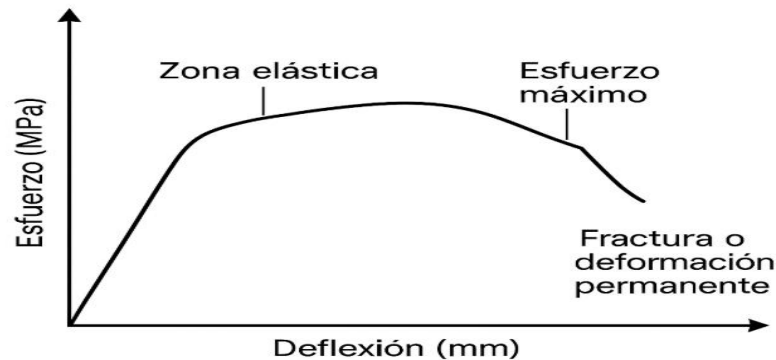
Este diagrama permite analizar la respuesta mecánica del material frente a un esfuerzo de flexión y se divide en cuatro etapas principales, cada una con significado físico y estructural propio (Callister & Rethwisch, 2021; Villamar & Herrera, 2023).

1. **Zona elástica lineal:** Corresponde a la parte inicial de la curva, donde el esfuerzo es proporcional a la deflexión. Si la carga se retira, la probeta recupera su forma original, lo que indica que la deformación es totalmente reversible. La pendiente de esta zona representa el módulo de flexión (E^f), el cual mide la rigidez del material.
2. **Zona plástica:** Inicia cuando la curva deja de ser lineal y el material comienza a deformarse de manera permanente.
En esta etapa se evidencia la ductilidad del material, es decir, su capacidad de deformarse antes de fallar.
El área bajo la curva en esta zona está relacionada con la energía de deformación absorbida, que expresa la tenacidad del material (Gibson et al., 2021).
3. **Punto máximo de esfuerzo (σ_f máx):** Corresponde al pico más alto del diagrama, donde el material alcanza su máxima resistencia a la flexión. A partir de este punto, cualquier incremento en la deflexión provoca una disminución en el esfuerzo soportado, indicando el inicio de la falla estructural (Callister & Rethwisch, 2021).
4. **Zona de caída o fractura:** Representa la etapa final, en la cual el material pierde su rigidez y se produce la fractura o deformación irreversible.

En el caso del PETG, esta zona suele mostrar una falla semidúctil, con curvatura visible y sin separación total de las capas, debido a su naturaleza polimérica (Rodríguez & Romero, 2022).

Figura 2.

Diagrama teórico, esfuerzo, deflexión para ensayo de flexión



Fuente: Elaboración propia con base a ASTM D790-25

Tecnología FDM/FFF

El proceso FDM/FFF consiste en la extrusión controlada de un filamento termoplástico que se deposita capa por capa sobre una plataforma de impresión. Este filamento se funde en el extrusor y se solidifica al enfriarse, formando una pieza sólida.

Los parámetros de impresión como la temperatura de boquilla, altura de capa, velocidad de impresión, relleno y orientación de la pieza influyen directamente en las propiedades mecánicas finales (Eguillor, 2025). Por ello, los estudios experimentales son esenciales para determinar el comportamiento mecánico del material impreso bajo condiciones controladas.

Influencia de parámetros de impresión

Diversos estudios (Torres, 2022; Emon et al., 2025). Muestran que: Un aumento en la altura de capa reduce la resistencia mecánica. Un mayor porcentaje de relleno incrementa la rigidez, pero también el tiempo de impresión. La temperatura del extrusor afecta la adhesión entre capas, determinante en el esfuerzo máximo alcanzado. Por tanto, el control de estos parámetros es esencial al comparar el desempeño entre diferentes impresoras (Verim et al., 2025).

Normativa para el diseño de probetas en ensayos de tracción.

El diseño de las probetas utilizadas en esta investigación se fundamenta en normas internacionales que establecen las dimensiones, geometría y condiciones de ensayo para la caracterización mecánica de materiales plásticos. En particular, se empleó la norma ASTM D638-22, la cual especifica los métodos de ensayo y las dimensiones normalizadas para determinar las propiedades de tracción, como el esfuerzo máximo, el módulo de elasticidad y la elongación.

La norma ASTM D638-22 define distintos tipos de probetas, siendo la probeta Tipo I una de las más utilizadas para plásticos rígidos y semirrígidos. Este tipo de probeta resulta adecuada para polímeros empleados en impresión 3D mediante tecnología FDM/FFF, como el PETG, cuyos espesores nominales habituales se sitúan alrededor de 3,2 mm, valor ampliamente adoptado en estudios experimentales.

De acuerdo con la ASTM D638-22, la probeta Tipo I presenta dimensiones estandarizadas que garantizan resultados comparables y repetibles: longitud total de 165 mm, longitud de la zona de galga de 50 mm, longitud de la sección estrecha de 57 mm, ancho de la sección estrecha de 13 mm, ancho en las zonas de sujeción de 19 mm, radio de transición de 76 mm y un espesor nominal de $3,2 \pm 0,4$ mm (Fahrenheit & ZwickRoell, 2025).

Normativa para el diseño de probetas en ensayos de flexión.

El diseño de las probetas empleadas en los ensayos de flexión en tres puntos se fundamenta en la norma internacional ASTM D790-17, titulada Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. Esta norma establece los procedimientos y dimensiones estandarizadas para evaluar la resistencia a la flexión y el módulo elástico de materiales plásticos.

Según la ASTM D790-17, las probetas deben presentar una sección transversal rectangular, siendo comúnmente utilizadas dimensiones de 127 mm de longitud, 12,7 mm de ancho y 3,2 mm de espesor para polímeros termoplásticos de uso general, como el PETG. El uso de estas dimensiones normalizadas permite una distribución adecuada de los esfuerzos durante el ensayo y facilita la comparación de los resultados con los reportados en otros estudios y en la literatura científica (Fahrenheit & ZwickRoell, 2025b).

Simulación numérica del comportamiento mecánico en software CAD.

El uso de herramientas como SolidWorks Simulation o ANSYS permite realizar análisis por elementos finitos (FEA), prediciendo el comportamiento de las probetas bajo carga. Mediante la simulación se puede validar la correlación entre los resultados experimentales y virtuales, identificando concentraciones de esfuerzos y modos de falla.

Esto complementa el análisis físico, permitiendo determinar la fiabilidad de los modelos numéricos y optimizar parámetros antes de la impresión (ANSYS, 2024).

Materiales y Métodos

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque experimental, utilizando material termoplástico PETG para la fabricación de probetas normalizadas mediante impresión 3D. Se emplearon dos impresoras de distinta categoría tecnológica Prusa MK3.5 y Artillery Sidewinder X1 con el propósito de comparar su desempeño mecánico y eficiencia de impresión bajo condiciones controladas.

Materiales:

Para el desarrollo del presente estudio se emplearon distintos equipos y materiales que permitieron la fabricación de las probetas, su caracterización mecánica y el análisis de sus propiedades estructurales. A continuación, se describen brevemente los principales elementos utilizados:

- **Prusa MK3.5:** Impresora 3D de tecnología FDM reconocida por su precisión, estabilidad y calidad de extrusión es decir que tan constante es el flujo del filamento a través de la boquilla. La Prusa MK3.5 es una impresora 3D de tecnología FDM reconocida por su precisión y estabilidad; sus principales características técnicas se presentan en la Tabla 1 (Prusa, 2024).

Tabla 1.*Características técnicas de la impresora Prusa MK3.5*

Parámetro	Descripción y especificación
Fabricante	Prusa Research (República Checa)
Modelo	Original Prusa MK3.5
Tecnología de impresión	FDM (Modelado por Deposición Fundida)
Volumen de impresión	250 x 210 x 210
Materiales compatibles	PLA, PETG, ABS, ASA, FLEX, PC, NYLON
Diámetro de filamento	1,75 mm
Velocidad de impresión	Hasta 200 mm/s (recomendada 60-100mm/s)
Resolución de capa	0,05 – 0,35 mm
Temperatura máxima de extrusor	300 °C
Temperatura máxima de cama caliente	120 °C
Tipo de extrusor	Direct Drive Bondtech con hotend E3D V6
Superficie de impresión	Hoja de acero flexible con recubrimiento PEI
Nivelación de cama	Automática con sensor SuperPINDA
Conectividad	Tarjeta microSD, USB, WIFI
Fuente de alimentación	24V/240W
Peso	7 kg
Precio aproximado	1200 – 1250 USD

Nota. Datos elaborados con base en el manual técnico del fabricante y reseñas oficiales (Prusa Research, 2024).

- **Artillery Sidewinder X1:** Impresora 3D de gran formato y funcionamiento silencioso, equipada con un sistema de extrusión directa y cama calefactora de rápida respuesta térmica sus principales características técnicas se presentan en la Tabla 2 (Tom, 2022).

Tabla 2.*Características técnicas de la impresora Artillery Sidewinder X1*

Parámetro	Descripción y especificación
Fabricante	Artillery (China)
Modelo	Sidewinder X1
Tecnología de impresión	FDM (Modelado por deposición fundida)
Volumen de impresión	300 x 300 x 400
Materiales compatibles	PLA, ABS, TPU, PETG, y otros filamentos de 1,75mm
Diámetro de filamento	1,75 mm
Velocidad de impresión	Hasta 150 mm/s (recomendada 60-80mm/s)
Resolución de capa	0,1 – 0,35 mm
Temperatura máxima de extrusor	240 °C
Temperatura máxima de cama caliente	130 °C
Tipo de extrusor	Direct Drive Titan Aero
Superficie de impresión	Base de vidrio templado con adhesión por calor
Nivelación de cama	Manual (compatible con sensores automáticos)
Conectividad	Tarjeta microSD
Fuente de alimentación	24V/500W
Peso	16,5 kg
Precio aproximado	400 – 450 USD

Nota. Datos elaborados con base en el manual técnico del fabricante Artillery (2024).

En la Tabla 3 se detalla la ficha técnica del filamento PETG utilizado en la investigación, incluyendo sus propiedades mecánicas, térmicas y parámetros recomendados de impresión.

Tabla 3.*Ficha técnica del filamento PETG*

Característica	Especificación
Nombre del material	PETG (polietileno tereftalato glicol)
Tipo de material	Termoplástico copo poliéster
Tecnología de impresión compatible	FDM (Modelado por Deposición Fundida)
Diámetro del filamento	1,75 mm (también disponible en 2,85)
Temperatura de impresión	220 – 250 °C
Temperatura de cama caliente	70 – 90 °C
Densidad	1,27 g/cm ³
Resistencia a la tracción	50 – 60 Mpa
Resistencia al impacto	Alta
Deformación térmica	Hasta 80°C
Velocidad de impresión recomendada	40 – 60 mm/s
Contracción	Muy baja
Acabado superficial	Brillante y liso
Solubilidad	Insoluble en agua
Higroscopicidad	Media (Absorbe algo de humedad del ambiente)
Colores disponibles	Transparente, opaco, mate, rojo
Modulo elástico	2.1-2.4 GPa
Aplicaciones comunes	Piezas mecánicas, componentes funcionales, prototipos resistentes al calor, envases
Precio Aproximado	20 – 35 USD

Nota. Datos elaborados con base en fichas técnicas de fabricantes de filamentos, como eSUN y Prusa Research (2024).

- **Software de laminado PrusaSlicer:** Software de laminado empleado para la preparación de los modelos 3D antes de su impresión. Permite ajustar parámetros como la velocidad, temperatura, altura de capa y densidad de relleno, asegurando la uniformidad en la fabricación de las probetas (Josef Prusa, 2022).

- **SolidWorks:** Software CAD utilizado para el modelado tridimensional de las probetas. Permite crear diseños precisos y paramétricos, asegurando el cumplimiento de las dimensiones establecidas por las normas de ensayo y facilitando su posterior preparación para la impresión 3D (Dutirl,2023).
- **Software CAD y de simulación ANSY WORKBENCH:** Software CAD y de simulación utilizado para el modelado geométrico y el análisis numérico de las probetas. Facilita la evaluación del comportamiento del material bajo distintas condiciones de carga, complementando los resultados experimentales obtenidos en laboratorio (Dutirl,2023).

Equipos de medición y ensayo

- **Máquina universal de ensayos Tinius Olsen H25KS:** Equipo empleado para realizar los ensayos de tracción y flexión. Posee una capacidad máxima de 25 kN y una precisión de 0,01 N, lo que permite obtener datos confiables sobre la resistencia y el módulo de elasticidad del material (Tinius Olsen Testing Machine Company, 2023).
- **Calibrador de vernier Mitutoyo Absolute Digimatic (12” /300 mm):** Instrumento de precisión con apreciación de 0,01 mm, utilizado para medir las dimensiones de las probetas y garantizar el cumplimiento de las normas ASTM correspondientes (Imporcom, 2025).
- **Micrómetro analógico Mitutoyo 103-104:** Dispositivo de alta exactitud, con una apreciación de 0,01 mm, empleado para verificar espesores y detalles dimensionales críticos en las probetas (Imporcom, 2025).
- **Termohigrómetro Elitech RCW-800 Wifi:** Instrumento utilizado para registrar las condiciones ambientales durante los ensayos. Posee una apreciación de 0,1 °C y 0,1 %HR, permitiendo controlar la temperatura y humedad relativa del entorno, factores que pueden influir en el comportamiento mecánico del PETG (Imporcom, 2025).

Método Deductivo

La investigación se desarrolló bajo un enfoque experimental y el método deductivo, partiendo de ideas generales sobre el funcionamiento de las impresoras 3D Prusa MK3.5 y Artillery Sidewinder X1 para llegar a conclusiones basadas en los resultados de laboratorio. Este método permitió analizar la relación causa-efecto entre el tipo de impresora (variable independiente) y la resistencia mecánica y tiempo de

impresión (variables dependientes). Se imprimieron probetas de PETG bajo condiciones controladas, con 100 % de relleno, y se realizaron ensayos de tracción y flexión según las normas ASTM D638-22 y D790-17. El objetivo fue comprobar si las diferencias tecnológicas y de costo influyen en la calidad y resistencia de las piezas, determinando si una impresora de gama alta justifica su precio. Las pruebas se efectuaron en los laboratorios de la UIDE y la EPN, bajo condiciones ambientales controladas para asegurar la validez de los resultados.

Parámetros de impresión

Para que los resultados de esta impresión sean totalmente válidos todas las probetas fueron fabricadas bajo las mismas condiciones y se procuró mantener todos los parámetros idénticos en especial los que influyen en su resistencia mecánica. De esta forma se detallan los parámetros de ambas impresoras los cuales se mantuvieron en igualdad de condiciones durante todo este proceso, como se resume en la tabla 4.

Tabla 4.

Parámetros de impresión

Parámetro	Prusa MK3.5	Artillery X1	Observaciones
Altura de capa	0.20 mm estructural	0.20 mm estructural	Igual para ambas
Temperatura del extrusor.	230 °C	230 °C	Configuración estándar para PETG.
Temperatura de cama.	90 °C	90°C	Uniforme para asegurar adhesión
Velocidad de Impresión	80 mm/s	60 mm/s	Diferencia en V.
Relleno %	100%	100%	Maximiza rigidez y resistencia
Tiempo de impresión	4 horas	8 horas	Calibración efectiva
Patrón de relleno	Rectilíneo	Rectilíneo	Patrón uniforme

Nota. Elaboración propia con base en configuraciones de impresión controladas empleadas en el estudio.

Posteriormente se inició un proceso de medición a cada probeta con un calibrador digital de precisión (± 0.2 mm) y determinar que no exista ninguna irregularidad dimensional con los valores establecidos en las normas ASTM. Finalmente, todas las probetas fueron almacenadas durante un período de 24 horas en un ambiente controlado antes de realizar los ensayos mecánicos para una mayor efectividad de resultados previo a las pruebas de laboratorio.

Simulación numérica de los ensayos mecánicos en ANSYS Workbench 2025

Con el objetivo de complementar los ensayos experimentales realizados en la Universidad politécnica Nacional, se desarrolló unas simulaciones numéricas de los ensayos de tracción y flexión bajo la norma ASTM D638-14 y ASTM D790-17, usando el software ANSYS Workbench 2025. Aplicando el módulo de análisis estático estructural, el cual es el adecuado para medir el comportamiento del material PETG bajo diferentes condiciones de carga.

Resultados

Este capítulo presenta los resultados de los ensayos de tracción y flexión realizados en probetas de PETG fabricadas con las impresoras 3D Prusa MK3.5 y Artillery Sidewinder X1, con el fin de comparar su comportamiento mecánico y evaluar la influencia del proceso de impresión en la resistencia, rigidez y deformación del material. Las pruebas se efectuaron en el Laboratorio de Nuevos Materiales (LANUM) de la EPN, bajo normas ASTM D638-22 y D790-17, y en condiciones ambientales controladas para asegurar la fiabilidad de los resultados.

Ensayo de tracción

En la tabla 5 se presentan los resultados promedio obtenidos en los ensayos de tracción realizados a las probetas impresas con las impresoras Prusa MK3.5 y Artillery Sidewinder X1, empleando material PETG con un relleno del 100 % y bajo los mismos parámetros de impresión.

Tabla 5.

Resultados del ensayo de tracción para las probetas del grupo Artillery Sidewinder X1 y Prusa MK3.5.

Impresora 3D	Número de probetas	Fuerza a la rotura (N)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo secante de elasticidad (MPa)	Esfuerzo a la tracción en la rotura (MPa)	Elongación a la rotura (%)
Prusa MK3.5	5	1261.72	30.62	3274.20	25.15	3.52
Artillery X1	5	1622.29	38.11	3647.72	29.10	4.98

Nota. Datos obtenidos del Laboratorio de la Escuela Politécnica Nacional (LANUM).

Los resultados del ensayo de tracción evidencian un mejor desempeño mecánico en las probetas fabricadas con la Artillery Sidewinder X1, que alcanzaron una resistencia a la tracción promedio de 38.11 MPa, superior en un 24.5 % respecto a la Prusa MK3.5 (30.62 MPa). Asimismo, se observó una mayor rigidez (3647.72 MPa) y elongación a la rotura (4.98 %), indicando una mejor adherencia entre capas y ductilidad del material. En contraste, la Prusa MK3.5 mostró menor resistencia, pero una mayor estabilidad dimensional, reflejando un proceso de impresión más controlado.

Ensayo de Flexión

Las pruebas de flexión se realizaron bajo el método de flexión en tres puntos establecido por la norma ASTM D790-17, con el propósito de evaluar el comportamiento mecánico del material PETG fabricado mediante impresión 3D en las impresoras Artillery Sidewinder X1 y Prusa MK3.5. En la Tabla 6 se resumen los valores promedio obtenidos para cada grupo de probetas empleando material PETG con un relleno del 100 % y bajo los mismos parámetros de impresión.

Tabla 6.

Resultados del ensayo de flexión para las probetas del grupo Artillery Sidewinder X1 y Prusa MK3.5.

Impresora 3D	Número de probetas	Carga máxima promedio (N)	Resistencia a la Flexión (MPa)	Módulo tangente (MPa)	Deformación máxima (%)	Coefficiente de variación (%)
Artillery Sidewinder X1	5	115.87	68.06	1811.15	5.0	1.39
Prusa MK3.5	5	102.32	61.55	1704.90	5.0	5.78

Nota. Datos obtenidos del Laboratorio de la Escuela Politécnica Nacional (LANUM).

A partir de los resultados experimentales del ensayo de flexión presentados en la Tabla 6, se observa que las probetas fabricadas con la impresora Artillery Sidewinder X1 presentan una mayor resistencia a la flexión promedio (68,06 MPa) en comparación con las obtenidas con la Prusa MK3.5 (61,55 MPa). De igual manera, el módulo tangente obtenido para la Artillery fue superior, lo que indica un comportamiento más rígido del material fabricado con esta impresora.

En cuanto a la deformación máxima, ambos grupos de probetas alcanzaron un valor similar del 5% porque es lo que menciona la normativa ASTM D790-17. Sin embargo, el coeficiente de variación fue considerablemente menor en la Artillery Sidewinder X1 (1,39 %) frente a la Prusa MK3.5 (5,78 %), evidenciando una mayor repetibilidad y estabilidad en el proceso de impresión.

Comparación de los resultados experimentales y valores teóricos del material con los obtenidos mediante la simulación numérica en ANSYS Workbench 2025.

La Tabla 7 resume la comparación entre los resultados experimentales de tracción y los valores obtenidos mediante simulación de tracción en ANSYS Workbench 2025 conjuntamente con los valores teóricos del material.

Tabla 7.

Comparación entre resultados experimentales de tracción, simulación y datos teóricos del material.

Parámetro	Laboratorio EPN–Artillery	Laboratorio EPN–Prusa	Simulación ANSYS	Valor teórico (literatura PETG)
Fuerza máxima (N)	1662,29	1261,72	1442,00	1800–2000 N
Resistencia máxima (MPa)	38,11	30,62	35,98	50–55 MPa
Módulo de elasticidad (MPa)	3647,72	3274,20	3461,00	2100–2300 MPa
Elongación a la rotura (%)	4,89	3,52	2,79	6–10 %
Condición de carga aplicada (N)	1622,29	1261,72	1442,00	1800–2000 N

Nota. Elaboración propia con base en datos del LANUM–EPN (2025) y simulaciones en ANSYS

Con el objetivo de correlacionar los resultados obtenidos de forma experimental en el laboratorio de nuevos materiales de la EPN con los valores que fueron simulados se realizó un modelo numérico promedio en ANSYS basado en la norma ASTM D638-22, realizando un análisis con las medidas establecidas para la probeta tipo 1 fabricada en PETG, ya que de esta manera se puede representar el comportamiento de ambos grupos de probetas definiendo valores que sean promedios de las propiedades mecánicas que se experimentó siendo en este caso elasticidad de

3461 MPa, coeficiente de Poisson de 0,35 y resistencia a la atracción de 35,98 MPa Y por último la carga aplicada promedio de las fuerzas últimas de atracción de ambos grupos de 1442 N.

Comparación de resultados experimentales y simulación en ANSYS del ensayo de flexión según la norma ASTM D790-17

La Tabla 8 resume la comparación entre los resultados experimentales de flexión y los valores obtenidos mediante simulación de flexión en ANSYS Workbench 2025.

Tabla 8.

Comparación entre resultados experimentales de flexión, simulación y datos teóricos del material.

Parámetro	Laboratorio EPN – Artillery	Laboratorio EPN – Prusa	Simulación ANSYS	Valor teórico (literatura PETG)
Carga máxima (N)	115,87	102,32	138,69	140–160 N
Esfuerzo máximo (MPa)	68,06	61,55	70,00	75–85 MPa
Módulo de elasticidad (MPa)	1811,15	1704,90	1760,00	2000–2300 MPa
Deformación máxima	5 % (límite ASTM D790)	5 % (límite ASTM D790)	5%	5–10 % (flexión sin fractura)
Modo de falla	Deformación sin fractura (5 %)	Deformación sin fractura (5 %)	Deformación plástica localizada en el punto medio	Comportamiento semidúctil sin fractura visible

Nota. Elaboración propia con base en datos del LANUM–EPN (2025) y simulaciones en

ANSYS

Los resultados muestran que las simulaciones presentan una alta concordancia con los valores experimentales, especialmente en los esfuerzos máximos, con diferencias menores al 6 %. Esto valida la consistencia del modelo numérico y confirma que el método de elementos finitos implementado en ANSYS Workbench es una herramienta

confiable para la predicción del comportamiento mecánico del PETG impreso mediante tecnología FDM.

Análisis de resultados

El análisis de resultados permite evaluar de manera integral el comportamiento mecánico del material PETG fabricado mediante impresión 3D con las impresoras Prusa MK3.5 y Artillery Sidewinder X1, tanto desde un enfoque experimental como numérico. A partir de los ensayos de tracción y flexión, y de las simulaciones realizadas en ANSYS Workbench 2025, fue posible determinar las diferencias en resistencia, rigidez y consistencia estructural de las probetas, así como validar el modelo computacional empleado.

Ensayos de tracción

En los ensayos de tracción, la impresora Artillery Sidewinder X1 alcanzó una resistencia promedio de 38,11 MPa, valor aproximadamente un 24 % superior al obtenido con la Prusa MK3.5 (30,62 MPa). Esta diferencia sugiere una mayor resistencia mecánica asociada a una mejor continuidad del material y adhesión interlaminar en las probetas fabricadas con la Artillery. Al comparar estos resultados con los valores teóricos del PETG reportados en la literatura (52–55 MPa), se observa una reducción del orden del 25–30 %, atribuible a la naturaleza anisotrópica del proceso FDM, la presencia de vacíos internos y la orientación de las capas, factores que afectan negativamente la resistencia y ductilidad frente a un material homogéneo.

La consistencia de los valores obtenidos entre probetas fabricadas bajo las mismas condiciones evidencia una adecuada repetibilidad experimental, coherente con el comportamiento observado en los ensayos de flexión.

Ensayos de flexión

En los ensayos de flexión, la Artillery Sidewinder X1 presentó una resistencia promedio de 68,06 MPa, aproximadamente un 10,6 % superior a la obtenida con la Prusa MK3.5 (61,55 MPa). Este comportamiento refleja una mayor rigidez estructural, posiblemente asociada a una mejor adhesión interlaminar y menor presencia de discontinuidades internas. No obstante, esta mayor rigidez se tradujo en una menor capacidad de deformación, mientras que las probetas fabricadas con la Prusa MK3.5 mostraron mayor deformación antes de alcanzar el límite establecido.

Ambas impresoras alcanzaron una deformación máxima del 5 % sin fractura, de acuerdo con los criterios de la norma ASTM, confirmando el comportamiento semidúctil característico del PETG impreso mediante tecnología FDM y la coherencia entre los resultados de tracción y flexión

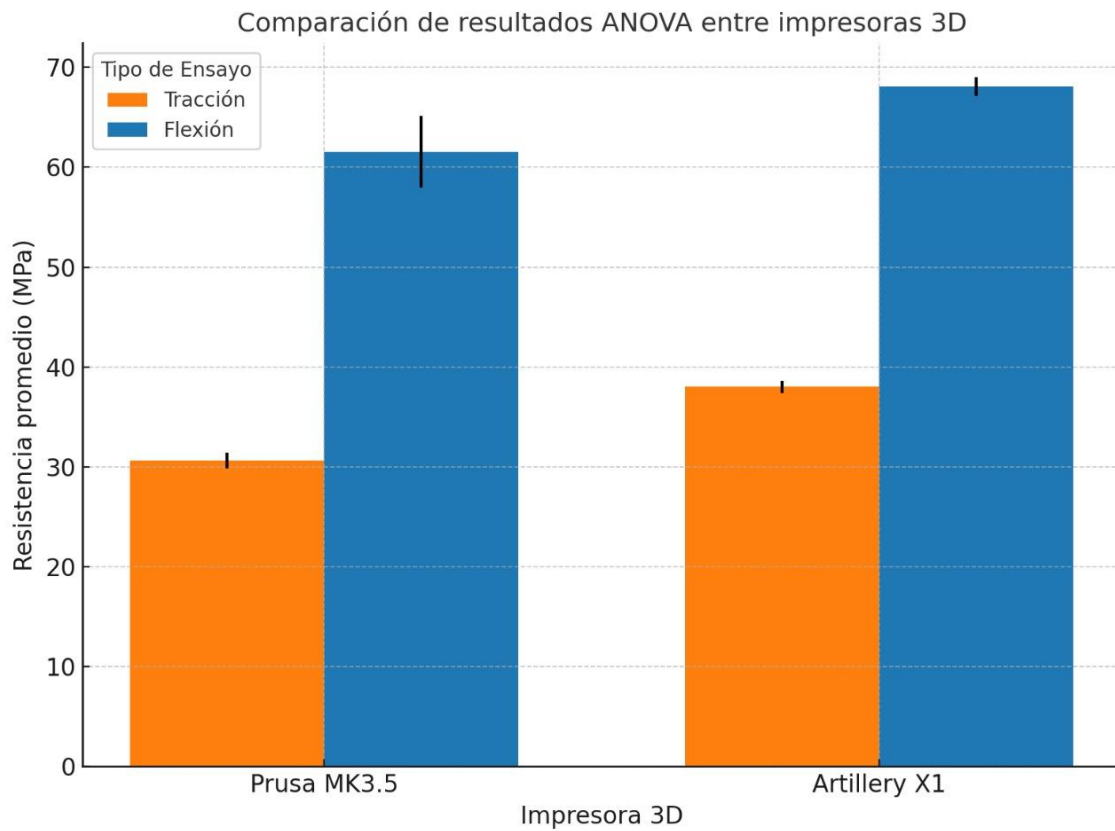
Simulaciones

Las simulaciones realizadas en ANSYS Workbench 2025 mostraron una adecuada concordancia con los resultados experimentales, respaldando la validez del modelo numérico. En tracción, la resistencia simulada (35,99 MPa) presentó una diferencia inferior al 6 % respecto al valor experimental máximo, mientras que en flexión el esfuerzo máximo simulado (70 MPa) difirió aproximadamente un 3 % del valor experimental (68,06 MPa). Las discrepancias observadas frente a los valores teóricos se atribuyen a que el modelo considera un material continuo y homogéneo, sin incorporar defectos propios del proceso FDM, como la porosidad y la anisotropía mecánica.

Interpretación general

En conjunto, los resultados experimentales y numéricos evidencian que el comportamiento mecánico del PETG impreso mediante tecnología FDM está fuertemente influenciado por las características estructurales y parámetros de calibración de cada impresora. La Artillery Sidewinder X1 mostró mayores valores de resistencia y rigidez, mientras que la Prusa MK3.5 presentó una respuesta más uniforme y estable entre probetas, lo que sugiere un mejor control dimensional y térmico durante el proceso de impresión. Estas tendencias se reflejaron tanto en los ensayos de tracción como de flexión, confirmando la coherencia de los resultados y la confiabilidad del modelo numérico implementado en ANSYS para la evaluación mecánica de piezas fabricadas mediante impresión 3D.

Figura 3.
Análisis ANOVA.



Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 3 se observa la comparación de los valores promedio de resistencia obtenidos en los ensayos de tracción y flexión para las impresoras Prusa MK3.5 y Artillery X1. Se evidencia que la impresora Artillery X1 presenta mayores valores promedio en ambos tipos de ensayo, siendo más pronunciada la diferencia en el ensayo de flexión, lo que concuerda con los resultados estadísticos obtenidos mediante el análisis ANOVA.

Los resultados del análisis estadístico ANOVA se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9.

Datos obtenidos de análisis ANOVA.

Ensayo	Impresoras	Promedio (MPa)	Desv.Est	F calculado	F critico	p-valor
Tracción	Prusa MK3.5	30.63	0.79	259.52	5.32	0.000000 2
Tracción	Artillery X1	38.00	0.64	259.52	5.32	0.000000 2
Flexión	Prusa MK3.5	61.53	3.57	15.60	5.32	0.0042
Flexión	Artillery X1	68.06	0.94	15.60	5.32	0.0042

Nota. Elaboración Propia.

Los resultados del análisis ANOVA presentados en la Tabla 9 muestran que existen diferencias estadísticamente significativas entre las impresoras Prusa MK3.5 y Artillery X1 tanto en el ensayo de tracción como en el de flexión, ya que los valores de p obtenidos son menores a 0,05. Esto confirma que el tipo de impresora 3D influye de manera significativa en las propiedades mecánicas del material PETG evaluado.

Conclusiones

- Los resultados experimentales demostraron que ambas impresoras 3D, Prusa MK3.5 y Artillery Sidewinder X1, fueron capaces de fabricar correctamente las probetas diseñadas, cumpliendo con las especificaciones dimensionales y los requisitos establecidos por las normativas ASTM aplicadas. Esto evidencia la estabilidad del proceso de impresión y confirma que el uso de parámetros de impresión controlados permite obtener probetas comparables entre equipos de distintas categorías tecnológicas.
- Los ensayos de tracción y flexión evidenciaron que la Artillery Sidewinder X1 presentó mayores valores promedio de resistencia mecánica, alcanzando 38,11 MPa en tracción y 68,06 MPa en flexión, en comparación con los valores obtenidos por la Prusa MK3.5, de 30,62 MPa y 61,55 MPa, respectivamente. Estos resultados indican una mayor capacidad de la Artillery para resistir esfuerzos y deformaciones antes de la falla.
- A pesar de presentar menores valores de resistencia, la Prusa MK3.5 mostró un comportamiento más uniforme entre las probetas ensayadas, con una variación inferior al 3 %, lo que refleja una mayor repetibilidad y control del proceso de impresión. Las diferencias observadas entre ambas impresoras se atribuyen principalmente a las características del sistema de extrusión y al control del proceso, bajo condiciones experimentales idénticas.
- La simulación estructural realizada en ANSYS Workbench 2025 presentó una buena concordancia con los resultados experimentales de tracción y flexión, especialmente en la distribución de esfuerzos y en la identificación de zonas críticas de deformación. Aunque existen diferencias en algunos valores absolutos debido a las idealizaciones propias del modelo numérico, la simulación se valida como una herramienta confiable y complementaria al ensayo experimental en el análisis mecánico de piezas fabricadas mediante manufactura aditiva.

Referencias

Systemes, D. (2022, 5 julio). *Impresión 3D*. Dassault Systemes. <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/3d-printing>

Eguillor, D. (2025, 5 marzo). Diferencia entre impresoras 3D FDM y FFF | AsorCAD. AsorCAD. <https://www.asorcad.es/blog/diferencia-entre-impresoras-3d-fdm-y-fff-comprendiendo-las-tecnologias-de-fabricacion-aditiva/>

seo@acespack.es. (2023, 23 julio). Filamento PETG: características y propiedades. Dynapro 3D | Empresa Dedicada Al Diseño Digital E Impresión 3D. <https://dynapro3d.com/filamento-petg-caracteristicas-y-propiedades/>

Verim, Ö., Saeed, O., Eid, M. H., Mahmoud, S. F., Saleh, D. I., & Elwakeel, A. E. (2025). Investigation of the effects of 3D printing parameters on mechanical tests of PLA parts produced by MEX 3D printing using Taguchi method. *Scientific Reports*, 15(1), 15008. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98832-0>

Fahrenheit, H., & ZwickRoell. (2025, 31 octubre). ASTM D638: Características de tracción en materiales plásticos. ASTM D638: Características de Tracción En Materiales Plásticos. <https://www.zwickroell.com/es/sectores/plasticos/termoplasticos-y-materiales-termoendurecibles/propiedades-de-traccion-astm-d638/>

Fahrenheit, H., & ZwickRoell. (2025b, octubre 31). ASTM D790 Ensayo de flexión 3 puntos plástico. ASTM D790 Ensayo de Flexión 3 Puntos Plástico. <https://www.zwickroell.com/es/sectores/plasticos/termoplasticos-y-materiales-termoendurecibles/ensayo-de-flexion-en-3-puntos-astm-d790/>

Engineering Solutions for Heavy Load Handling, Kimua Group. (2025, 15 mayo). Ventajas de la simulación con ANSYS para el diseño de. . . Kimua Group: Onshore-Offshore Wind Power, Railway, Marine Energies, Oil & Gas, Aerospace, Big Machinery, Science. <https://www.kimuagroup.com/es/noticias/ventajas-de-la-simulacion-con-ansys-para-el-diseno-de-utilidades/>

Shahrmiany, M. (2024, 31 julio). Layers blogs. <https://layers.app/es/blog/precios-eficientes-para-la-manufactura-aditiva/>

Original Prusa i3 MK3S/+ to MK3.5S upgrade kit | Impresoras 3D Original Prusa vendidas directamente por Josef Prusa. (s. f.). Prusa3D By Josef Prusa. <https://www.prusa3d.com/es/producto/original-prusa-i3-mk3s-to-mk3-5s-upgrade-kit-5/>

Tom. (2022, 16 diciembre). Artillery Sidewinder X1 Review – Tom’s 3D printing guides and reviews. <https://toms3d.org/2020/12/16/artillery-sidewinder-x1-review/>

Tinius Olsen Testing Machine Company. (2023, 3 julio). Tinius Olsen: Materials Testing Machines for Tensile, Compression, Impact and Hardness Testing. Tinius Olsen. <https://www.tiniusolsen.com/>

Imporcom. (2025, 1 julio). Registrador de temperatura y humedad Elitech Wifi RCW-800 THE. Imporcom - Importación&Comercio. <https://imporcomsa.com/registrador-de-temperatura-y-humedad-elitech-wifi-rcw-800-the/>

American Society for Testing and Materials. (2025a). ASTM D638-25: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM International. <https://www.astm.org/d638>

American Society for Testing and Materials. (2025b). ASTM D790-25: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. ASTM International. <https://www.astm.org/d790>

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2021). Materials Science and Engineering: An Introduction (11th ed.). Wiley.

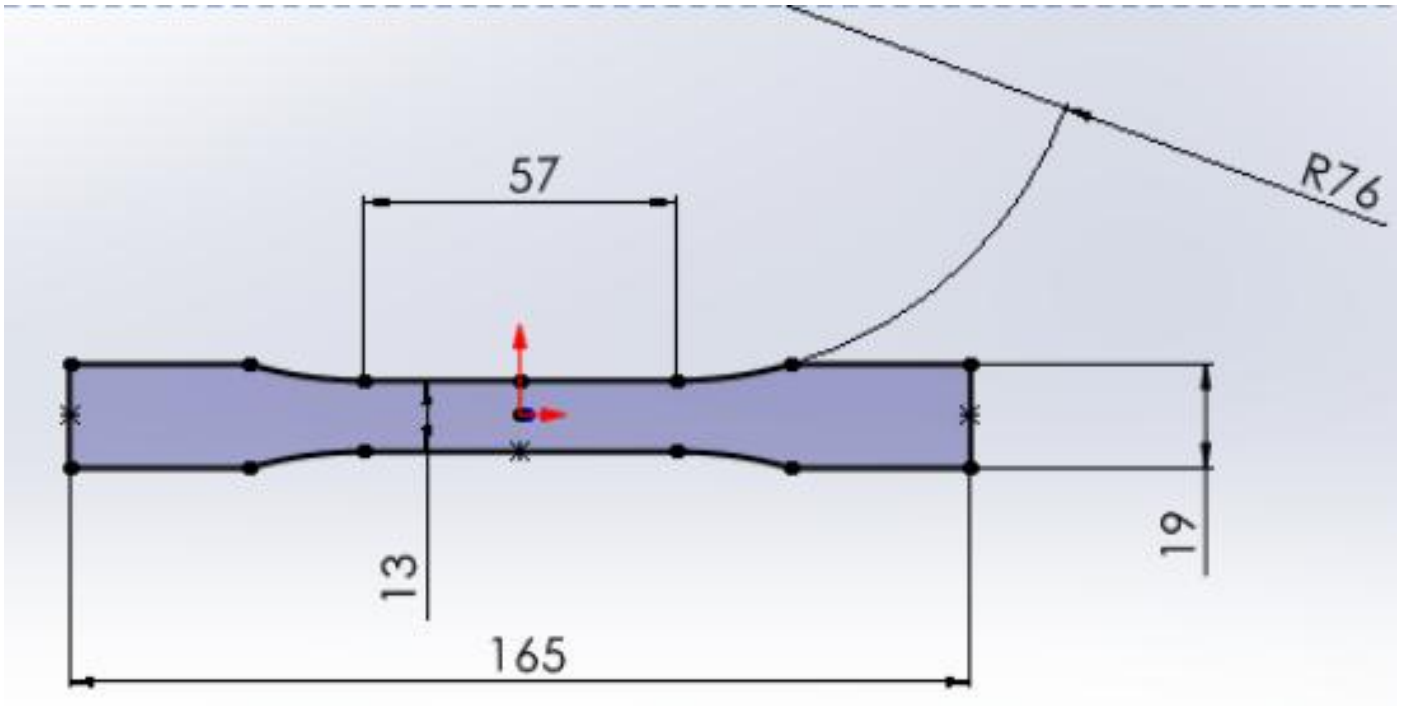
Asanchez. (2025, 20 febrero). La impresión 3D en la fabricación de prototipos | AsorCAD. AsorCAD. <https://www.asorcad.es/blog/la-impresion-3d-en-la-fabricacion-de-prototipos-revolucionando-e-innovando-la-industria-manufacturera/>

Anexos

Los anexos que se presentan a continuación complementan la información expuesta en este trabajo y sirven como respaldo de los resultados obtenidos.

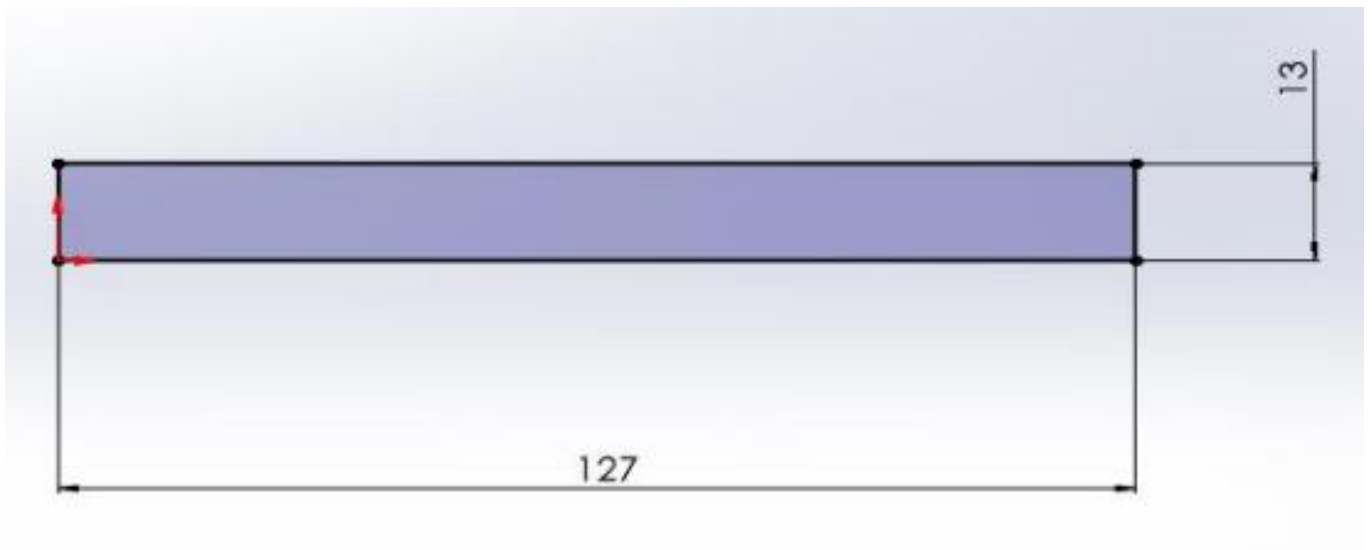
Anexo 1.

Dimensiones para el diseño de probetas en ensayos de tracción.



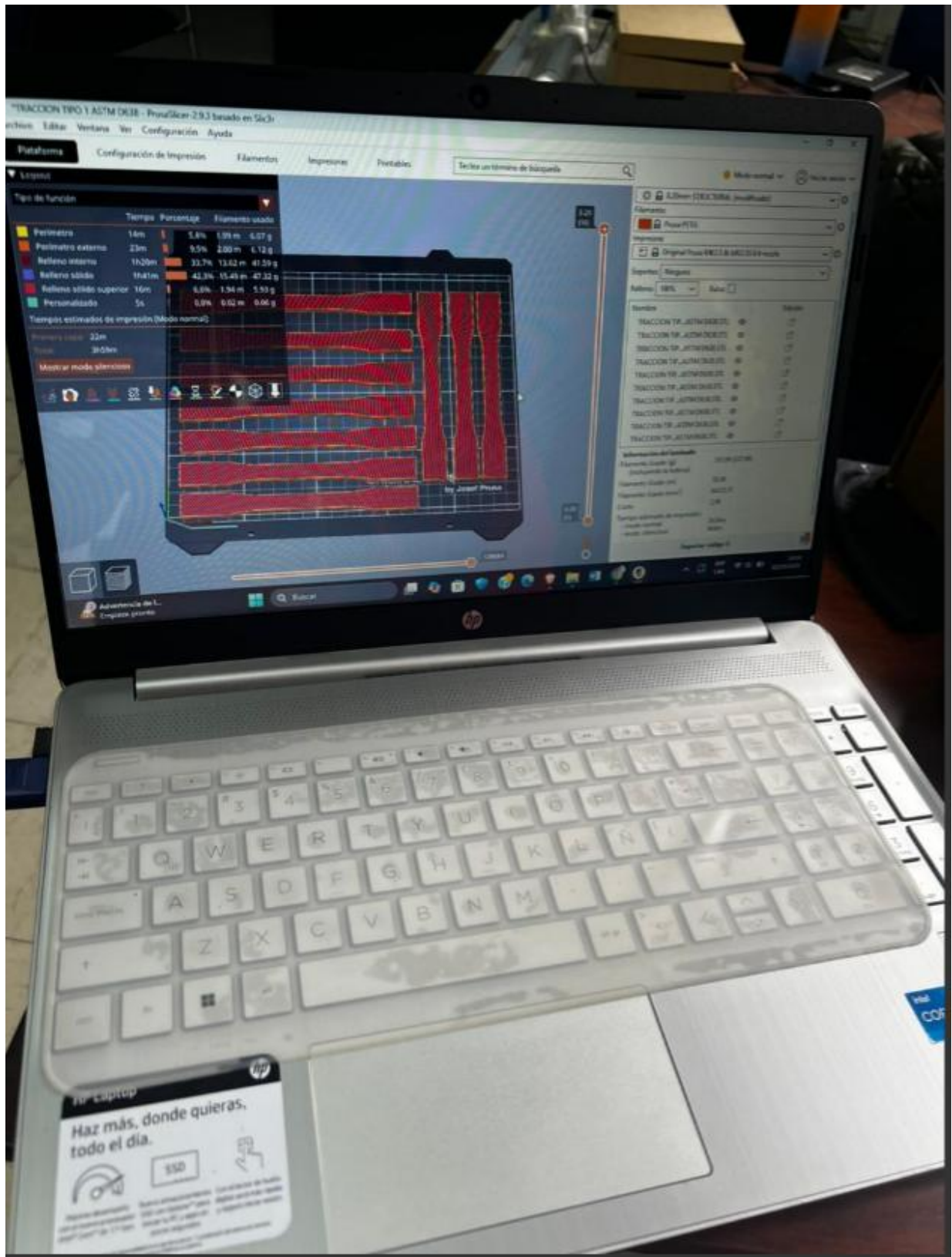
Anexo 2.

Dimensiones para el diseño de probetas en ensayos de flexión.



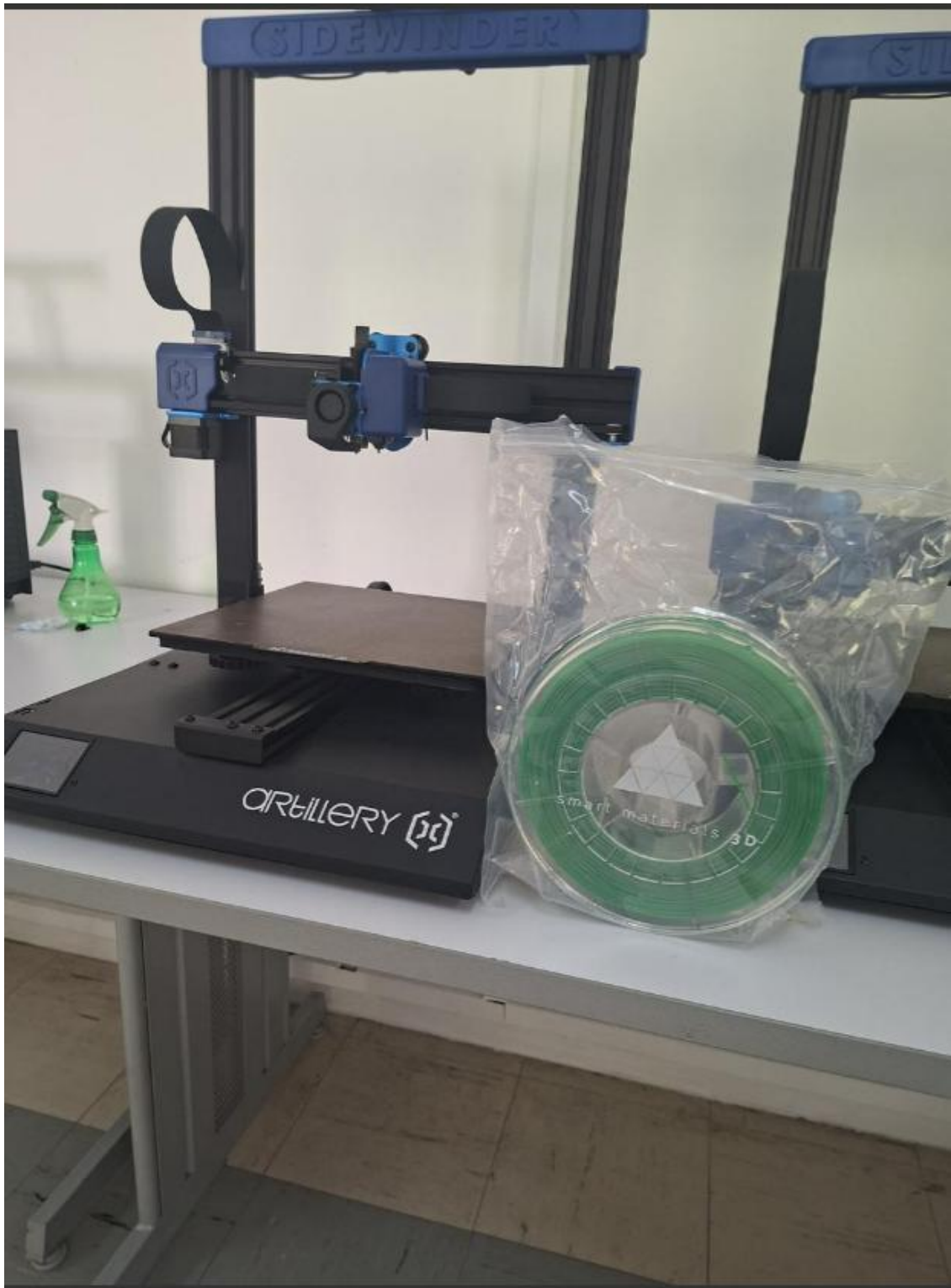
Anexo 3.

Proceso de preparación de probetas en el software Prusa Slicer.



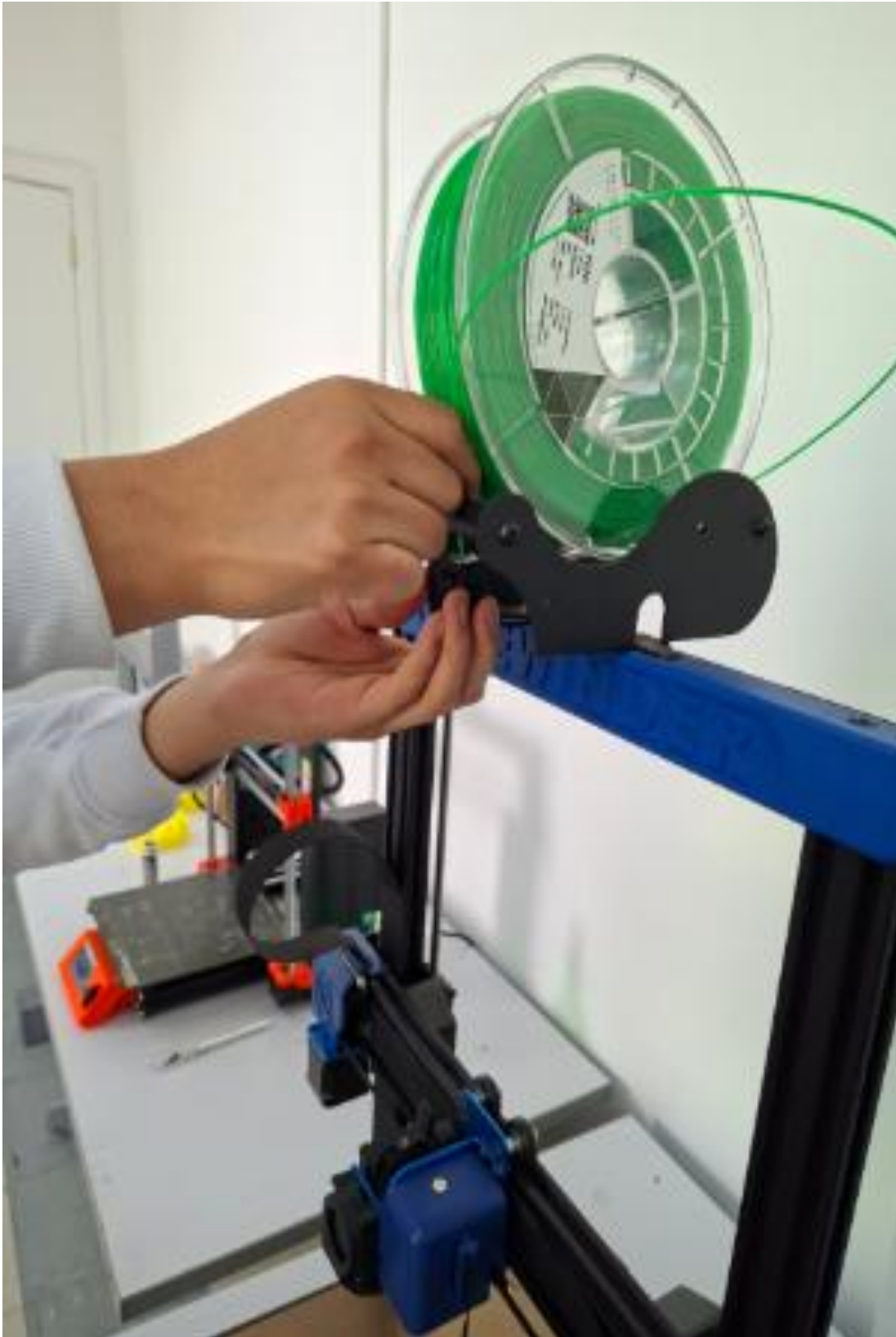
Anexo 4.

Proceso de impresión de probetas en Artillery Sidewinder XI.



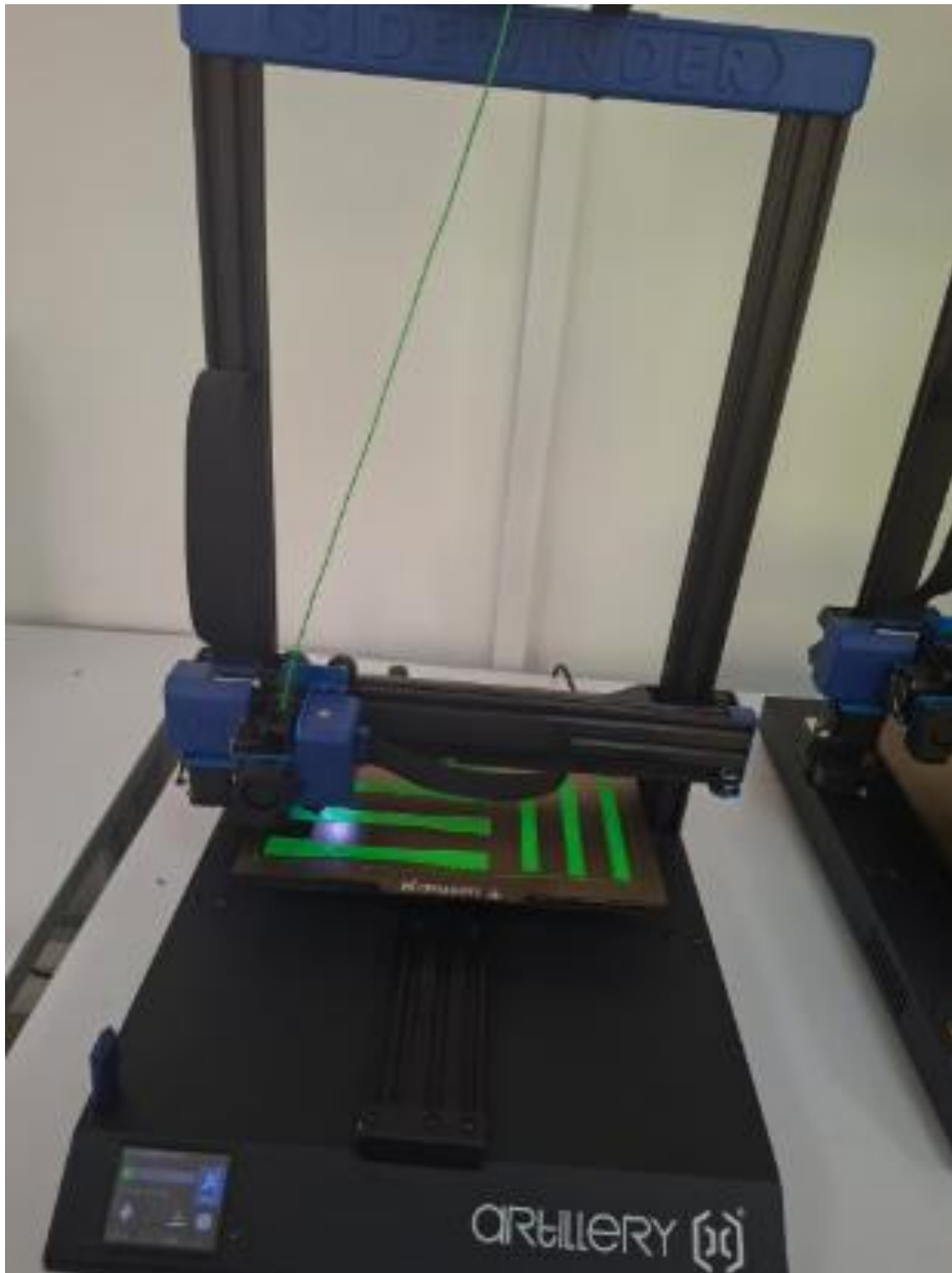
Anexo 5.

Proceso de colocación del filamento en la impresora Artillery Sidewinder X1



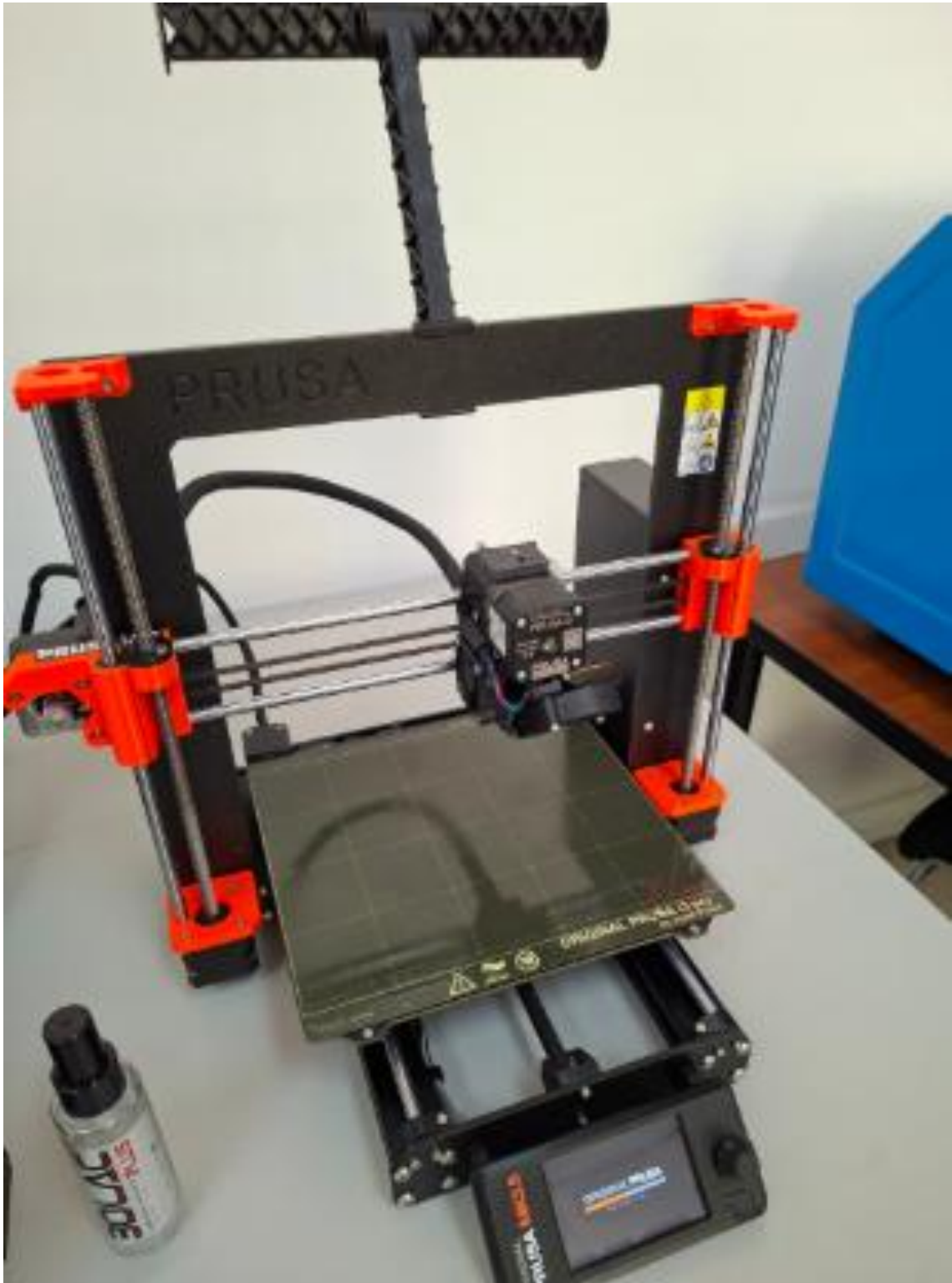
Anexo 6.

Proceso de impresión en la impresora Artillery Sidewinder X



Anexo 7.

Proceso de preparación e impresión de probetas en Prusa MK3.5.



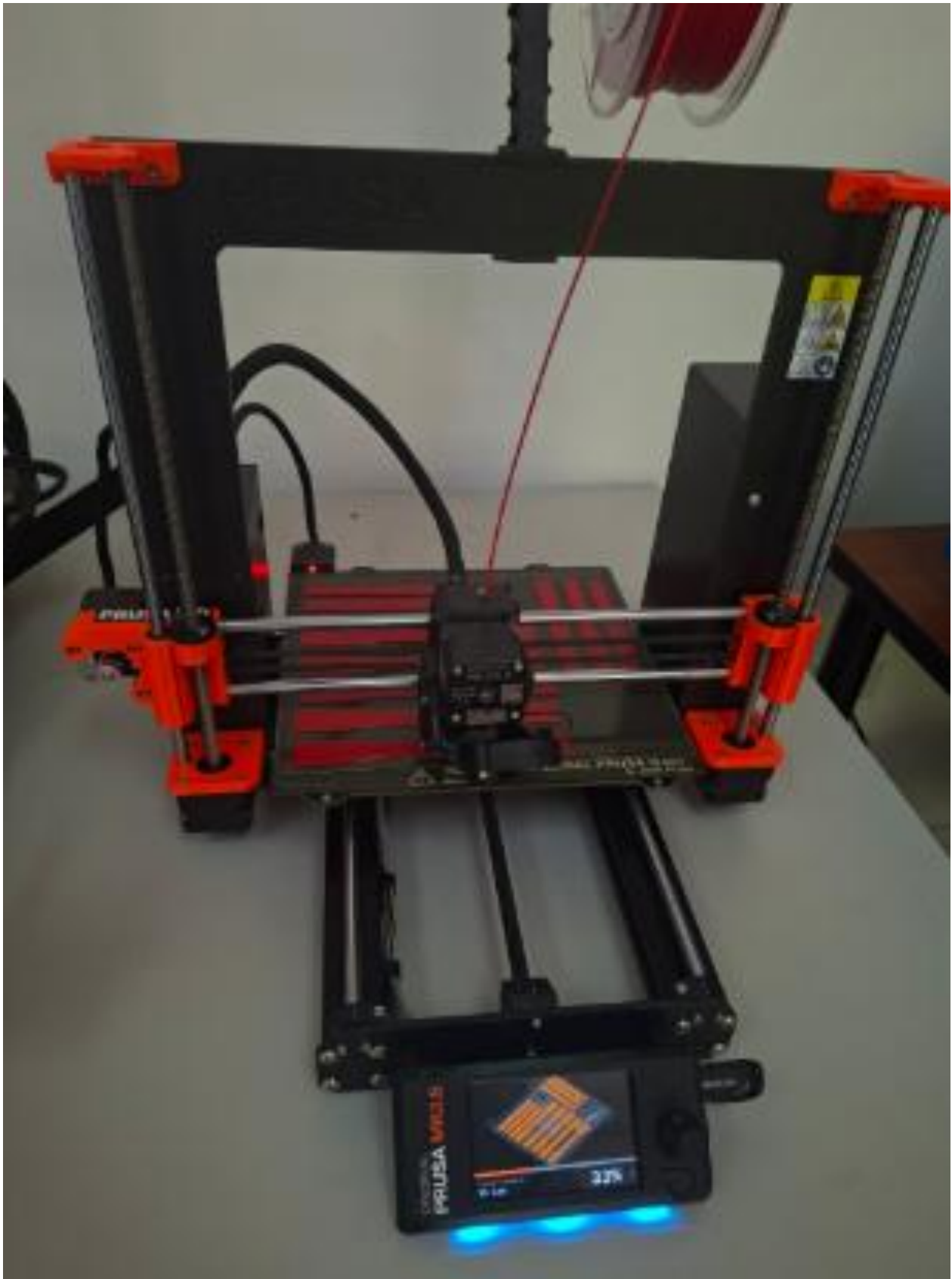
Anexo 8.

Proceso de colocación del filamento en la impresora Prusa MK3.5



Anexo 9.

Proceso de impresión de probetas en la impresora Prusa MK3.5



Anexo 10.

Proceso de ensayo de Tracción y Flexión en el laboratorio de la EPN.



Anexo 11.

Proceso de ensayo de Tracción y rotura en el laboratorio de la EPN.



Anexo 12.

Ejecución de ensayo de tracción en el laboratorio de la EPN





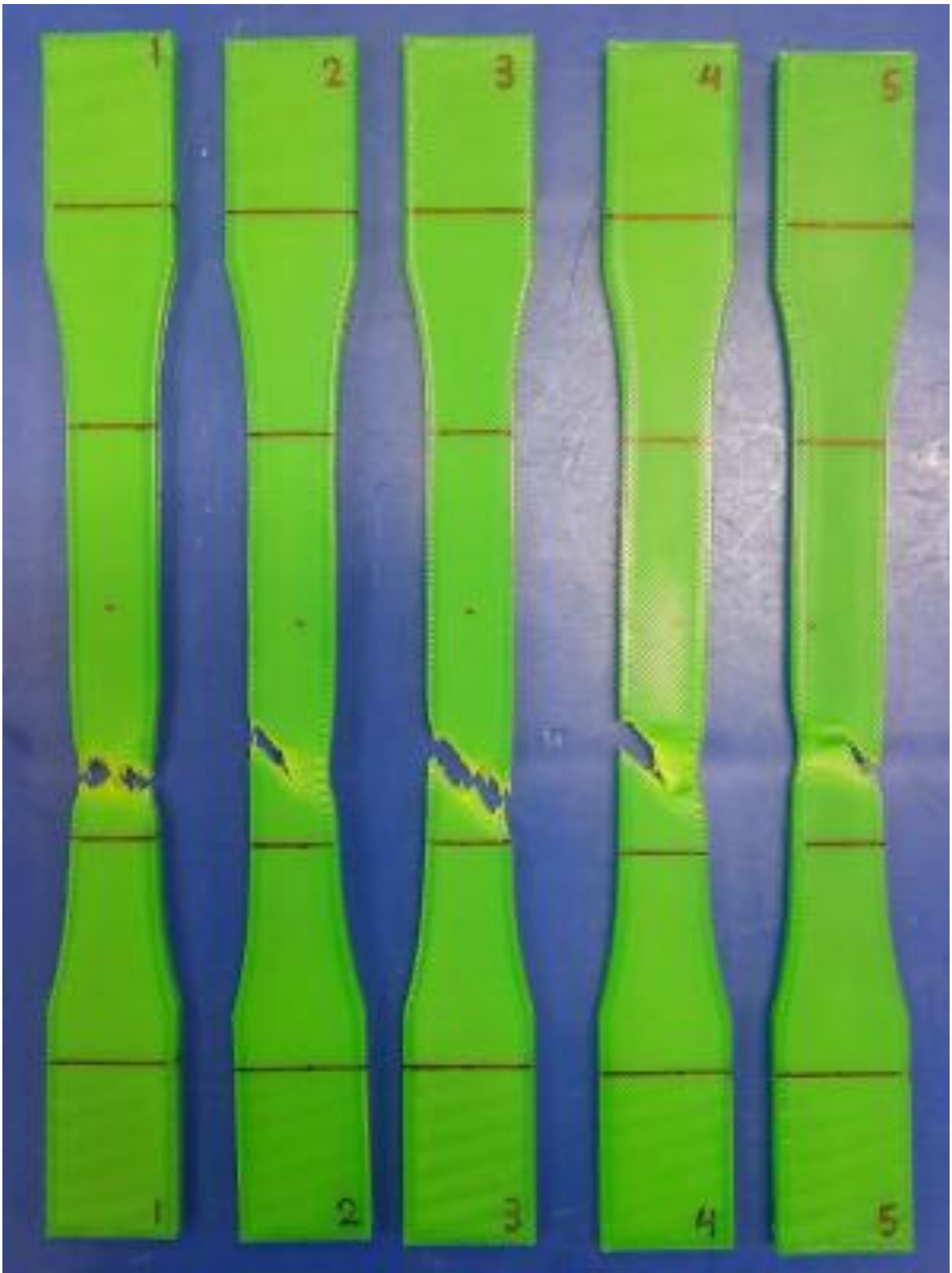
Anexo 13.

Ejecucion de ensayo de flexión en el laboratorio de la EPN



Anexo 14.

Condiciones finales de las probetas del grupo "Artillery" después de los ensayos de resistencia a la tracción.



Anexo 15.

Condiciones finales de las probetas del grupo "Prusa" después de los ensayos de resistencia a la tracción.



Anexo 16.

Condiciones finales de las probetas del grupo "Artillery" después de los ensayos de resistencia a la flexión.



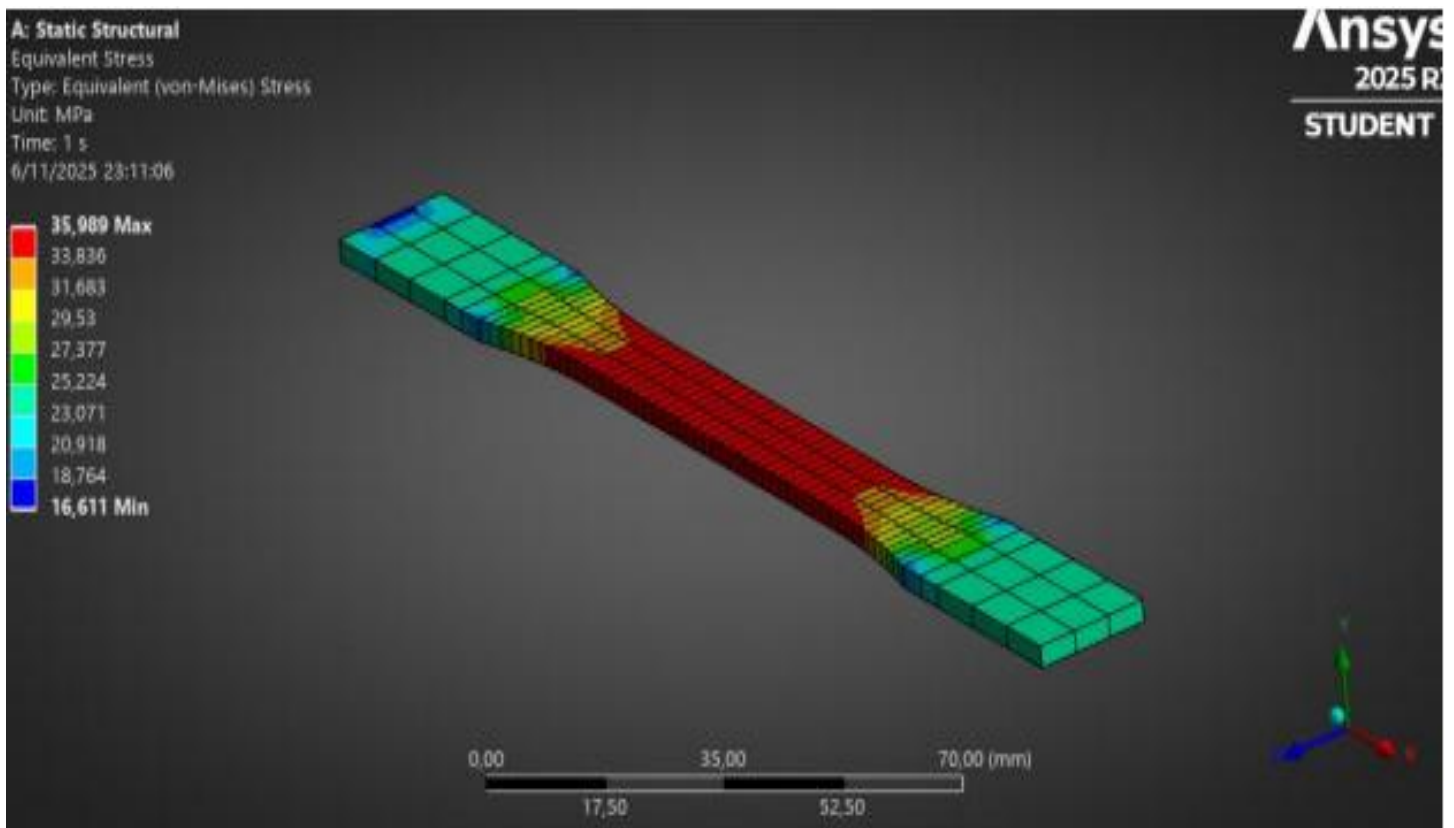
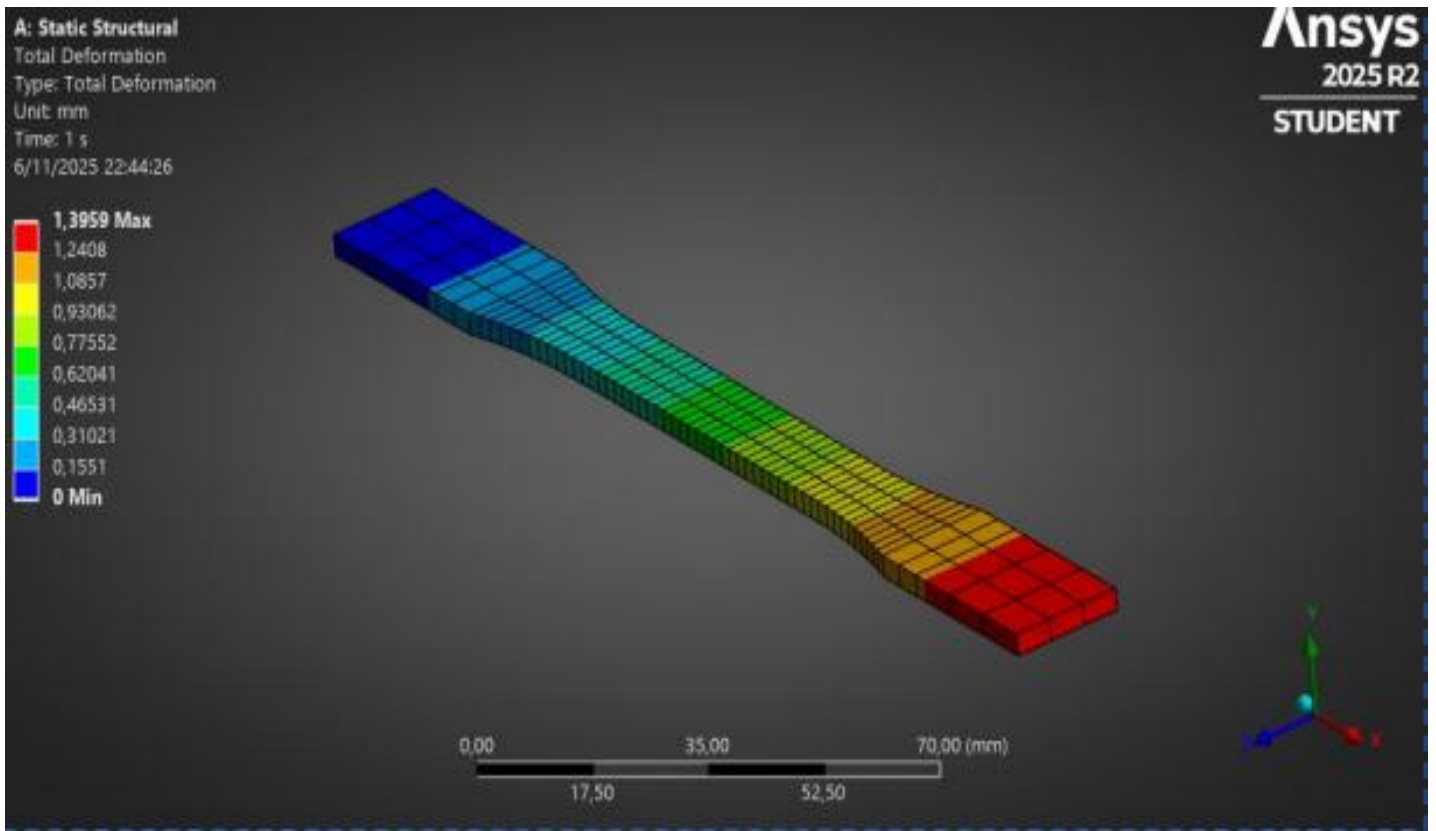
Anexo 17.

Condiciones finales de las probetas del grupo "Prusa" después de los ensayos de resistencia a la flexión.



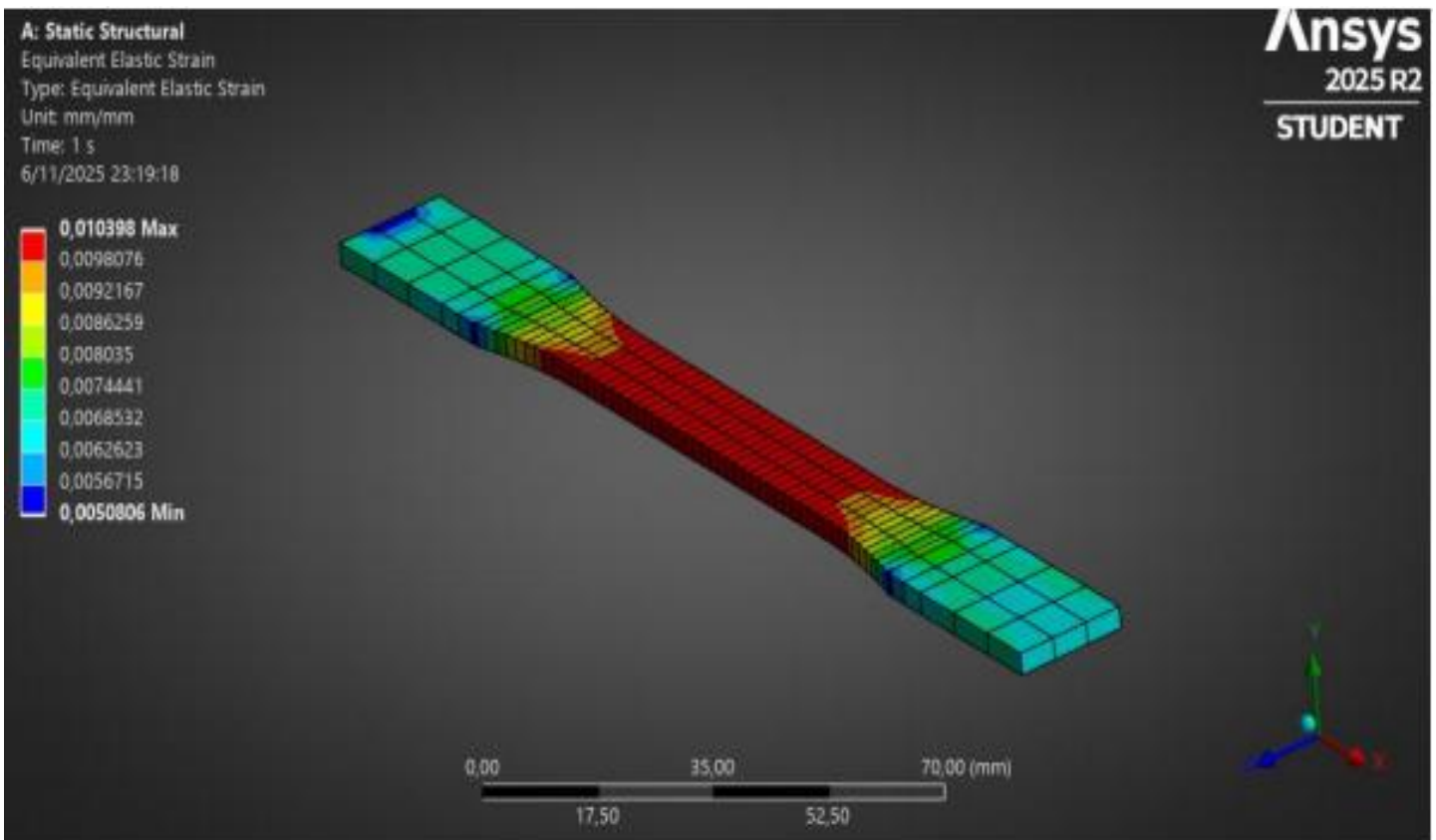
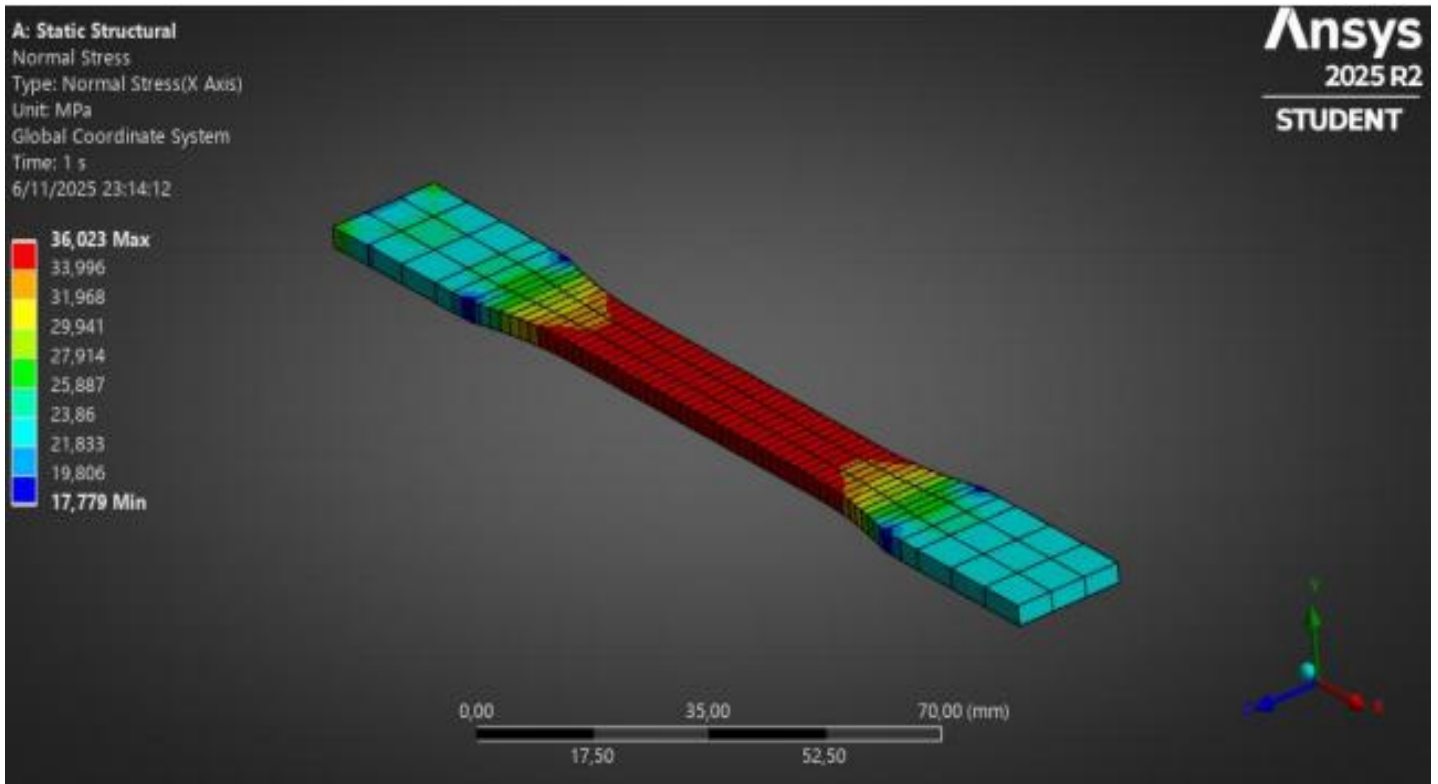
Anexo 18.

Distribución de la deformación total en la simulación de tracción del PETG en ANSYS Workbench(2025).



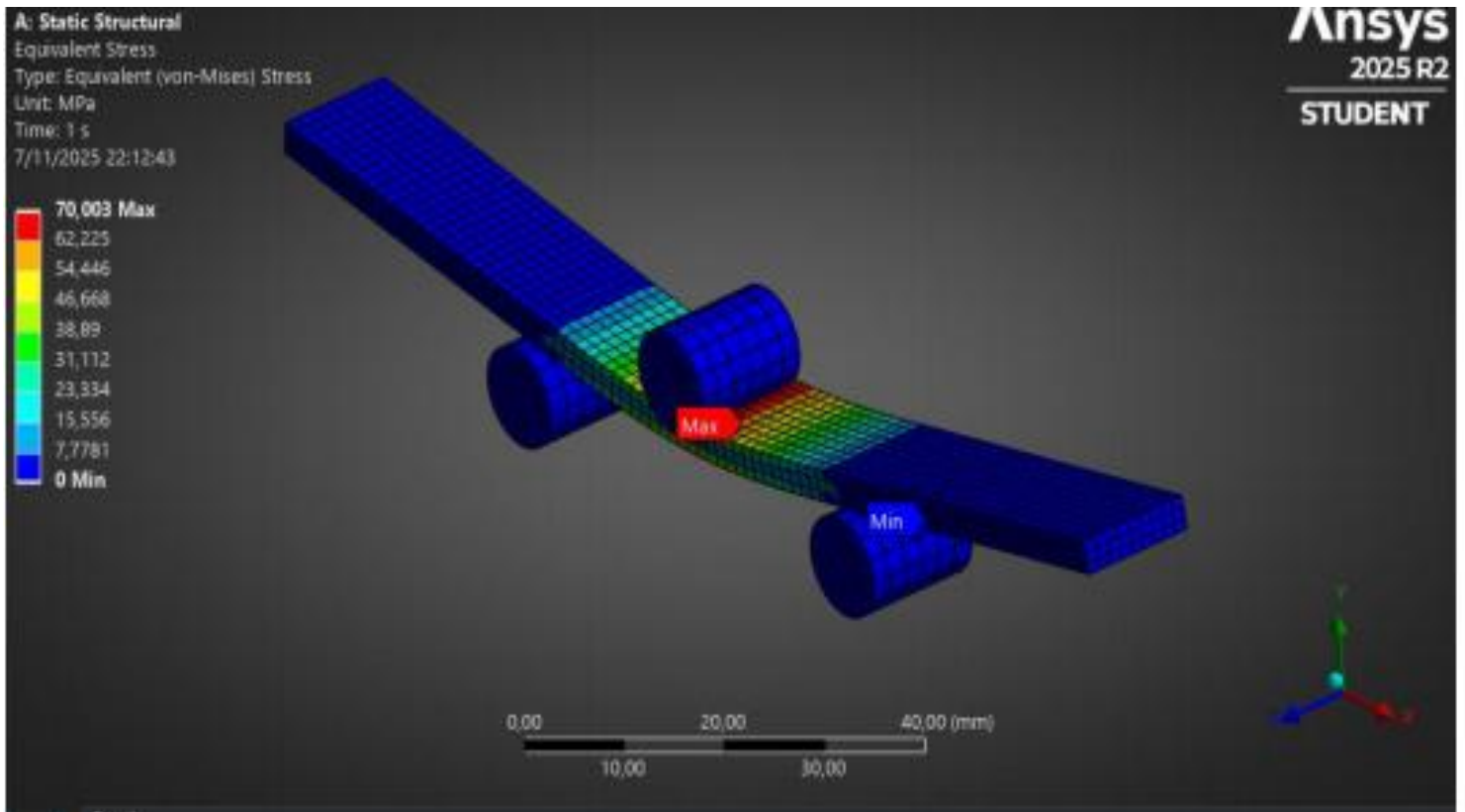
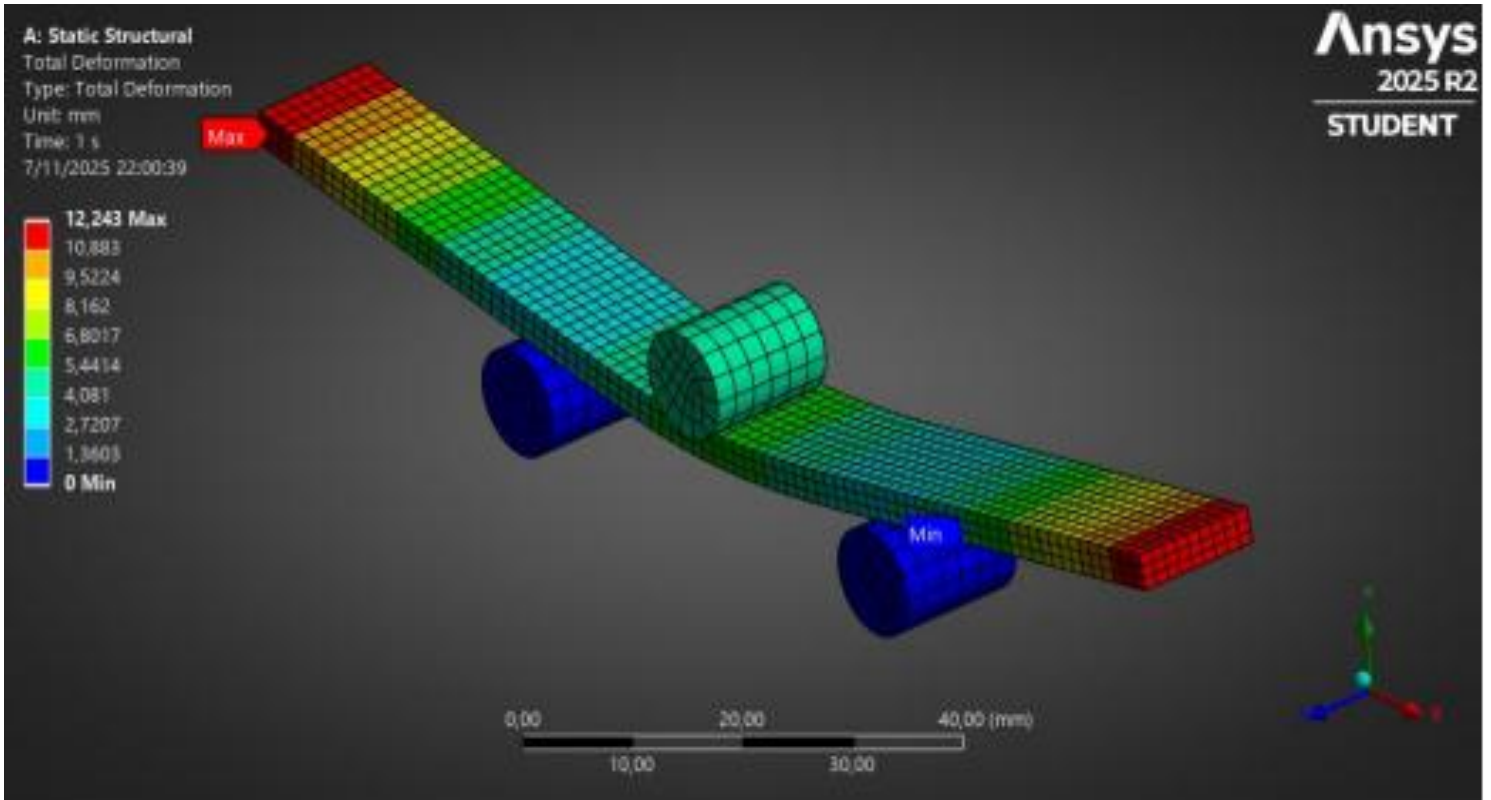
Anexo 19.

Esfuerzo máximo y deformación unitaria generado por tracción axial de tracción del PETG en ANSYS Workbench(2025).



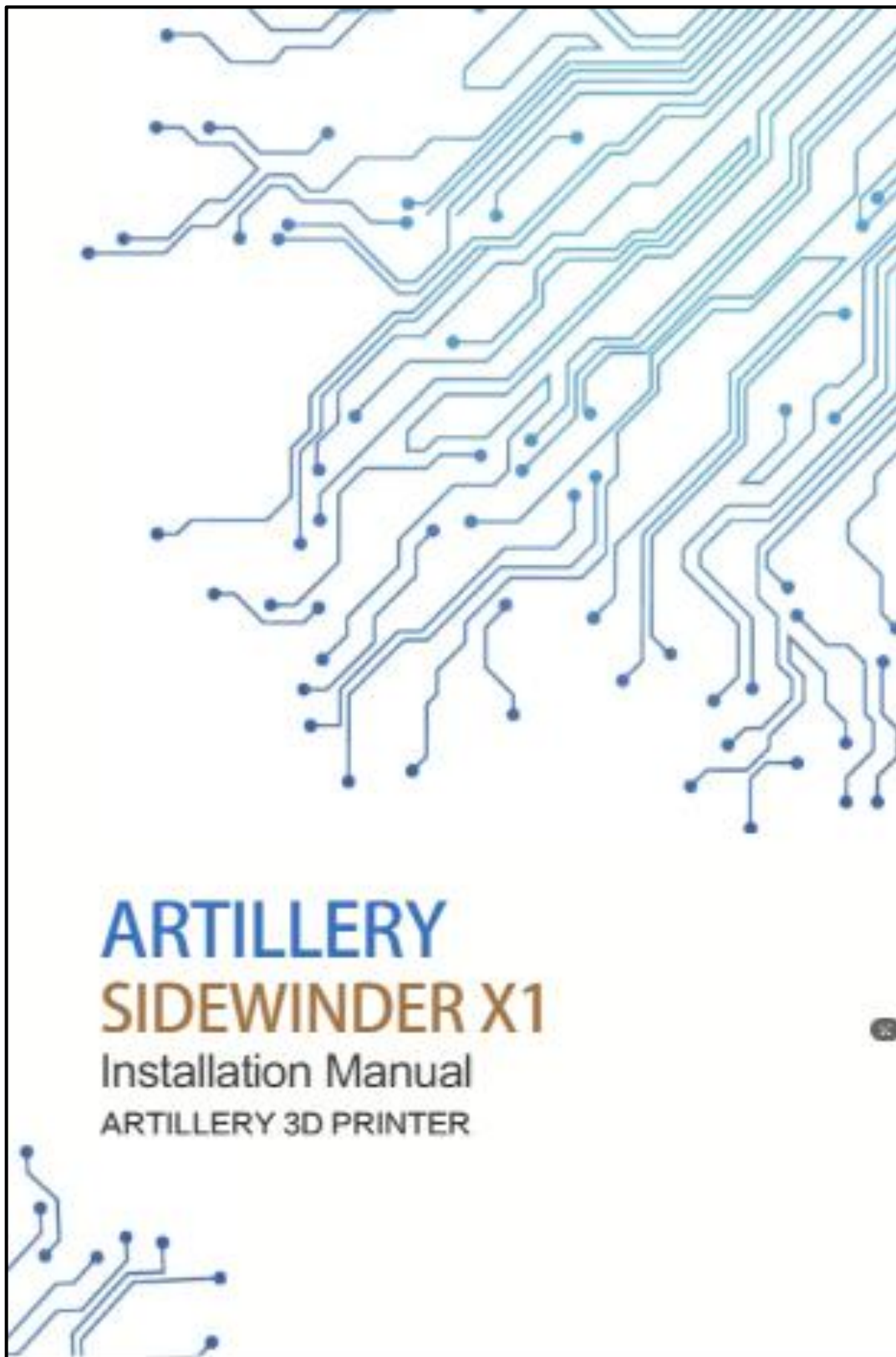
Anexo 20.

Resultados de la simulación de flexión del PETG en ANSYS Workbench (2025).



Anexo 21.

Ficha técnica de Artillery Sidewinder X1.



Anexo 22.

Ficha técnica de Prusa MK3.5.



Anexo 23.

Normativa AST-D638-14 normativa para determinar la propiedades de tracción de plásticos no reforzados y reforzados para tracción



Designation: D638 - 14

Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics¹

This standard is issued under the fixed designation D638; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.

I. Scope^a

1.1 This test method covers the determination of the tensile properties of unreinforced and reinforced plastics in the form of standard dumbbell-shaped test specimens when tested under defined conditions of pretreatment, temperature, humidity, and testing machine speed.

1.2 This test method is applicable for testing materials of any thickness up to 14 mm (0.55 in.). However, for testing specimens in the form of thin sheeting, including film less than 1.0 mm (0.04 in.) in thickness, ASTM standard D882 is the preferred test method. Materials with a thickness greater than 14 mm (0.55 in.) shall be reduced by machining.

1.3 This test method includes the option of determining Poisson's ratio at room temperature.

Note 1—This standard and ISO 527-1 address the same subject matter, but differ in technical content.

Note 2—This test method is not intended to cover precise physical procedures. It is recognized that the constant rate of crosshead movement type of test leaves much to be desired from a theoretical standpoint, that wide differences may exist between rate of crosshead movement and rate of strain between gage marks on the specimen, and that the testing speeds specified disguise important effects characteristic of materials in the plastic state. Further, it is realized that variations in the thicknesses of test specimens, which are permitted by these procedures, produce variations in the surface-volume ratios of such specimens, and that these variations may influence the test results. Hence, where directly comparable results are desired, all samples should be of equal thickness. Special additional tests should be used where more precise physical data are needed.

Note 3—This test method may be used for testing phenolic molded resin or laminated materials. However, where these materials are used as electrical insulation, such materials should be tested in accordance with Test Methods D229 and Test Method D651.

Note 4—For tensile properties of resin-matrix composites reinforced with oriented continuous or discontinuous high modulus >20 -GPa ($>3.0 \times 10^6$ -psi) fibers, tests shall be made in accordance with Test Method D3039/D3039M.

1.4 Test data obtained by this test method have been found to be useful in engineering design. However, it is important to

consider the precautions and limitations of this method found in Note 2 and Section 4 before considering these data for engineering design.

1.5 The values stated in SI units are to be regarded as standard. The values given in parentheses are for information only.

1.6 This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

D229 Test Methods for Rigid Sheet and Plate Materials Used for Electrical Insulation

D412 Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers—Tension

D618 Practice for Conditioning Plastics for Testing

D651 Test Method for Test for Tensile Strength of Molded Electrical Insulating Materials (Withdrawn 1989)³

D882 Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheet

D883 Terminology Relating to Plastics

D1822 Test Method for Tensile-Impact Energy to Break Plastics and Electrical Insulating Materials

D3039/D3039M Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials

D4000 Classification System for Specifying Plastic Materials

D4066 Classification System for Nylon Injection and Extrusion Materials (PA)

D5947 Test Methods for Physical Dimensions of Solid Plastics Specimens

E4 Practices for Force Verification of Testing Machines

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D20 on Plastics and is the direct responsibility of Subcommittee D20.10 on Mechanical Properties.

Current edition approved Dec. 15, 2014. Published March 2015. Originally approved in 1941. Last previous edition approved in 2010 as D638-10. DOI: 10.1520/D0638-14.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

³ The last approved version of this historical standard is referenced on www.astm.org.

^aA Summary of Changes section appears at the end of this standard

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19380-2959, United States

Copyright by ASTM Int'l (all rights reserved); Thu Apr 16 16:50:20 EDT 2015

Downloaded/printed by

Escuela Politécnica Nacional (Escuela Politécnica Nacional) pursuant to License Agreement. No further reproductions authorized.



Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics¹

This standard is issued under the fixed designation D638; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.

1. Scope*

1.1 This test method covers the determination of the tensile properties of unreinforced and reinforced plastics in the form of standard dumbbell-shaped test specimens when tested under defined conditions of pretreatment, temperature, humidity, and testing machine speed.

1.2 This test method is applicable for testing materials of any thickness up to 14 mm (0.55 in.). However, for testing specimens in the form of thin sheeting, including film less than 1.0 mm (0.04 in.) in thickness, ASTM standard D882 is the preferred test method. Materials with a thickness greater than 14 mm (0.55 in.) shall be reduced by machining.

1.3 This test method includes the option of determining Poisson's ratio at room temperature.

Note 1—This standard and ISO 527-1 address the same subject matter, but differ in technical content.

Note 2—This test method is not intended to cover precise physical procedures. It is recognized that the constant rate of crosshead movement type of test leaves much to be desired from a theoretical standpoint, that wide differences may exist between rate of crosshead movement and rate of strain between gage marks on the specimen, and that the testing speeds specified disguise important effects characteristic of materials in the plastic state. Further, it is realized that variations in the thicknesses of test specimens, which are permitted by these procedures, produce variations in the surface-volume ratios of such specimens, and that these variations may influence the test results. Hence, where directly comparable results are desired, all samples should be of equal thickness. Special additional tests should be used where more precise physical data are needed.

Note 3—This test method may be used for testing phenolic molded resin or laminated materials. However, where these materials are used as electrical insulation, such materials should be tested in accordance with Test Methods D229 and Test Method D651.

Note 4—For tensile properties of resin-matrix composites reinforced with oriented continuous or discontinuous high modulus >20 -GPa ($>3.0 \times 10^6$ -psi) fibers, tests shall be made in accordance with Test Method D3039/D3039M.

1.4 Test data obtained by this test method have been found to be useful in engineering design. However, it is important to

consider the precautions and limitations of this method found in Note 2 and Section 4 before considering these data for engineering design.

1.5 The values stated in SI units are to be regarded as standard. The values given in parentheses are for information only.

1.6 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

- D229 Test Methods for Rigid Sheet and Plate Materials Used for Electrical Insulation
- D412 Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers—Tension
- D618 Practice for Conditioning Plastics for Testing
- D651 Test Method for Test for Tensile Strength of Molded Electrical Insulating Materials (Withdrawn 1989)³
- D882 Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting
- D883 Terminology Relating to Plastics
- D1822 Test Method for Tensile-Impact Energy to Break Plastics and Electrical Insulating Materials
- D3039/D3039M Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials
- D4000 Classification System for Specifying Plastic Materials
- D4066 Classification System for Nylon Injection and Extrusion Materials (PA)
- D5947 Test Methods for Physical Dimensions of Solid Plastics Specimens
- E4 Practices for Force Verification of Testing Machines

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D20 on Plastics and is the direct responsibility of Subcommittee D20.10 on Mechanical Properties. Current edition approved Dec. 15, 2014. Published March 2015. Originally approved in 1941. Last previous edition approved in 2010 as D638 - 10. DOI: 10.1520/D0638-14.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

³ The last approved version of this historical standard is referenced on www.astm.org.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard

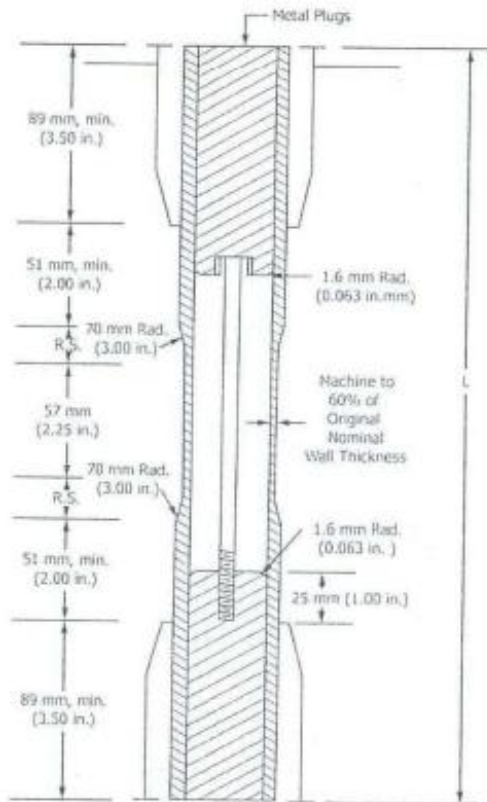
Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2909, United States

Copyright by ASTM Int'l (all rights reserved); Thu Apr 16 16:50:20 EDT 2015

Downloaded/printed by

Escuela Politecnica Nacional (Escuela Politecnica Nacional) pursuant to License Agreement. No further reproductions authorized.

115 = Corral Aluminio }
= 10002 Esteban }
} Jaws



DIMENSIONS OF TUBE SPECIMENS

Nominal Wall Thickness	Length of Radial Sections, 2R.S.	Total Calculated Minimum Length of Specimen	Standard Length, L of Specimen to Be Used for 89-mm (3.5-in.) Jaws ^a
mm (in.)			
0.79 (1/4)	13.0 (0.547)	350 (13.80)	381 (15)
1.2 (1/4)	17.0 (0.670)	354 (13.92)	381 (15)
1.6 (1/4)	19.6 (0.773)	356 (14.02)	381 (15)
2.4 (3/4)	24.0 (0.946)	361 (14.20)	381 (15)
3.2 (3/4)	27.7 (1.091)	364 (14.34)	381 (15)
4.8 (3/4)	33.9 (1.333)	370 (14.58)	391 (15)
6.4 (1/2)	39.0 (1.536)	376 (14.79)	400 (15.75)
7.9 (3/4)	43.5 (1.714)	380 (14.96)	400 (15.75)
9.5 (3/4)	47.6 (1.873)	384 (15.12)	400 (15.75)
11.1 (3/4)	51.3 (2.019)	388 (15.27)	400 (15.75)
12.7 (1/2)	54.7 (2.154)	391 (15.40)	419 (18.5)

^aFor jaws greater than 89 mm (3.5 in.), the standard length shall be increased by twice the length of the jaws minus 178 mm (7 in.). The standard length permits a slippage of approximately 6.4 to 12.7 mm (0.25 to 0.50 in.) in each jaw while maintaining the maximum length of the jaw grip.

FIG. 2 Diagram Showing Location of Tube Tension Test Specimens in Testing Machine

ness. This groove shall consist of a straight section 57.2 mm (2.25 in.) in length with a radius of 76 mm (3 in.) at each end joining it to the outside diameter. Steel or brass plugs having diameters such that they will fit snugly inside the tube and having a length equal to the full jaw length plus 25 mm (1 in.) shall be placed in the ends of the specimens to prevent crushing. They can be located conveniently in the tube by separating and supporting them on a threaded metal rod. Details of plugs and test assembly are shown in Fig. 2.

6.3 Rigid Rods—The test specimen for rigid rods shall be as shown in Fig. 3. The length, L, shall be as shown in the table in Fig. 3. A groove shall be machined around the specimen at the center of its length so that the diameter of the machined portion shall be 60 % of the original nominal diameter. This groove shall consist of a straight section 57.2 mm (2.25 in.) in length with a radius of 76 mm (3 in.) at each end joining it to the outside diameter.

6.4 All surfaces of the specimen shall be free of visible flaws, scratches, or imperfections. Marks left by coarse machining operations shall be carefully removed with a fine file or abrasive, and the filed surfaces shall then be smoothed with abrasive paper (No. 00 or finer). The finishing sanding strokes shall be made in a direction parallel to the long axis of the test specimen. All flash shall be removed from a molded specimen, taking great care not to disturb the molded surfaces. In machining a specimen, undercuts that would exceed the dimensional tolerances shown in Fig. 1 shall be scrupulously avoided. Care shall also be taken to avoid other common machining errors.

6.5 If it is necessary to place gage marks on the specimen, this shall be done with a wax crayon or India ink that will not affect the material being tested. Gage marks shall not be scratched, punched, or impressed on the specimen.

6.6 When testing materials that are suspected of anisotropy, duplicate sets of test specimens shall be prepared, having their long axes respectively parallel with, and normal to, the suspected direction of anisotropy.

7. Number of Test Specimens

7.1 Test at least five specimens for each sample in the case of isotropic materials.

7.2 For anisotropic materials, when applicable, test five specimens, normal to, and five parallel with, the principle axis of anisotropy.

7.3 Discard specimens that break at some flaw, or that break outside of the narrow cross-sectional test section (Fig. 1, dimension "L"), and make retests, unless such flaws constitute a variable to be studied.

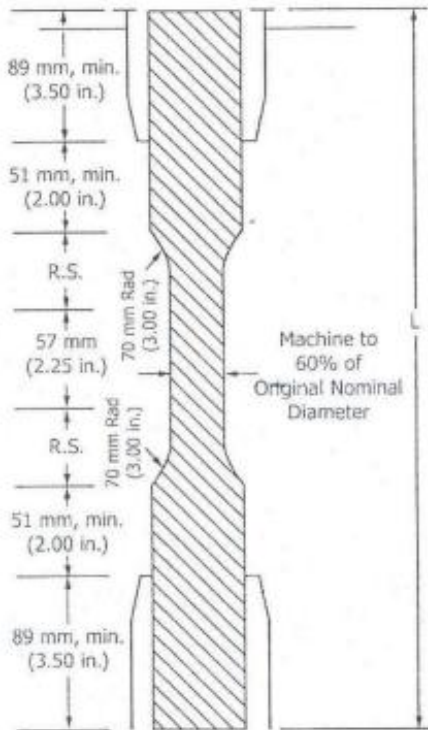
Note 10—Before testing, all transparent specimens should be inspected in a polariscope. Those which show atypical or concentrated strain patterns should be rejected, unless the effects of these residual strains constitute a variable to be studied.

8. Speed of Testing

8.1 Speed of testing shall be the relative rate of motion of the grips or test fixtures during the test. The rate of motion of the driven grip or fixture when the testing machine is running

machining shall be 60 % of the original nominal wall thick-

Continue



DIMENSIONS OF ROD SPECIMENS

Nominal Diameter	Length of Radial Sections, 2R.S.	Total Calculated Minimum Length of Specimen	Standard Length, L, of Specimen to Be Used for 89-mm (3.5-in.) Jaws ^a
mm (in.)			
3.2 (1/8)	19.6 (0.773)	356 (14.02)	381 (15)
4.7 (3/16)	24.0 (0.948)	361 (14.20)	381 (15)
6.4 (1/4)	27.7 (1.091)	364 (14.34)	381 (15)
9.5 (3/8)	33.9 (1.333)	370 (14.58)	381 (15)
12.7 (1/2)	38.0 (1.536)	376 (14.79)	400 (15.75)
15.9 (5/8)	43.5 (1.714)	380 (14.96)	400 (15.75)
19.0 (3/4)	47.6 (1.873)	384 (15.12)	400 (15.75)
22.2 (7/8)	51.5 (2.019)	388 (15.27)	400 (15.75)
25.4 (1)	54.7 (2.154)	391 (15.40)	419 (16.5)
31.8 (1 1/4)	60.9 (2.398)	398 (15.65)	419 (16.5)
38.1 (1 1/2)	66.4 (2.615)	403 (15.87)	419 (16.5)
42.5 (1 3/4)	71.4 (2.812)	408 (16.06)	419 (16.5)
50.8 (2)	76.0 (2.993)	412 (16.24)	432 (17)

^aFor jaws greater than 89 mm (3.5 in.), the standard length shall be increased by twice the length of the jaws minus 178 mm (7 in.). The standard length permits a slippage of approximately 6.4 to 12.7 mm (0.25 to 0.50 in.) in each jaw while maintaining the maximum length of the jaw grip.

FIG. 3 Diagram Showing Location of Rod Tension Test Specimen in Testing Machine

idle may be used, if it can be shown that the resulting speed of testing is within the limits of variation allowed.

8.2 Choose the speed of testing from Table 1. Determine this chosen speed of testing by the specification for the material being tested, or by agreement between those concerned. When

TABLE 1 Designations for Speed of Testing^a

Classification ^b	Specimen Type	Speed of Testing, mm/min (in./min)	Nominal Strain ^c Rate at Start of Test, mm/mm·min (in./in.·min)
Rigid and Semirigid	I, II, III rods and tubes	5 (0.2) ± 25%	0.1
		50 (2) ± 10%	1
	IV	500 (20) ± 10%	10
		5 (0.2) ± 25%	0.15
		50 (2) ± 10%	1.5
V	500 (20) ± 10%	15	
	1 (0.05) ± 25%	0.1	
	10 (0.5) ± 25%	1	
Nonrigid	III	100 (5) ± 25%	10
		50 (2) ± 10%	1
	IV	500 (20) ± 10%	10
		50 (2) ± 10%	1.5
		500 (20) ± 10%	15

^aSelect the lowest speed that produces rupture in 0.5 to 5 min for the specimen geometry being used (see 8.2).

^bSee Terminology D883 for definitions.

^cThe initial rate of straining cannot be calculated exactly for dumbbell-shaped specimens because of extension, both in the reduced section outside the gage length and in the fillets. This initial strain rate can be measured from the initial slope of the tensile strain-versus-time diagram.

the speed is not specified, use the lowest speed shown in Table 1 for the specimen geometry being used, which gives rupture within 0.5 to 5-min testing time.

8.3 Make modulus determinations at the speed selected for the other tensile properties when the recorder response and resolution are adequate.

9. Conditioning

9.1 *Conditioning*—Condition the test specimens in accordance with Procedure A of Practice D618, unless otherwise specified by contract or the relevant ASTM material specification. Conditioning time is specified as a minimum. Temperature and humidity tolerances shall be in accordance with Section 7 of Practice D618 unless specified differently by contract or material specification.

9.2 *Test Conditions*—Conduct the tests at the same temperature and humidity used for conditioning with tolerances in accordance with Section 7 of Practice D618, unless otherwise specified by contract or the relevant ASTM material specification.

10. Procedure

10.1 Measure the width and thickness of each specimen to the nearest 0.025 mm (0.001 in.) using the applicable test methods in D5947.

10.1.1 Measure the width and thickness of flat specimens at the center of each specimen and within 5 mm of each end of the gage length.

10.1.2 For injection molded specimens, the actual measurement of only one specimen from each sample will suffice when it has previously been demonstrated that the specimen-to-specimen variation in width and thickness is less than 1%.

10.1.3 For thin sheeting, including film less than 1.0 mm (0.04 in.), take the width of specimens produced by a Type IV die as the distance between the cutting edges of the die in the

where:

- s = estimated standard deviation,
- X = value of single observation,
- n = number of observations, and
- \bar{X} = arithmetic mean of the set of observations.

- 11.8 See Annex A1 for information on toe compensation.
- 11.9 See Annex A3 for the determination of Poisson's Ratio.

12. Report

12.1 Report the following information:

- 12.1.1 Complete identification of the material tested, including type, source, manufacturer's code numbers, form, principal dimensions, previous history, etc.,
- 12.1.2 Method of preparing test specimens,
- 12.1.3 Type of test specimen and dimensions,
- 12.1.4 Conditioning procedure used,
- 12.1.5 Atmospheric conditions in test room,
- 12.1.6 Number of specimens tested; for anisotropic materials, the number of specimens tested and the direction in which they were tested,
- 12.1.7 Speed of testing,
- 12.1.8 Classification of extensometers used. A description of measuring technique and calculations employed instead of a minimum Class-C extensometer system,
- 12.1.9 Tensile strength at yield or break, average value, and standard deviation,
- 12.1.10 Tensile stress at yield or break, if applicable, average value, and standard deviation,
- 12.1.11 Percent elongation at yield, or break, or nominal strain at break, or all three, as applicable, average value, and standard deviation,
- 12.1.12 Modulus of elasticity or secant modulus, average value, and standard deviation,
- 12.1.13 If measured, Poisson's ratio, average value, standard deviation, and statement of whether there was proportionality within the strain range,
- 12.1.14 Date of test, and
- 12.1.15 Revision date of Test Method D638.

13. Precision and Bias⁵

13.1 *Precision*—Tables 2-4 are based on a round-robin test conducted in 1984, involving five materials tested by eight laboratories using the Type I specimen, all of nominal 0.125-in. thickness. Each test result was based on five individual determinations. Each laboratory obtained two test results for each material.

⁵ Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR:D20-1125 for the 1984 round robin and RR:D20-1170 for the 1988 round robin.

TABLE 2 Modulus, 10⁶ psi, for Eight Laboratories, Five Materials

	Mean	S _y	S _R	I _y	I _R
Polypropylene	0.210	0.0089	0.071	0.025	0.201
Cellulose acetate butyrate	0.246	0.0179	0.035	0.051	0.144
Acrylic	0.481	0.0179	0.063	0.051	0.144
Glass-reinforced nylon	1.17	0.0537	0.217	0.152	0.514
Glass-reinforced polyester	1.39	0.0694	0.266	0.253	0.753

TABLE 3 Tensile Stress at Break, 10³ psi, for Eight Laboratories, Five Materials⁴

	Mean	S _y	S _R	I _y	I _R
Polypropylene	2.97	1.54	1.65	4.37	4.66
Cellulose acetate butyrate	4.82	0.059	0.180	0.164	0.509
Acrylic	9.09	0.452	0.751	1.27	2.13
Glass-reinforced polyester	20.8	0.233	0.437	0.659	1.24
Glass-reinforced nylon	23.8	0.277	0.698	0.784	1.98

⁴Tensile strength and elongation at break values obtained for unreinforced propylene plastics generally are highly variable due to inconsistencies in necking or "drawing" of the center section of the test bar. Since tensile strength and elongation at yield are more reproducible and relate in most cases to the practical usefulness of a molded part, they are generally recommended for specification purposes.

TABLE 4 Elongation at Break, %, for Eight Laboratories, Five Materials⁴

	Mean	S _y	S _R	I _y	I _R
Glass-reinforced polyester	3.68	0.20	2.33	0.570	6.59
Glass-reinforced nylon	3.87	0.10	2.13	0.283	6.03
Acrylic	13.2	2.05	3.65	5.80	10.3
Cellulose acetate butyrate	14.1	1.87	6.62	5.29	18.7
Polypropylene	293.0	50.9	119.0	144.0	337.0

⁴Tensile strength and elongation at break values obtained for unreinforced propylene plastics generally are highly variable due to inconsistencies in necking or "drawing" of the center section of the test bar. Since tensile strength and elongation at yield are more reproducible and relate in most cases to the practical usefulness of a molded part, they are generally recommended for specification purposes.

13.1.1 Tables 5-8 are based on a round-robin test conducted by the polyolefin subcommittee in 1988, involving eight polyethylene materials tested in ten laboratories. For each material, all samples were molded at one source, but the individual specimens were prepared at the laboratories that tested them. Each test result was the average of five individual determinations. Each laboratory obtained three test results for each material. Data from some laboratories could not be used for various reasons, and this is noted in each table.

13.1.2 Tables 9 and 10 are based on a round-robin test conducted by the polyolefin subcommittee in 1988, involving three materials tested in eight laboratories. For each material, all samples were molded at one source, but the individual specimens were prepared at the laboratories that tested them. Each test result was the average of five individual determinations. Each laboratory obtained three test results for each material.

TABLE 5 Tensile Yield Stress, for Ten Laboratories, Eight Materials

Material	Test Speed, in./min	Values Expressed in psi Units				
		Average	S _y	S _R	r	R
LDPE	20	1544	52.4	64.0	146.6	179.3
LDPE	20	1894	53.1	61.2	148.7	171.3
LLDPE	20	1879	74.2	99.9	207.8	279.7
LLDPE	20	1791	49.2	75.8	137.9	212.3
LLDPE	20	2900	55.5	87.9	155.4	246.1
LLDPE	20	1730	63.9	96.0	178.9	268.7
HDPE	2	4101	198.1	371.9	549.1	1041.3
HDPE	2	3523	175.9	478.0	492.4	1338.5

TABLE 6 Tensile Yield Elongation, for Eight Laboratories, Eight Materials

Material	Test Speed, in./min	Values Expressed in Percent Units				
		Average	S_p	S_R	t	R
LDPE	20	17.0	1.26	3.16	3.52	8.84
LDPE	20	14.6	1.02	2.38	2.86	6.67
LLDPE	20	15.7	1.37	2.85	3.85	7.97
LLDPE	20	16.6	1.59	3.30	4.46	9.24
LLDPE	20	11.7	1.27	2.88	3.96	8.08
LLDPE	20	15.2	1.27	2.59	3.55	7.25
HDPE	2	9.27	1.40	2.84	3.91	7.94
HDPE	2	9.63	1.23	2.75	3.45	7.71

TABLE 7 Tensile Break Stress, for Nine Laboratories, Six Materials

Material	Test Speed, in./min	Values Expressed in psi Units				
		Average	S_p	S_R	t	R
LDPE	20	1582	52.3	74.9	146.4	209.7
LDPE	20	1750	68.6	102.9	186.4	288.1
LLDPE	20	4379	127.1	219.0	355.8	613.3
LLDPE	20	2940	78.6	143.5	220.2	401.8
LLDPE	20	1679	34.3	47.0	95.96	131.6
LLDPE	20	2660	119.1	166.3	333.6	465.6

TABLE 8 Tensile Break Elongation, for Nine Laboratories, Six Materials

Material	Test Speed, in./min	Values Expressed in Percent Units				
		Average	S_p	S_R	t	R
LDPE	20	567	31.5	59.5	88.2	166.6
LDPE	20	569	61.5	89.2	172.3	249.7
LLDPE	20	890	25.7	113.8	71.9	318.7
LLDPE	20	64.4	6.68	11.7	18.7	32.6
LLDPE	20	803	25.7	104.4	71.9	292.5
LLDPE	20	782	41.6	96.7	116.6	270.6

TABLE 9 Tensile Stress at Yield, 10³ psi, for Eight Laboratories, Three Materials

	Mean	S_p	S_R	t	I_R
Polypropylene	3.63	0.022	0.161	0.062	0.456
Cellulose acetate butyrate	5.01	0.058	0.227	0.164	0.942
Acrylic	10.4	0.067	0.317	0.190	0.897

13.1.3 Table 11 is based on a repeatability study involving a single laboratory. The two materials used were unfilled polypropylene types. Measurements were performed by a single technician on a single day. Each test result is an individual determination. Testing was run using two Type B-1 extensometers for transverse and axial measurements at a test speed of 5 mm/min.

13.1.4 In Tables 2-11, for the materials indicated, and for test results that derived from testing five specimens:

TABLE 10 Elongation at Yield, %, for Eight Laboratories, Three Materials

	Mean	S_p	S_R	t	I_R
Cellulose acetate butyrate	3.65	0.27	0.62	0.76	1.75
Acrylic	4.89	0.21	0.55	0.59	1.56
Polypropylene	8.79	0.45	5.66	1.27	16.5

TABLE 11 Poisson's Ratio Repeatability Data for One Laboratory and Two Polypropylene Materials

Materials	Values Expressed as a Dimensionless Ratio		
	Average	S_p	t
PP #1 Chord	0.412	0.009	0.026
PP #1 Least Squares	0.413	0.011	0.032
PP #2 Chord	0.391	0.009	0.026
PP #2 Least Squares	0.392	0.010	0.026

13.1.4.1 S_p is the within-laboratory standard deviation of the average; $t = 2.83 S_p$. (See 13.1.4.3 for application of t .)

13.1.4.2 S_R is the between-laboratory standard deviation of the average; $t_R = 2.83 S_R$. (See 13.1.4.4 for application of t_R .)

13.1.4.3 *Repeatability*—In comparing two test results for the same material, obtained by the same operator using the same equipment on the same day, those test results should be judged not equivalent if they differ by more than the t value for that material and condition.

13.1.4.4 *Reproducibility*—In comparing two test results for the same material, obtained by different operators using different equipment on different days, those test results should be judged not equivalent if they differ by more than the t_R value for that material and condition. (This applies between different laboratories or between different equipment within the same laboratory.)

13.1.4.5 Any judgment in accordance with 13.1.4.3 and 13.1.4.4 will have an approximate 95 % (0.95) probability of being correct.

13.1.4.6 Other formulations may give somewhat different results.

13.1.4.7 For further information on the methodology used in this section, see Practice E691.

13.1.4.8 The precision of this test method is very dependent upon the uniformity of specimen preparation, standard practices for which are covered in other documents.

13.2 *Bias*—There are no recognized standards on which to base an estimate of bias for this test method.

14. Keywords

14.1 modulus of elasticity; percent elongation; plastics; Poisson's Ratio; tensile properties; tensile strength

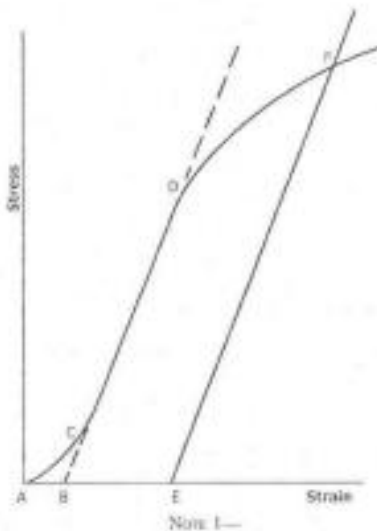
A1. TOE COMPENSATION

A1.1 In a typical stress-strain curve (Fig. A1.1) there is a toe region, AC, that does not represent a property of the material. It is an artifact caused by a takeup of slack and alignment or seating of the specimen. In order to obtain correct values of such parameters as modulus, strain, and offset yield point, this artifact must be compensated for to give the corrected zero point on the strain or extension axis.

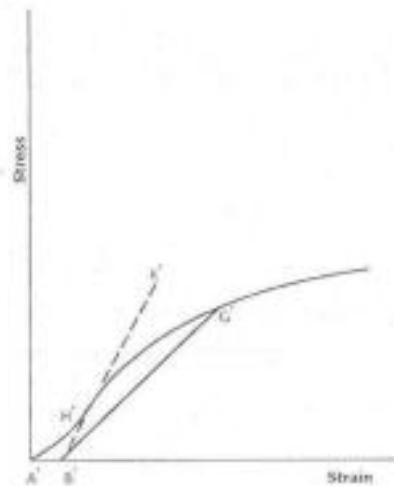
A1.2 In the case of a material exhibiting a region of Hookean (linear) behavior (Fig. A1.1), a continuation of the linear (CD) region of the curve is constructed through the zero-stress axis. This intersection (B) is the corrected zero-strain point from which all extensions or strains must be measured, including the yield offset (BE), if applicable. The

elastic modulus can be determined by dividing the stress at any point along the line CD (or its extension) by the strain at the same point (measured from Point B, defined as zero-strain).

A1.3 In the case of a material that does not exhibit any linear region (Fig. A1.2), the same kind of toe correction of the zero-strain point can be made by constructing a tangent to the maximum slope at the inflection point (H). This is extended to intersect the strain axis at Point B', the corrected zero-strain point. Using Point B' as zero strain, the stress at any point (G) on the curve can be divided by the strain at that point to obtain a secant modulus (slope of Line B'G'). For those materials with no linear region, any attempt to use the tangent through the inflection point as a basis for determination of an offset yield point may result in unacceptable error.



NOTE 1—Some chart recorders plot the mirror image of this graph.
 FIG. A1.1 Material with Hookean Region



NOTE 1—Some chart recorders plot the mirror image of this graph.
 FIG. A1.2 Material with No Hookean Region

A2. DEFINITIONS OF TERMS AND SYMBOLS RELATING TO TENSION TESTING OF PLASTICS

A2.1 *elastic limit*—the greatest stress which a material is capable of sustaining without any permanent strain remaining upon complete release of the stress. It is expressed in force per unit area, usually megapascals (pounds-force per square inch).

NOTE A2.1—Measured values of proportional limit and elastic limit vary greatly with the sensitivity and accuracy of the testing equipment, eccentricity of loading, the scale to which the stress-strain diagram is plotted, and other factors. Consequently, these values are usually replaced by yield strength.

A2.2 *elongation*—the increase in length produced in the gage length of the test specimen by a tensile load. It is expressed in units of length, usually millimetres (inches). (Also known as *extension*.)

NOTE A2.2—Elongation and strain values are valid only in cases where uniformity of specimen behavior within the gage length is present. In the case of materials exhibiting necking phenomena, such values are only of qualitative utility after attainment of yield point. This is due to inability to ensure that necking will encompass the entire length between the gage marks prior to specimen failure.

A2.3 *gage length*—the original length of that portion of the specimen over which strain or change in length is determined.

A2.4 *modulus of elasticity*—the ratio of stress (nominal) to corresponding strain below the proportional limit of a material. It is expressed in force per unit area, usually megapascals (pounds-force per square inch). (Also known as *elastic modulus* or *Young's modulus*.)

NOTE A2.3—The stress-strain relations of many plastics do not conform to Hooke's law throughout the elastic range but deviate therefrom even at stresses well below the elastic limit. For such materials the slope of the tangent to the stress-strain curve at a low stress is usually taken as the modulus of elasticity. Since the existence of a true proportional limit in plastics is debatable, the propriety of applying the term "modulus of elasticity" to describe the stiffness or rigidity of a plastic has been seriously questioned. The exact stress-strain characteristics of plastic materials are very dependent on such factors as rate of stressing, temperature, previous specimen history, etc. However, such a value is useful if its arbitrary nature and dependence on time, temperature, and other factors are realized.

A2.5 *necking*—the localized reduction in cross section which may occur in a material under tensile stress.

A2.6 *offset yield strength*—the stress at which the strain exceeds by a specified amount (the offset) an extension of the initial proportional portion of the stress-strain curve. It is expressed in force per unit area, usually megapascals (pounds-force per square inch).

NOTE A2.4—This measurement is useful for materials whose stress-strain curve in the yield range is of gradual curvature. The offset yield strength can be derived from a stress-strain curve as follows (Fig. A2.1):
On the strain axis lay off *OM* equal to the specified offset.

Draw *OA* tangent to the initial straight-line portion of the stress-strain curve.

Through *M* draw a line *MN* parallel to *OA* and locate the intersection of *MN* with the stress-strain curve.

The stress at the point of intersection *r* is the "offset yield strength." The specified value of the offset must be stated as a percent of the original gage length in conjunction with the strength value. Example: 0.1 % offset yield strength = ... MPa (psi), or yield strength at 0.1 % offset ... MPa (psi).

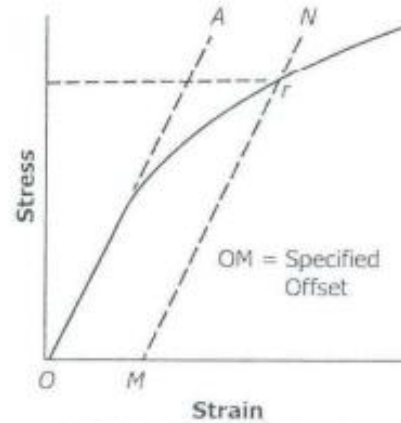


FIG. A2.1 Offset Yield Strength

A2.7 *percent elongation*—the elongation of a test specimen expressed as a percent of the gage length.

A2.8 *percent elongation at break and yield*:

A2.8.1 *percent elongation at break*—the percent elongation at the moment of rupture of the test specimen.

A2.8.2 *percent elongation at yield*—the percent elongation at the moment the yield point (A2.22) is attained in the test specimen.

A2.9 *percent reduction of area (nominal)*—the difference between the original cross-sectional area measured at the point of rupture after breaking and after all retraction has ceased, expressed as a percent of the original area.

A2.10 *percent reduction of area (true)*—the difference between the original cross-sectional area of the test specimen and the minimum cross-sectional area within the gage boundaries prevailing at the moment of rupture, expressed as a percentage of the original area.

A2.11 *Poisson's Ratio*—The absolute value of the ratio of transverse strain to the corresponding axial strain resulting from uniformly distributed axial stress below the proportional limit of the material.

A2.12 *proportional limit*—the greatest stress which a material is capable of sustaining without any deviation from proportionality of stress to strain (Hooke's law). It is expressed in force per unit area, usually megapascals (pounds-force per square inch).

A2.13 *rate of loading*—the change in tensile load carried by the specimen per unit time. It is expressed in force per unit time, usually newtons (pounds-force) per minute. The initial rate of loading can be calculated from the initial slope of the load versus time diagram.

Anexo 24.

Normativa ASTM D790-17 normativa para determinar las propiedades de flexión y plásticos reforzados y no reforzados y materiales aislantes eléctricos



Designation: D790 – 17

Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials¹

This standard is issued under the fixed designation D790; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.

1. Scope*

1.1 These test methods are used to determine the flexural properties of unreinforced and reinforced plastics, including high modulus composites and electrical insulating materials utilizing a three-point loading system to apply a load to a simply supported beam (specimen). The method is generally applicable to both rigid and semi-rigid materials, but flexural strength cannot be determined for those materials that do not break or yield in the outer surface of the test specimen within the 5.0 % strain limit.

1.2 Test specimens of rectangular cross section are injection molded or, cut from molded or extruded sheets or plates, or cut from molded or extruded shapes. Specimens must be solid and uniformly rectangular. The specimen rests on two supports and is loaded by means of a loading nose midway between the supports.

1.3 Measure deflection in one of two ways; using crosshead position or a deflectometer. Please note that studies have shown that deflection data obtained with a deflectometer will differ from data obtained using crosshead position. The method of deflection measurement shall be reported.

NOTE 1—Requirements for quality control in production environments are usually met by measuring deflection using crosshead position. However, more accurate measurement may be obtained by using an deflection indicator such as a deflectometer.

NOTE 2—Materials that do not rupture by the maximum strain allowed under this test method may be more suited to a 4-point bend test. The basic difference between the two test methods is in the location of the maximum bending moment and maximum axial fiber stresses. The maximum axial fiber stresses occur on a line under the loading nose in 3-point bending and over the area between the loading noses in 4-point bending. A four-point loading system method can be found in Test Method D6272.

1.4 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values provided in parentheses are for information only.

1.5 *The text of this standard references notes and footnotes that provide explanatory material. These notes and footnotes (excluding those in tables and figures) shall not be considered as requirements of the standard.*

1.6 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

NOTE 3—This standard and ISO 178 address the same subject matter, but differ in technical content.

1.7 *This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

D618 Practice for Conditioning Plastics for Testing

D638 Test Method for Tensile Properties of Plastics

D883 Terminology Relating to Plastics

D4000 Classification System for Specifying Plastic Materials

D4101 Specification for Polypropylene Injection and Extrusion Materials

D5947 Test Methods for Physical Dimensions of Solid Plastics Specimens

D6272 Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending

E4 Practices for Force Verification of Testing Machines

E83 Practice for Verification and Classification of Extensometer Systems

¹ These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee D20 on Plastics and are the direct responsibility of Subcommittee D20.10 on Mechanical Properties.

Current edition approved July 1, 2017. Published July 2017. Originally approved in 1970. Last previous edition approved in 2015 as D790 – 15². DOI: 10.1520/D0790-17.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

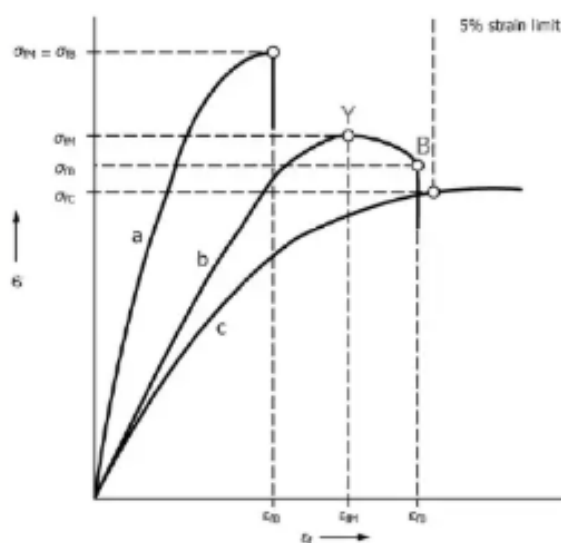
*A Summary of Changes section appears at the end of this standard

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19380-2959, United States

Copyright by ASTM Int'l (all rights reserved); Mon May 18 16:26:44 EDT 2020

Downloaded/printed by

Akron University Of (Akron University Of) pursuant to License Agreement. No further reproductions authorized.



Note 1—Curve a: Specimen that breaks before yielding.
 Curve b: Specimen that yields and then breaks before the 5 % strain limit.
 Curve c: Specimen that neither yields nor breaks before the 5 % strain limit.

FIG. 1 Typical Curves of Flexural Stress (σ) Versus Flexural Strain (ϵ)

from the load-deflection curve at the deflection corresponding to the desired strain (for highly orthotropic laminates, see Note 6).

5.1.7 *Flexural Strain, ϵ_f* —Nominal fractional change in the length of an element of the outer surface of the test specimen at midspan, where the maximum strain occurs. Flexural strain is calculated for any deflection using Eq 5 in 12.4.

5.1.8 Modulus of Elasticity:

5.1.8.1 *Tangent Modulus of Elasticity*—The tangent modulus of elasticity, often called the “modulus of elasticity,” is the ratio, within the elastic limit, of stress to corresponding strain. It is calculated by drawing a tangent to the steepest initial straight-line portion of the load-deflection curve and using Eq 6 in 12.5.1 (for highly anisotropic composites, see Note 9).

Note 9—Shear deflections can seriously reduce the apparent modulus of highly anisotropic composites when they are tested at low span-to-depth ratios.⁴ For this reason, a span-to-depth ratio of 60 to 1 is recommended for flexural modulus determinations on these composites. Flexural strength should be determined on a separate set of replicate specimens at a lower span-to-depth ratio that induces tensile failure in the outer fibers of the beam along its lower face. Since the flexural modulus of highly anisotropic laminates is a critical function of ply-stacking sequence, it will not necessarily correlate with tensile modulus, which is not stacking-sequence dependent.

5.1.8.2 *Secant Modulus*—The secant modulus is the ratio of stress to corresponding strain at any selected point on the stress-strain curve, that is, the slope of the straight line that joins the origin and a selected point on the actual stress-strain curve. It shall be expressed in megapascals (pounds per square inch). The selected point is chosen at a pre-specified stress or strain in accordance with the appropriate material specification

or by customer contract. It is calculated in accordance with Eq 6 by letting m equal the slope of the secant to the load-deflection curve. The chosen stress or strain point used for the determination of the secant shall be reported.

5.1.8.3 *Chord Modulus (E_c)*—The chord modulus is calculated from two discrete points on the load deflection curve. The selected points are to be chosen at two pre-specified stress or strain points in accordance with the appropriate material specification or by customer contract. The chosen stress or strain points used for the determination of the chord modulus shall be reported. Calculate the chord modulus, E_c using Eq 7 in 12.5.2.

5.2 Experience has shown that flexural properties vary with specimen depth, temperature, atmospheric conditions, and strain rate as specified in Procedures A and B.

5.3 Before proceeding with these test methods, refer to the ASTM specification of the material being tested. Any test specimen preparation, conditioning, dimensions, or testing parameters, or combination thereof, covered in the ASTM material specification shall take precedence over those mentioned in these test methods. Table 1 in Classification System D4000 lists the ASTM material specifications that currently exist for plastics.

6. Apparatus

6.1 *Testing Machine*—A testing machine capable of being operated at constant rates of crosshead motion over the range indicated and comprised of the following:

6.1.1 *Load Frame*—The stiffness of the testing machine shall be such that the total elastic deformation of the system does not exceed 1 % of the total deflection of the test specimen during testing, or appropriate corrections shall be made.

6.1.1.1 *Fixed Member*—A fixed or essentially stationary member holding the specimen supports;

6.1.1.2 *Movable Member*—A movable member carrying the loading nose.

6.1.2 *Loading Noses and Supports*—The loading nose and supports shall have cylindrical surfaces.

6.1.2.1 The radii of the loading nose and supports shall be 5.0 ± 0.1 mm (0.197 ± 0.004 in.) unless otherwise specified in an ASTM material specification or as agreed upon between interested parties.

6.1.2.2 *Other Radii for Loading Noses and Supports*—Alternative loading noses and supports are permitted to be used in order to avoid excessive indentation or failure due to stress concentration directly under the loading nose or if required by an ASTM material specification. If alternative loading nose and support radii are used, the dimensions of the loading nose and supports shall be clearly identified in the test report and reference shall be made to any applicable specifications.

(1) Alternative supports shall have a minimum radius of 3.2 mm ($1/8$ in.) When testing specimens 3.2 mm or greater in depth, the radius of the loading nose and supports are permitted to be up to 1.6 times the specimen depth.

(2) The arc of the loading nose in contact with the specimen shall be sufficiently large to prevent contact of the specimen with the sides of the nose. Alternative loading noses shall be sufficiently large to prevent contact of the specimen

are recommended). When laminated materials exhibit low compressive strength perpendicular to the laminations, they shall be loaded with a large radius loading nose (up to four times the specimen depth to prevent premature damage to the outer fibers).

7.5 Molding Materials (Thermoplastics and Thermosets)—The preferred specimen dimensions for molding materials is 12.7 mm (0.5 in.) wide, 3.2 mm (0.125 in.) thick, and 127 mm (5.0 in.) long. They are tested flatwise on the support span, resulting in a support span-to-depth ratio of 16:1 (tolerance ± 1). Thicker specimens are to be avoided if they exhibit significant sink marks or bubbles when molded.

7.6 High-Strength Reinforced Composites, Including Highly Orthotropic Laminates—The span-to-depth ratio shall be chosen such that failure occurs in the outer fibers of the specimens and is due only to the bending moment. As a general rule, support span-to-depth ratios of 16:1 are satisfactory when the ratio of the tensile strength to shear strength is less than 8 to 1, but the support span-to-depth ratio must be increased for composite laminates having relatively low shear strength in the plane of the laminate and relatively high tensile strength parallel to the support span (32:1 or 40:1 are recommended). For some highly anisotropic composites, shear deformation can significantly influence modulus measurements, even at span-to-depth ratios as high as 40:1. Hence, for these materials, an increase in the span-to-depth ratio to 60:1 is recommended to eliminate shear effects when modulus data are required, it should also be noted that the flexural modulus of highly anisotropic laminates is a strong function of ply-stacking sequence and will not necessarily correlate with tensile modulus, which is not stacking-sequence dependent.

8. Number of Test Specimens

8.1 Test at least five specimens for each sample in the case of isotropic materials or molded specimens.

8.2 For each sample of anisotropic material in sheet form, test at least five specimens cut in the desired direction. For the purposes of this test, “lengthwise” designates the principal axis of anisotropy and shall be interpreted to mean the direction of the sheet known to be stronger in flexure. “Crosswise” indicates the sheet direction known to be the weaker in flexure and shall be at 90° to the lengthwise direction. The direction of test, whether it be lengthwise, crosswise, or some angle relative to these shall be noted in the report.

9. Conditioning

9.1 **Conditioning**—Condition the test specimens in accordance with Procedure A of Practice D618 unless otherwise specified by contract or the relevant ASTM material specification. Conditioning time is specified as a minimum. Temperature and humidity tolerances shall be in accordance with Section 7 of Practice D618 unless specified differently by contract or material specification.

9.2 **Test Conditions**—Conduct the tests at the same temperature and humidity used for conditioning with tolerances in accordance with Section 7 of Practice D618 unless otherwise specified by contract or the relevant ASTM material specification.

10. Procedure

10.1 Procedure A:

10.1.1 Use an untested specimen for each measurement. Measure the width and depth of the specimen to the nearest 0.03 mm (0.001 in.) at the center of the support span. For specimens less than 2.54 mm (0.100 in.) in depth, measure the depth to the nearest 0.003 mm (0.0005 in.). These measurements shall be made in accordance with Test Methods D5947.

10.1.2 Determine the support span to be used as described in Section 7 and set the support span to within 1% of the determined value.

10.1.3 For flexural fixtures that have continuously adjustable spans, measure the span accurately to the nearest 0.1 mm (0.004 in.) for spans less than 63 mm (2.5 in.) and to the nearest 0.3 mm (0.012 in.) for spans greater than or equal to 63 mm (2.5 in.). Use the actual measured span for all calculations. For flexural fixtures that have fixed machined span positions, verify the span distance the same as for adjustable spans at each machined position. This distance becomes the span for that position and is used for calculations applicable to all subsequent tests conducted at that position. See Annex A2 for information on the determination of and setting of the span.

10.1.4 Calculate the rate of crosshead motion as follows and set the machine for the rate of crosshead motion as calculated by Eq 1:

$$R = ZL^2/6d \quad (1)$$

where:

R = rate of crosshead motion, mm (in.)/min,
 L = support span, mm (in.),
 d = depth of beam, mm (in.), and
 Z = rate of straining of the outer fiber, mm/mm/min (in./in./min). Z shall be equal to 0.01.

In no case shall the actual crosshead rate differ from that calculated using Eq 1, by more than $\pm 10\%$.

10.1.5 Align the loading nose and supports so that the axes of the cylindrical surfaces are parallel and the loading nose is midway between the supports. Center the specimen on the supports, with the long axis of the specimen perpendicular to the loading nose and supports. The loading nose should be close to, but not in contact with the specimen (see Note 16).

Note 16—The parallelism of the apparatus may be checked by means of a plate with parallel grooves into which the loading nose and supports will fit when properly aligned (see A2.3).

10.1.6 Apply the load to the specimen at the specified crosshead rate, and record simultaneous load-deflection data.

10.1.7 Measure deflection either by measurement of the motion of the loading nose relative to the supports (crosshead position) (Type I) or by a deflection indicator (deflectometer) under the specimen in contact with it at the center of the support span, the gauge being mounted stationary relative to the specimen supports (Type II). Load-deflection curves are used to determine the flexural strength, chord or secant modulus or the tangent modulus of elasticity, and the total work as measured by the area under the load-deflection curve. Perform the necessary toe compensation (see Annex A1) to correct for seating and indentation of the specimen and deflections in the machine.

10.1.8 Terminate the test when the maximum strain in the outer surface of the test specimen has reached 0.05 mm/mm (in./in.) or at break if break occurs prior to reaching the maximum strain (Notes 17 and 18). The deflection at which this strain will occur is calculated by letting r equal 0.05 mm/mm (in./in.) in Eq 2:

$$D = rL^2/6d \quad (2)$$

where:

D = midspan deflection, mm (in.),
 r = strain, mm/mm (in./in.),
 L = support span, mm (in.), and
 d = depth of beam, mm (in.).

NOTE 17—For some materials that do not yield or break within the 5 % strain limit when tested by Procedure A, the increased strain rate allowed by Procedure B (see 10.2) may induce the specimen to yield or break, or both, within the required 5 % strain limit.

NOTE 18—Beyond 5 % strain, this test method is not applicable. Some other mechanical property might be more relevant to characterize materials that neither yield nor break by either Procedure A or Procedure B within the 5 % strain limit (for example, Test Method D638 may be considered).

10.2 Procedure B:

10.2.1 Use an untested specimen for each measurement.

10.2.2 Test conditions shall be identical to those described in 10.1, except that the rate of straining of the outer surface of the test specimen shall be 0.10 mm/mm (in./in.)/min.

10.2.3 If no break has occurred in the specimen by the time the maximum strain in the outer surface of the test specimen has reached 0.05 mm/mm (in./in.), discontinue the test (see Note 18).

11. Retests

11.1 Values for properties at rupture shall not be calculated for any specimen that breaks at some obvious, fortuitous flaw, unless such flaws constitute a variable being studied. Retests shall be made for any specimen on which values are not calculated.

12. Calculation

12.1 Toe compensation shall be made in accordance with Annex A1 unless it can be shown that the toe region of the curve is not due to the take-up of slack, seating of the specimen, or other artifact, but rather is an authentic material response.

12.2 Flexural Stress (σ_f):

$$\sigma_f = 3PL/2bd^2 \quad (3)$$

where:

σ = stress in the outer fibers at midpoint, MPa (psi),
 P = load at a given point on the load-deflection curve, N (lbf),
 L = support span, mm (in.),
 b = width of beam tested, mm (in.), and
 d = depth of beam tested, mm (in.).

NOTE 19—Eq 3 is not valid if the specimen slips excessively between the supports.

12.3 Flexural Stress for Beams Tested at Large Support Spans (σ_f):

$$\sigma_f = (3PL/2bd^2)[1 + 6(D/L)^2 - 4(d/L)(D/L)] \quad (4)$$

where:

σ_f , P , L , b , and d = the same as for Eq 3, and
 D = deflection of the centerline of the specimen at the middle of the support span, mm (in.).

NOTE 20—When large support span-to-depth ratios are used, significant end forces are developed at the support noses, which will affect the moment in a simple supported beam. Eq 4 includes additional terms that are an approximate correction factor for the influence of these end forces in large support span-to-depth ratio beams where relatively large deflections exist.

12.4 Flexural Strain, ϵ_f —Nominal fractional change in the length of an element of the outer surface of the test specimen at midspan, where the maximum strain occurs. It may be calculated for any deflection using Eq 5:

$$\epsilon_f = 6Dd/L^2 \quad (5)$$

where:

ϵ_f = strain in the outer surface, mm/mm (in./in.),
 D = maximum deflection of the center of the beam, mm (in.),
 L = support span, mm (in.), and
 d = depth, mm (in.) of beam tested.

12.5 Modulus of Elasticity:

12.5.1 Tangent Modulus of Elasticity:

$$E_B = L^3m/4bd^3 \quad (6)$$

where:

E_B = modulus of elasticity in bending, MPa (psi),
 L = support span, mm (in.),
 b = width of beam tested, mm (in.),
 d = depth of beam tested, mm (in.), and
 m = slope of the tangent to the initial straight-line portion of the load-deflection curve, N/mm (lbf/in.) of deflection.

12.5.2 Chord Modulus (E_f)—

$$E_f = (\sigma_{f2} - \sigma_{f1})/(\epsilon_{f2} - \epsilon_{f1}) \quad (7)$$

where:

σ_{f2} and σ_{f1} = the flexural stresses, calculated from Eq 3 or Eq 4 and measured at the predefined points on the load deflection curve, and ϵ_{f2} and ϵ_{f1} = the flexural strain values, calculated from Eq 5 and measured at the predetermined points on the load deflection curve.

12.6 Arithmetic Mean—For each series of tests, the arithmetic mean of all values obtained shall be calculated to three significant figures and reported as the “average value” for the particular property in question.

12.7 Standard Deviation—The standard deviation (estimated) shall be calculated as follows and be reported to two significant figures:

$$s = \sqrt{(\sum X^2 - n\bar{X}^2)/(n - 1)} \quad (8)$$

where:

s = estimated standard deviation,
 X = value of single observation,
 n = number of observations, and

\bar{X} = arithmetic mean of the set of observations.

13. Report

- 13.1 Report the following information:
 - 13.1.1 Complete identification of the material tested, including type, source, manufacturer's code number, form, principal dimensions, and previous history (for laminated materials, ply-stacking sequence shall be reported),
 - 13.1.2 Method of specimen preparation,
 - 13.1.3 Direction of cutting and loading specimens, when appropriate,
 - 13.1.4 Conditioning procedure,
 - 13.1.5 Depth and width of specimen,
 - 13.1.6 Reference to this international standard, the Procedure used (A or B), and type test performed (I or II), for example D790-AI. If Type I test, specify if machine compliance is used.
 - 13.1.7 Support span length,
 - 13.1.8 Support span-to-depth ratio if different than 16:1,
 - 13.1.9 Radius of supports and loading noses, if different than 5 mm. When support and/or loading nose radii other than 5 mm are used, the results shall be identified as being generated by a modified version of this test method and the referring specification referenced as to the geometry used.
 - 13.1.10 Rate of crosshead motion,
 - 13.1.11 Flexural strain at any given stress, average value and standard deviation,
 - 13.1.12 If a specimen is rejected, reason(s) for rejection,
 - 13.1.13 Tangent, secant, or chord modulus in bending, average value, standard deviation, and the strain level(s) used if secant or chord modulus,
 - 13.1.14 Flexural strength (if desired), average value, and standard deviation,
 - 13.1.15 Stress at any given strain up to and including 5 % (if desired), with strain used, average value, and standard deviation,
 - 13.1.16 Flexural stress at break (if desired), average value, and standard deviation,
 - 13.1.17 Type of behavior, whether yielding or rupture, or both, or other observations, occurring within the 5 % strain limit, and
 - 13.1.18 Date of specific version of test used.

14. Precision and Bias

14.1 Tables 1 and 2 are based on a round-robin test conducted in 1984, in accordance with Practice E691, involving six materials tested by six laboratories using Procedure A. For each material, all the specimens were prepared at one source. Each "test result" was the average of five individual determinations. Each laboratory obtained two test results for each material.

Note 21—**Caution:** The following explanations of *r* and *R* (14.2 - 14.2.3) are intended only to present a meaningful way of considering the approximate precision of these test methods. The data given in Tables 1 and 2 should not be applied rigorously to the acceptance or rejection of materials, as those data are specific to the round robin and may not be representative of other lots, conditions, materials, or laboratories. Users of these test methods should apply the principles outlined in Practice E691 to generate data specific to their laboratory and materials, or between specific

TABLE 1 Flexural Strength

Material	Mean, 10 ³ psi	Values Expressed in Units of % of 10 ³ psi			
		V _L ^a	V _R ^b	r ^c	R ^d
ABS	9.99	1.59	6.05	4.44	17.2
DAP thermoset	14.3	6.58	6.58	18.6	18.6
Cast acrylic	16.3	1.67	11.3	4.73	32.0
GR polyester	19.5	1.43	2.14	4.05	6.08
GR polycarbonate	21.0	5.16	6.05	14.6	17.1
SMC	26.0	4.76	7.19	13.5	20.4

^a V_L = within-laboratory coefficient of variation for the indicated material. It is obtained by first pooling the within-laboratory standard deviations of the test results from all of the participating laboratories: $S_R = \{[(s_1)^2 + (s_2)^2 + \dots + (s_n)^2]/n\}^{1/2}$ then V_L = (S_R divided by the overall average for the material) × 100.
^b V_R = between-laboratory reproducibility, expressed as the coefficient of variation: $S_{LR} = (S_L^2 + S_L^2)^{1/2}$ where S_L is the standard deviation of laboratory means. Then: V_R = (S_{LR} divided by the overall average for the material) × 100.
^c r = within-laboratory critical interval between two test results = 2.8 × V_L.
^d R = between-laboratory critical interval between two test results = 2.8 × V_R.

TABLE 2 Flexural Modulus

Material	Mean, 10 ³ psi	Values Expressed in units of % of 10 ³ psi			
		V _L ^a	V _R ^b	r ^c	R ^d
ABS	338	4.79	7.69	13.6	21.8
DAP thermoset	485	2.89	7.18	8.15	20.4
Cast acrylic	810	13.7	16.1	38.8	45.4
GR polyester	816	3.49	4.20	9.91	11.9
GR polycarbonate	1790	5.52	5.52	15.6	15.6
SMC	1950	10.9	13.8	30.8	39.1

^a V_L = within-laboratory coefficient of variation for the indicated material. It is obtained by first pooling the within-laboratory standard deviations of the test results from all of the participating laboratories: $S_R = \{[(s_1)^2 + (s_2)^2 + \dots + (s_n)^2]/n\}^{1/2}$ then V_L = (S_R divided by the overall average for the material) × 100.
^b V_R = between-laboratory reproducibility, expressed as the coefficient of variation: $S_{LR} = (S_L^2 + S_L^2)^{1/2}$ where S_L is the standard deviation of laboratory means. Then: V_R = (S_{LR} divided by the overall average for the material) × 100.
^c r = within-laboratory critical interval between two test results = 2.8 × V_L.
^d R = between-laboratory critical interval between two test results = 2.8 × V_R.

laboratories. The principles of 14.2 - 14.2.3 would then be valid for such data.

14.2 *Concept of "r" and "R" in Tables 1 and 2*—If S_R and S_{LR} have been calculated from a large enough body of data, and for test results that were averages from testing five specimens for each test result, then:

14.2.1 *Repeatability*—Two test results obtained within one laboratory shall be judged not equivalent if they differ by more than the *r* value for that material. *r* is the interval representing the critical difference between two test results for the same material, obtained by the same operator using the same equipment on the same day in the same laboratory.

14.2.2 *Reproducibility*—Two test results obtained by different laboratories shall be judged not equivalent if they differ by more than the *R* value for that material. *R* is the interval representing the critical difference between two test results for the same material, obtained by different operators using different equipment in different laboratories.

14.2.3 The judgments in 14.2.1 and 14.2.2 will have an approximately 95 % (0.95) probability of being correct.

14.3 *Bias*—Make no statement about the bias of these test methods, as there is no standard reference material or reference test method that is applicable.

15. Keywords

15.1 flexural properties; plastics; stiffness; strength

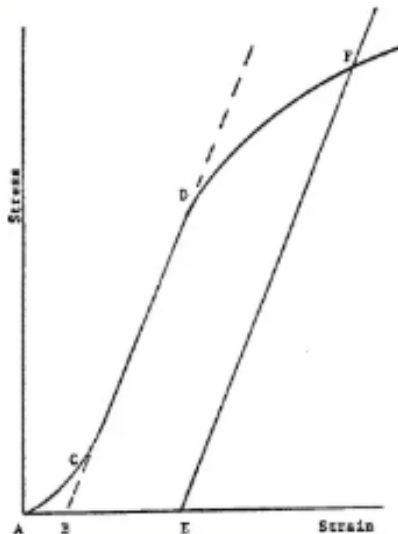
ANNEXES

(Mandatory Information)

A1. TOE COMPENSATION

A1.1 In a typical stress-strain curve (see Fig. A1.1) there is a toe region, *AC*, that does not represent a property of the material. It is an artifact caused by a takeup of slack and

alignment or seating of the specimen. In order to obtain correct values of such parameters as modulus, strain, and offset yield point, this artifact must be compensated for to give the corrected zero point on the strain or extension axis.

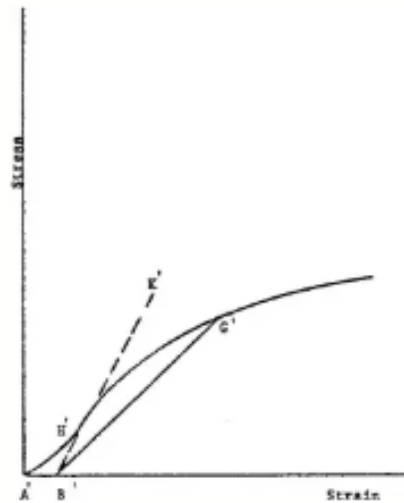


NOTE 1—Some chart recorders plot the mirror image of this graph.

FIG. A1.1 Material with Hookean Region

A1.2 In the case of a material exhibiting a region of Hookean (linear) behavior (see Fig. A1.1), a continuation of the linear (*CD*) region of the curve is constructed through the zero-stress axis. This intersection (*B*) is the corrected zero-strain point from which all extensions or strains must be measured, including the yield offset (*BE*), if applicable. The elastic modulus can be determined by dividing the stress at any point along the Line *CD* (or its extension) by the strain at the same point (measured from Point *B*, defined as zero-strain).

A1.3 In the case of a material that does not exhibit any linear region (see Fig. A1.2), the same kind of toe correction of the zero-strain point can be made by constructing a tangent to the maximum slope at the inflection Point *H'*. This is extended to intersect the strain axis at Point *B'*, the corrected zero-strain point. Using Point *B'* as zero strain, the stress at any point (*G'*) on the curve can be divided by the strain at that point to obtain a secant modulus (slope of Line *B'G'*). For those materials with no linear region, any attempt to use the tangent through the inflection point as a basis for determination of an offset yield point may result in unacceptable error.



Note: 1—Some chart recorders plot the mirror image of this graph.

FIG. A1.2 Material with No Hookean Region

A2. MEASURING AND SETTING SPAN

A2.1 For flexural fixtures that have adjustable spans, it is important that the span between the supports is maintained constant or the actual measured span is used in the calculation of stress, modulus, and strain, and the loading nose or noses are positioned and aligned properly with respect to the supports. Some simple steps as follows can improve the repeatability of your results when using these adjustable span fixtures.

A2.2 Measurement of Span:

A2.2.1 This technique is needed to ensure that the correct span, not an estimated span, is used in the calculation of results.

A2.2.2 Scribe a permanent line or mark at the exact center of the support where the specimen makes complete contact. The type of mark depends on whether the supports are fixed or rotatable (see Figs. A2.1 and A2.2).

A2.2.3 Using a vernier caliper with pointed tips that is readable to at least 0.1 mm (0.004 in.), measure the distance between the supports, and use this measurement of span in the calculations.

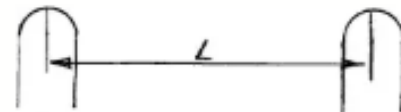


FIG. A2.1 Markings on Fixed Specimen Supports



FIG. A2.2 Markings on Rotatable Specimen Supports

A2.3 *Setting the Span and Alignment of Loading Nose(s)*—To ensure a consistent day-to-day setup of the span and ensure the alignment and proper positioning of the loading nose, simple jigs should be manufactured for each of the standard setups used. An example of a jig found to be useful is shown in Fig. A2.3.

Anexo 25.

Informe de resultado de ensayos de tracción y flexión emitido por LANUM -EPN.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)
Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño
RUC: 1760005620001 • Tel.: (0093-2) 2976300 Ext.: 3000
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



INFORME DE RESULTADOS No. IS-2025-055

Solicitud de trabajo No. DT-OT0046-2025

Quito, 5 de noviembre de 2025

DATOS DE LA EMPRESA/INSTITUCIÓN SOLICITANTE

Solicitado por: Sr. Juan Daniel Ordóñez Robledo
Empresa / Institución: Universidad Internacional del Ecuador (UIDE)
Teléfono: 0990858025
Dirección: Av Qultumbe ñan y Pachamama
E-mail: juordonezro@uide.edu.ec

Identificación de la(s) muestra(s) (cliente):

- Artillery (5 probetas para ensayos de tracción tomando como referencia la norma ASTM D638-22 y 5 probetas para ensayos de flexión tomando como referencia la norma ASTM D790-17).
- Prusa (5 probetas para ensayos de tracción tomando como referencia la norma ASTM D638-22 y 5 probetas para ensayos de flexión tomando como referencia la norma ASTM D790-17)

Descripción de la(s) muestra(s):

Probetas de PETG para ensayos de tracción y flexión con configuraciones de acuerdo con las normas ASTM D638-22 y ASTM D790-17 respectivamente. Las probetas fueron obtenidas por impresión 3D en dos diferentes impresoras identificadas como "Artillery" y "Prusa".

LABORATORIO

Fecha de Ingreso al Laboratorio: 27/10/2025

Identificación de la(s) muestra(s) (código LANUM):

25-E46-01 a 25-E46-05 para las probetas de tracción del grupo "Artillery"
25-E46-05 a 25-E46-10 para las probetas de tracción del grupo "Prusa"
25-E46-11 a 25-E46-15 para las probetas de flexión del grupo "Artillery"
25-E46-16 a 25-E46-20 para las probetas de flexión del grupo "Prusa"

Fechas en que se realizaron los ensayos:

29/10/2025

Áreas del laboratorio donde se realizaron los ensayos:

Área de caracterización mecánica.

Condiciones ambientales corregidas:

En la tabla 1 se reportan las condiciones ambientales corregidas en la fecha en que se realizaron los ensayos de tracción y flexión para los grupos de probetas "Artillery" y "Prusa", respectivamente.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orfella Ricuarte" • Calle Isabela Católica 5/N y Alfredo Mesa Casmalfo
RUC: 1760005420001 • Tel.: (00593-2) 2976200 Ext.: 3000
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum_fm@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



Tabla 1. Condiciones ambientales corregidas en la fecha en que se realizaron los ensayos de tracción y flexión, tomando como referencia las normas ASTM D638-22 y ASTM D790-17 para los grupos de probetas "Artillery" y "Prusa".

Id. Muestra	Fecha	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Humedad inicial (% HR)	Humedad final (% HR)
"Artillery-01" a "Artillery-05" 25-E46-01 a 25-E46-05	29/10/2025	19,8	20,2	59,3	57,7
"Prusa-01" a "Prusa-05" 25-E46-06 a 25-E46-10	29/10/2025	20,1	20,3	56,5	55,5
"Artillery-01" a "Artillery-05" 25-E46-11 a 25-E46-15	29/10/2025	20,0	20,1	58,5	59,1
"Prusa-01" a "Prusa-05" 25-E46-16 a 25-E46-20	29/10/2025	20,1	20,3	59,3	58,3

EQUIPOS UTILIZADOS

- Máquina universal de ensayos marca: Tinius Olsen, modelo: H25K5; capacidad máxima 25 kN; precisión utilizada: 0,01 N. Utilizada para ejecutar los ensayos de tracción.
- Calibrador de vernier marca: Mitutoyo, modelo: Absolute Digimatic (12"/300 mm), con apreciación de 0,01 mm. Utilizado para medición de dimensiones de las probetas.
- Micrómetro analógico marca: Mitutoyo, modelo: 103-104, con una apreciación de 0,01 mm. Utilizado para medición de dimensiones de las probetas.
- Termohigrómetro, marca: ELITECH, modelo: RCW-800 wifi, apreciación de 0,1 °C y 0,1 %HR. Utilizado para medición de condiciones ambientales.

MÉTODOS EMPLEADOS

1. Ensayos de tracción tomando como referencia la norma ASTM D638-22

El método empleado es el descrito en la norma ASTM D638-22, salvo por las condiciones ambientales para acondicionar las muestras y ejecutar los ensayos, mismas que no pueden ser controladas por el laboratorio.

- Tipo de probeta: I.
- Distancia calibrada para medir la deformación: 50 mm.
- Velocidad de ensayo: 5 mm/mín.
- Fin del ensayo: cuando se hayan roto las probetas.

2. Ensayos de flexión, tomando como referencia la norma ASTM D790-17:

El método empleado es el descrito en la norma ASTM D790-17, salvo por las condiciones ambientales para acondicionar las muestras y para ejecutar los ensayos, que no pueden ser controlados por el laboratorio.

- Flexión en tres puntos, procedimiento A.
- Radio de los apoyos y nariz de flexión: 5,0 +/- 0,1 mm.
- Relación entre el espesor y la distancia entre apoyos: 1:16.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica 5/N y Alfredo Mesa Casmaño
RUC: 1762005620001 • Tel: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000

Apartado 17-01-3759 • E-mail: lanum_fm@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



- Fin del ensayo: cuando las probetas se hayan deformado hasta un 5% o cuando se rompan antes de esa deformación.
- Velocidad de ensayo:
La velocidad de ensayo o tasa de posición del cabezal móvil de la máquina universal de ensayos está dada por la ecuación 1 de la norma ASTM D790-17 en la página 5 de dicha norma.

$$R = \frac{Z L^2}{6d} \quad (1)$$

Donde:

R= Tasa de posición de la mordaza móvil (velocidad de ensayo), mm/min.

L= Distancia entre apoyos, mm.

d= Espesor de la probeta, mm.

Z= Tasa de deformación de la fibra externa, mm/mm/min (Procedimiento A: Z= 0,01).

De acuerdo con la expresión descrita anteriormente, se obtuvieron las velocidades de ensayo para los grupos de probetas:

"Artillery" (25-E46-11 a 25-E46-15): 1,38 mm/min.

"Prusa" (25-E46-16 a 25-E46-20): 1,36 mm/min.

RESULTADOS

1. Ensayos de tracción tomando como referencia la norma ASTM D638-22

En las Tablas 2 y 3 se presentan los resultados de los ensayos de resistencia a tracción tomando como referencia la norma ASTM D638-22 para las probetas del grupo "Artillery" y "Prusa" respectivamente.

En las Figuras 1 y 2 se muestran las condiciones de las probetas de los grupos "Artillery" y "Prusa" respectivamente, después de los ensayos de resistencia a tracción.

2. Ensayos de flexión tomando como referencia la norma ASTM D790-17

En las Tablas 4 y 5 se presentan los resultados de los ensayos de resistencia a flexión tomando como referencia la norma ASTM D790-17 para las probetas del grupo "Artillery" y "Prusa" respectivamente.

En las Figuras 3 y 4 se muestran las condiciones de las probetas de los grupos "Artillery" y "Prusa" respectivamente, después de los ensayos de resistencia a flexión.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orfano Ricuarte" • Calle Isabela Católica 5/N y Alfredo Mena Caamaño
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum_fm@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



Tabla 2. Resultados del ensayo de resistencia a tracción tomando como referencia la norma ASTM D638-22 para las probetas del grupo "Artillery".

ENSAYO DE TRACCIÓN ASTM D638-22										
Muestra No.	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm ²)	Fuerza última a la tracción (N)	Fuerza a la rotura (N)	Resistencia a la tracción en el punto de fluencia / Resistencia última (MPa)	Módulo secante de elasticidad (MPa)	Elongación en el punto de fluencia (%)	Esfuerzo a la tracción en la rotura (MPa)	Elongación a la rotura (%)
Artillery-01 25-E46-01	13,22	3,23	42,71	1635,88	1135,55	38,30	3511,21	1,67	26,59	5,40
Artillery-02 25-E46-02	13,11	3,21	42,07	1641,74	1282,02	39,02	3580,89	1,75	30,47	6,21
Artillery-03 25-E46-03	13,21	3,26	43,01	1578,02	1092,80	36,69	3913,40	1,59	25,41	4,48
Artillery-04 25-E46-04	13,13	3,21	42,10	1630,84	1348,83	38,74	3558,12	1,70	32,04	4,59
Artillery-05 25-E46-05	13,30	3,23	43,00	1624,97	1333,16	37,79	3675,00	1,71	31,00	4,20
		Promedio	\bar{x}	1622,29	1238,47	38,11	3647,72	1,68	29,10	4,98
		Desviación estándar	S_{n-1}	25,51	117,10	0,92	160,05	0,06	2,92	0,82
		Coefficiente de variación	CV (%)	1,57	9,46	2,41	4,39	3,55	10,03	16,51



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orfano Ricuarte" • Calle Isabela Católica 5/N y Alfredo Mena Caamaño
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum_fm@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



Tabla 3. Resultados del ensayo de resistencia a tracción tomando como referencia la norma ASTM D638-22 para las probetas del grupo "Prusa".

ENSAYO DE TRACCIÓN ASTM D638-22										
Muestra No.	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm ²)	Fuerza última a la tracción (N)	Fuerza a la rotura (N)	Resistencia a la tracción en el punto de fluencia / Resistencia última (MPa)	Módulo secante de elasticidad (MPa)	Elongación en el punto de fluencia (%)	Esfuerzo a la tracción en la rotura (MPa)	Elongación a la rotura (%)
Prusa-01 25-E46-06	12,84	3,21	41,27	1256,85	1005,94	30,46	3406,25	1,97	24,38	3,26
Prusa-02 25-E46-07	12,87	3,19	41,00	1266,92	944,11	30,90	3354,53	1,91	23,03	4,24
Prusa-03 25-E46-08	12,87	3,21	41,27	1221,64	1199,83	29,60	3188,00	1,81	29,08	2,06
Prusa-04 25-E46-09	12,90	3,21	41,41	1259,37	948,24	30,42	3123,07	2,08	22,90	4,17
Prusa-05 25-E46-10	12,89	3,19	41,11	1303,82	1082,91	31,72	3299,13	1,96	26,34	3,89
		Promedio	\bar{x}	1261,72	1036,21	30,62	3274,20	1,95	25,15	3,52
		Desviación estándar	S_{n-1}	29,30	107,34	0,77	117,03	0,10	2,60	0,91
		Coefficiente de variación	CV (%)	2,32	10,36	2,52	3,57	5,04	10,33	25,68



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica 5/N y Alfredo Mena Caamaño
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum_fm@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



Tabla 4. Resultados del ensayo de resistencia a flexión tomando como referencia la norma ASTM D790-17 para las probetas del grupo "Artillery".

ENSAYO DE FLEXIÓN ASTM D790-17										
Muestra No.	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Distancia entre apoyos (mm)	Carga última (N)	Resistencia a la flexión en la deformación última ($\sigma_{0.2}$) (MPa)	Carga a la rotura (N)	Esfuerzo de flexión en la rotura ($\sigma_{0.2}$) (MPa)	Módulo tangente (E_t) (MPa)	Deformación última (%)	Deformación a la rotura (%)
Artillery-01 25-E46-11	12,64	3,24	51,85	118,38	69,41	-	-	1847,67	5,00	-
Artillery-02 25-E46-12	12,67	3,22	51,53	115,87	68,03	-	-	1836,38	5,00	-
Artillery-03 25-E46-13	12,74	3,22	51,53	115,04	67,44	-	-	1775,87	5,00	-
Artillery-04 25-E46-14	12,62	3,22	51,53	113,37	66,96	-	-	1772,15	5,00	-
Artillery-05 25-E46-15	12,71	3,22	51,53	116,70	68,46	-	-	1823,67	5,00	-
Promedio			\bar{x}	115,87	68,06	-	-	1811,15	5,00	-
Desviación estándar			S_{n-1}	1,87	0,95	-	-	34,97	0,00	-
Coefficiente de variación			CV (%)	1,61	1,39	-	-	1,93	0,03	-

Observación: El ensayo se detuvo al 5% de deformación, conforme lo establece la norma ASTM D790-17 en su numeral 4.1.: "La muestra se deforma hasta que se produce una ruptura en la superficie exterior de la probeta de ensayo o hasta que se alcanza una deformación máxima del 5,0 %, lo que ocurra primero"



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica 5/N y Alfredo Mena Caamaño
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum_fm@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



Tabla 5. Resultados del ensayo de resistencia a flexión tomando como referencia la norma ASTM D790-17 para las probetas del grupo "Prusa".

ENSAYO DE FLEXIÓN ASTM D790-17										
Muestra No.	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Distancia entre apoyos (mm)	Carga última (N)	Resistencia a la flexión en la deformación última ($\sigma_{0.2}$) (MPa)	Carga a la rotura (N)	Esfuerzo de flexión en la rotura ($\sigma_{0.2}$) (MPa)	Módulo tangente (E_t) (MPa)	Deformación última (%)	Deformación a la rotura (%)
Prusa-01 25-E46-16	12,59	3,14	50,25	109,18	66,15	-	-	1809,34	5,00	-
Prusa-02 25-E46-17	12,57	3,16	50,57	106,68	64,49	-	-	1770,82	5,00	-
Prusa-03 25-E46-18	12,54	3,19	51,05	96,62	58,00	-	-	1640,32	5,00	-
Prusa-04 25-E46-19	12,61	3,17	50,73	99,99	59,91	-	-	1655,14	5,00	-
Prusa-05 25-E46-20	12,55	3,21	51,37	99,14	59,20	-	-	1648,89	5,00	-
Promedio			\bar{x}	102,32	61,55	-	-	1704,90	5,00	-
Desviación estándar			S_{n-1}	5,34	3,56	-	-	79,12	0,00	-
Coefficiente de variación			CV (%)	5,22	5,78	-	-	4,64	0,05	-

Observación: El ensayo se detuvo al 5% de deformación, conforme lo establece la norma ASTM D790-17 en su numeral 4.1.: "La muestra se deforma hasta que se produce una ruptura en la superficie exterior de la probeta de ensayo o hasta que se alcanza una deformación máxima del 5,0 %, lo que ocurra primero"



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orfella Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño
RUC: 1760005630001 • Tel: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000
Apartado 17-05-2759 • E-mail: lanum.frm@epn.edu.ec • Quito – Ecuador

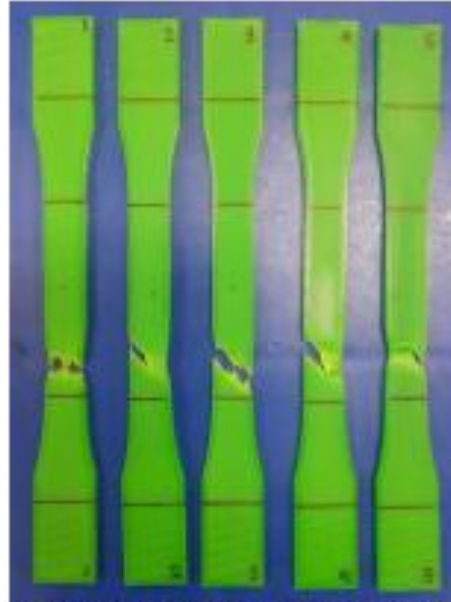


Figura 1. Condiciones finales de las probetas del grupo "Artillery" después de los ensayos de resistencia a tracción tomando como referencia la norma ASTM D638-22.



Figura 2. Condiciones finales de las probetas del grupo "Prusa" después de los ensayos de resistencia a tracción tomando como referencia la norma ASTM D638-22.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rabín Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño
RUC: 1760005620001 • Tel: (00593-2) 2976200 Ext.: 3000

Apartado 17-03-2759 • E-mail: lanum_fm@epn.edu.ec • Quito - Ecuador

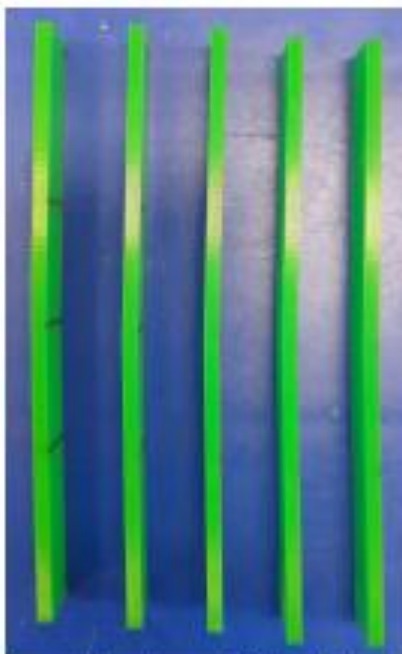


Figura 3. Condiciones finales de las probetas del grupo "Artillery" después de los ensayos de resistencia a flexión tomando como referencia la norma ASTM D790-17.



Figura 4. Condiciones finales de las probetas del grupo "Prusa" después de los ensayos de resistencia a flexión tomando como referencia la norma ASTM D790-17.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mesa Caamaño
 BUC: 1760005420001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000
 Apartado 17-01-2758 • E-mail: lanum_fm@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



Bibliografía

- American Society for Testing and Materials; ASTM D638-22; Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics; West Conshohocken; 2022.
- American Society for Testing and Materials; ASTM D790-17; Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials; West Conshohocken; 2017.

NOTA: ESTOS RESULTADOS ESTÁN RELACIONADOS ÚNICAMENTE A LA(S) MUESTRA(S) SOMETIDA(S) A ENSAYO

NOTA DE DESCARGO DE RESPONSABILIDAD: En caso de que las muestras entregadas no cumplieran con las especificaciones solicitadas por el LANUM (dimensiones, cantidad de muestra), y a pesar de eso el cliente diera su consentimiento para la realización de análisis, el LANUM no se responsabiliza si los resultados son afectados debido a estas desviaciones (no cumplimiento de especificaciones).

Realizado por:

Revisado y aprobado por:

Autorizado por:



Mgs. Orlando Campaña
 Analista Técnico



Ph.D. Salomé Galeas H.
 Responsable Técnica



Ph.D. Paulina Romero
 Coordinadora del Laboratorio



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaarte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mesa Caamaño
RUC: 1760005420001 • Tel.: (00593-2) 2976200 Ext.: 3000
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



ANEXOS

ANEXO A1. Curvas de Esfuerzo vs Deformación obtenidas para las probetas del grupo "Artillery" ensayadas a tracción tomando como referencia la norma ASTM D638-22.

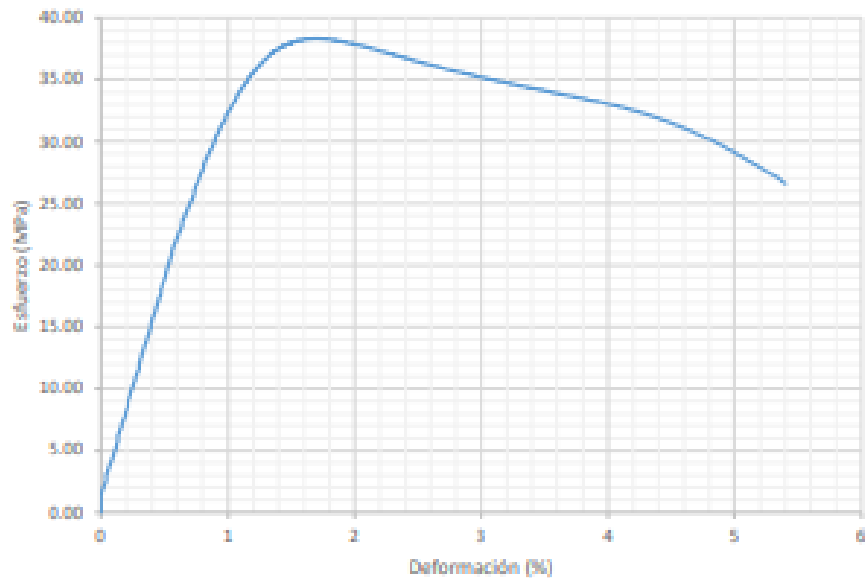


Figura A1.1. Curva de Esfuerzo vs Deformación para la probeta "Artillery-01" (25-E46-01).

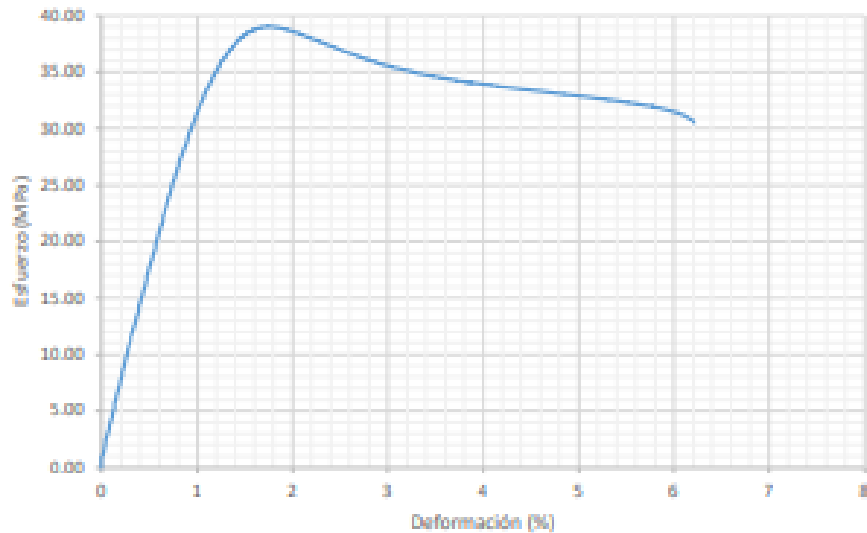


Figura A1.2. Curva de Esfuerzo vs Deformación para la probeta "Artillery-02" (25-E46-02).



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño
RUC: 1760005430001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000
Apartado 17-05-2759 • E-mail: lanum.lim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador

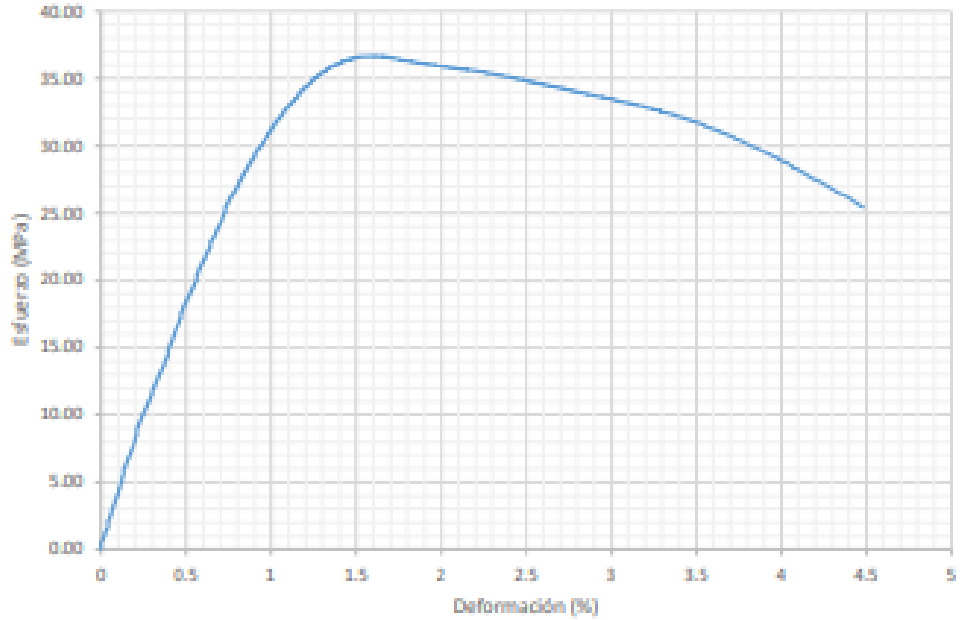


Figura A1.3. Curva de Esfuerzo vs Deformación para la probeta "Artillery-03" (25-E46-03).

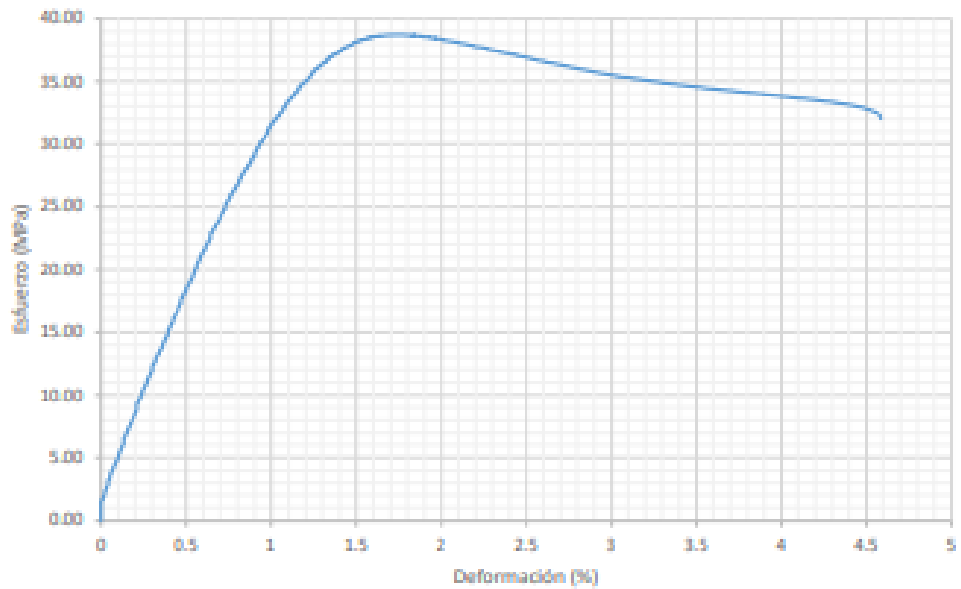


Figura A1.4. Curva de Esfuerzo vs Deformación para la probeta "Artillery-04" (25-E46-04).



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Cuamaño
RUC: 1762005620001 • Tel.: (00593-2) 3976200 Ext.: 3000
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador

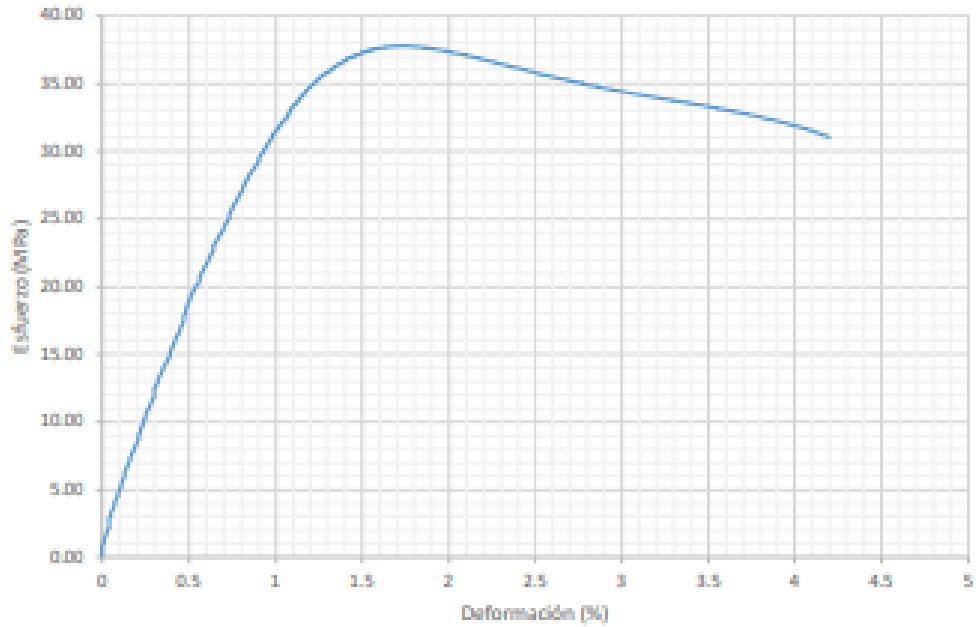


Figura A1.5. Curva de Esfuerzo vs Deformación para la probeta "Artillery-05" (25-E46-05).



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubín Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caramelo
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



ANEXO A2. Curvas de Esfuerzo vs Deformación obtenidas para las probetas del grupo "Prusa" ensayadas a tracción tomando como referencia la norma ASTM D638-22.

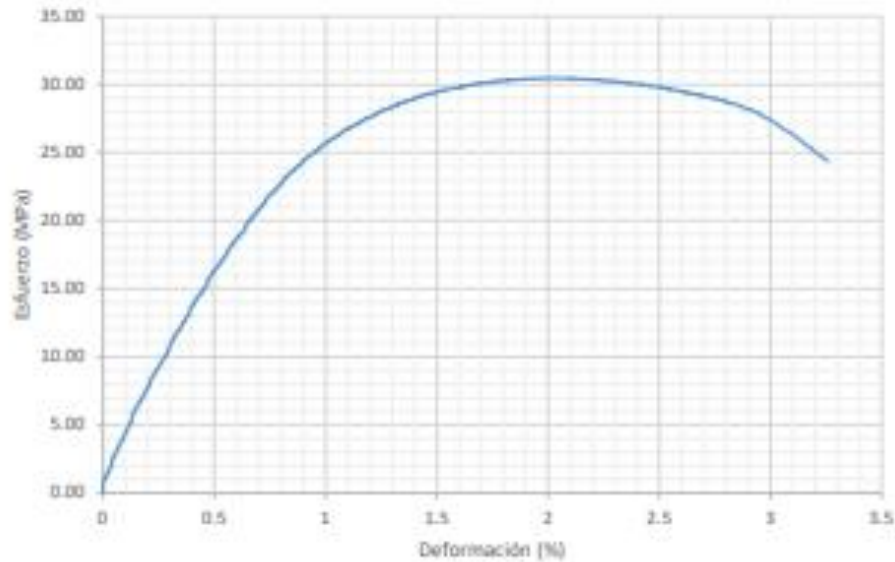


Figura A2.1. Curva de Esfuerzo vs Deformación para la probeta "Prusa-01" (25-E46-06).

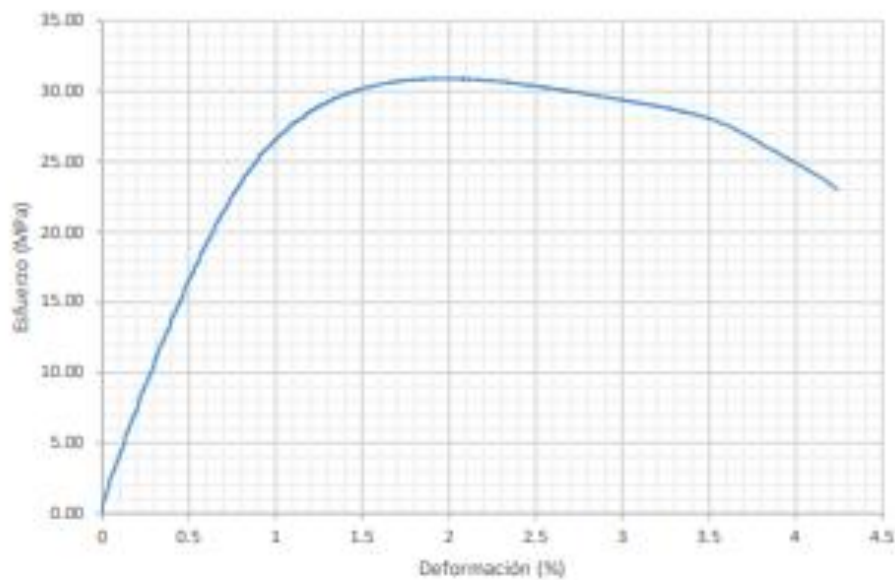


Figura A2.2. Curva de Esfuerzo vs Deformación para la probeta "Prusa-02" (25-E46-07).



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mesa Casmaño
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.lim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador

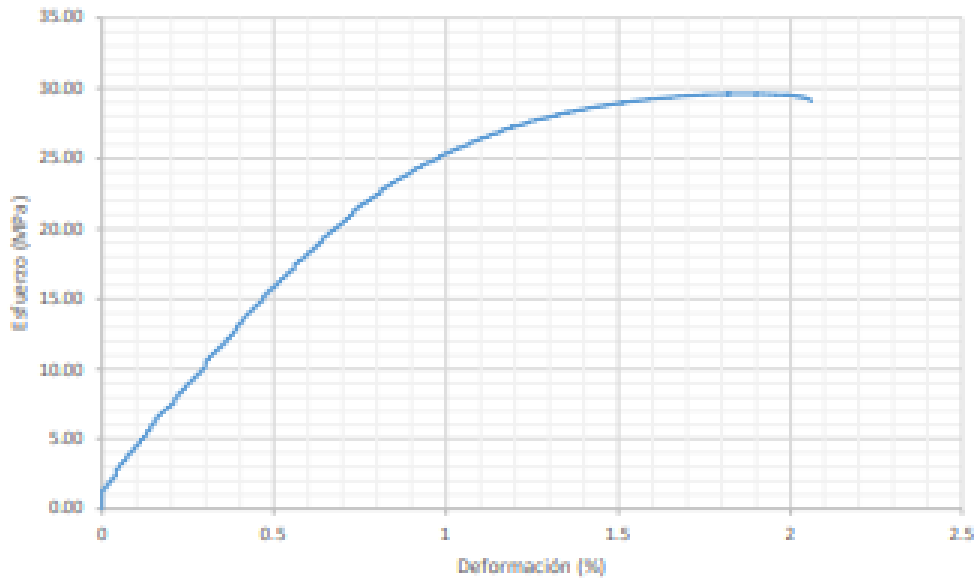


Figura A2.3. Curva de Esfuerzo vs Deformación para la probeta "Prusa-03" (25-E46-08).

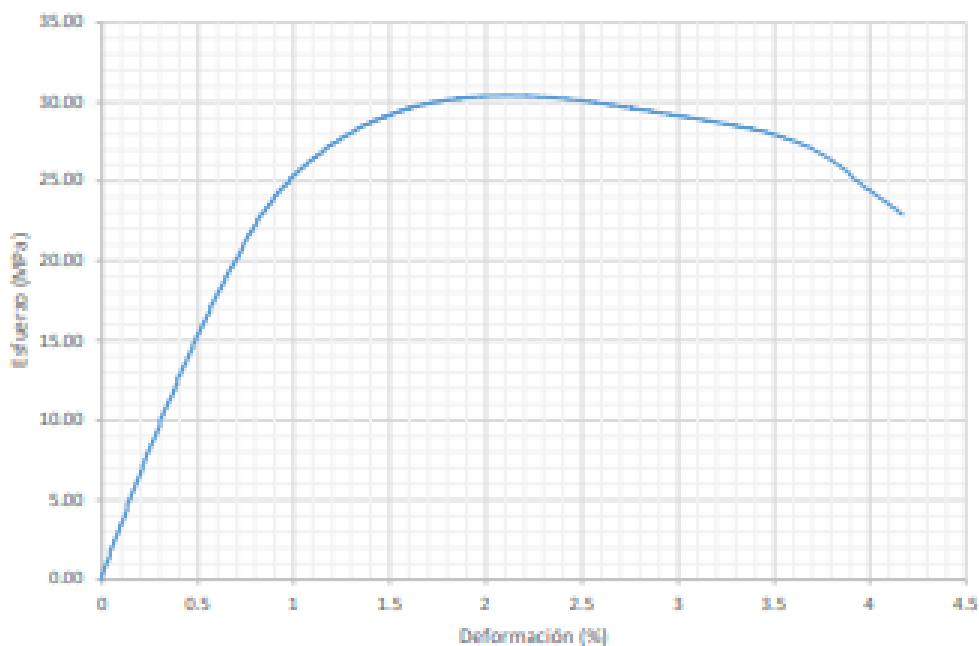


Figura A2.4. Curva de Esfuerzo vs Deformación para la probeta "Prusa-04" (25-E46-09).



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orrellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Casmaño
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000

Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.lim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador

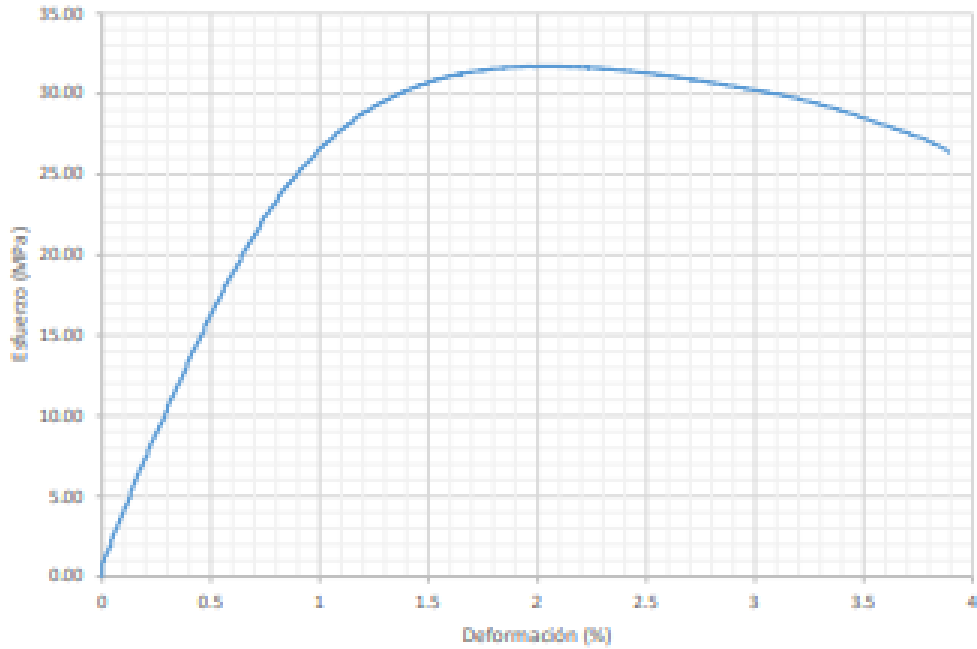


Figura A2.5. Curva de Esfuerzo vs Deformación para la probeta "Prusa-05" (25-E46-10).



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Córdoba S/N y Alfredo Mena Caamaño
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000

Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



ANEXO B1. Curvas de Fuerza vs Deflexión obtenidas para las probetas del grupo "Artillery" ensayadas a flexión tomando como referencia la norma ASTM D790-17.

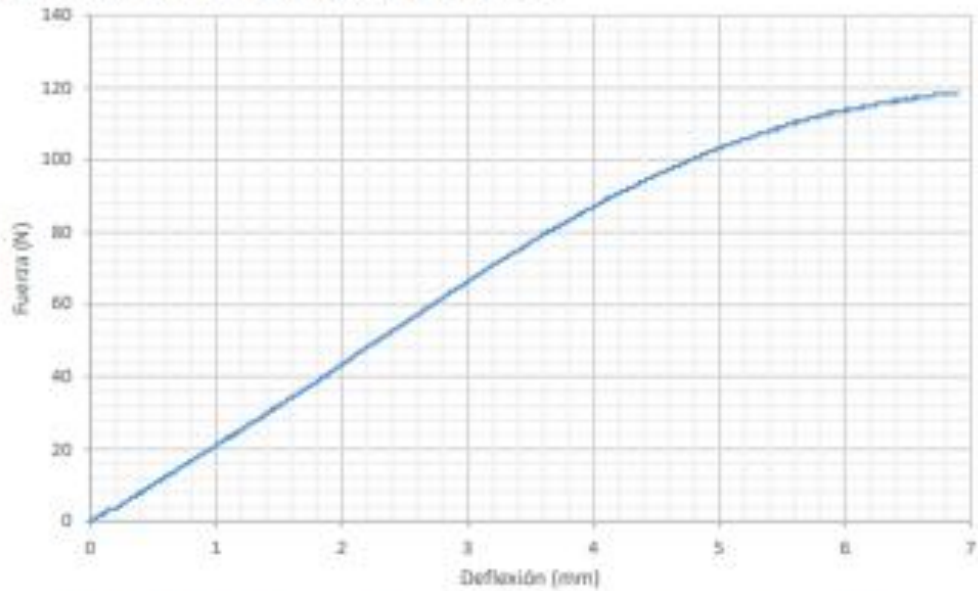


Figura B1.1. Curva de Fuerza vs Deflexión para la probeta "Artillery-01" (25-E46-11).

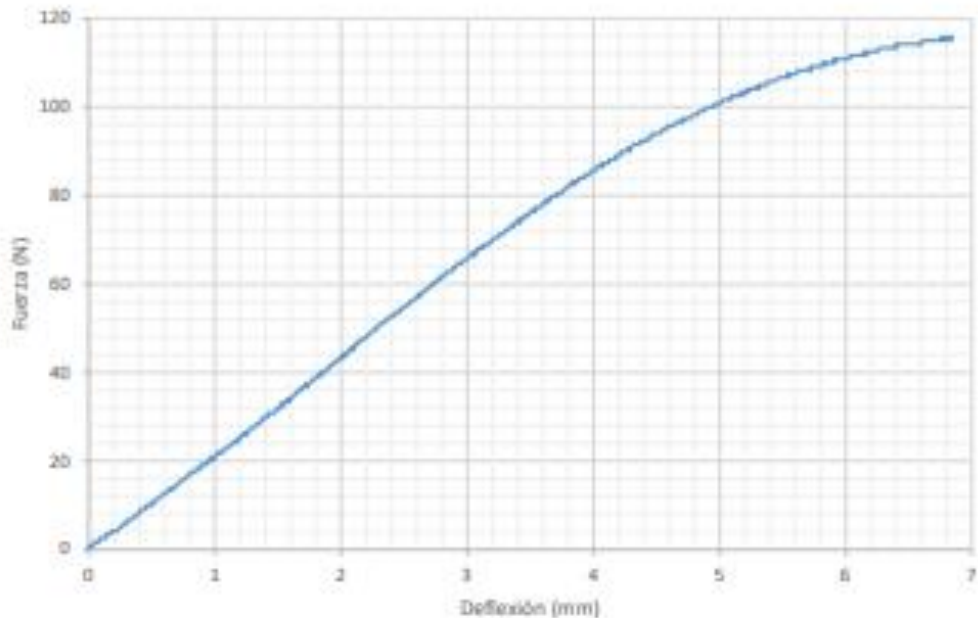


Figura B1.2. Curva de Fuerza vs Deflexión para la probeta "Artillery-02" (25-E46-12).



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mesa Cuamallo
BUC: 1760005420001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador

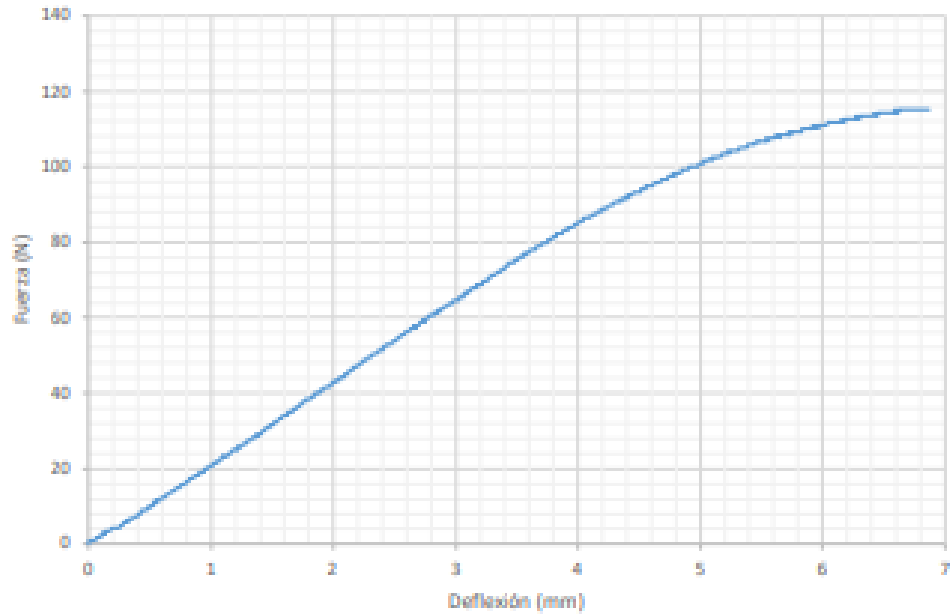


Figura B1.3. Curva de Fuerza vs Deflexión para la probeta "Artillery-03" (25-E46-13).

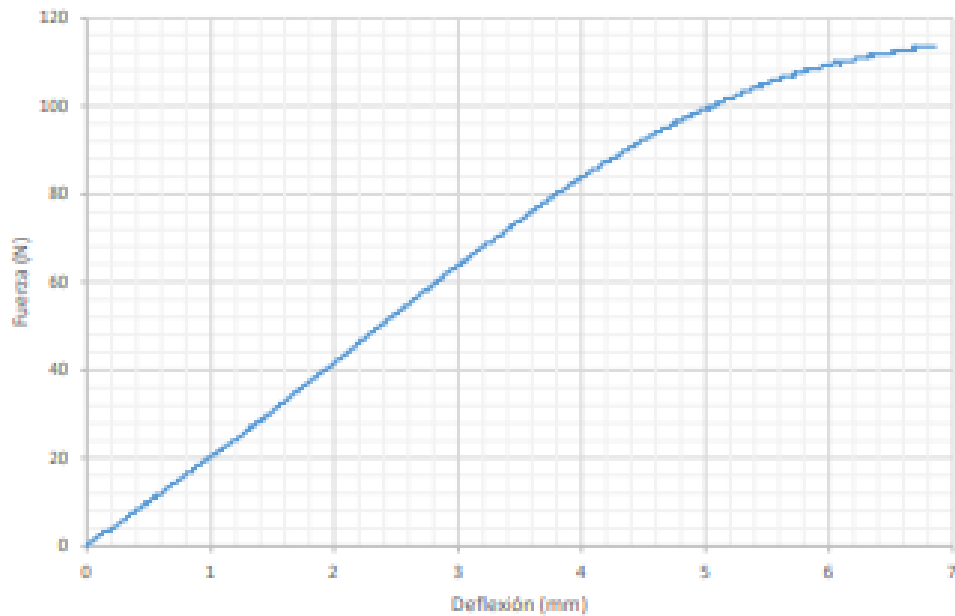


Figura B1.4. Curva de Fuerza vs Deflexión para la probeta "Artillery-04" (25-E46-14).



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00993-2) 2976300 Ext.: 3000
Apartado 17-01-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador

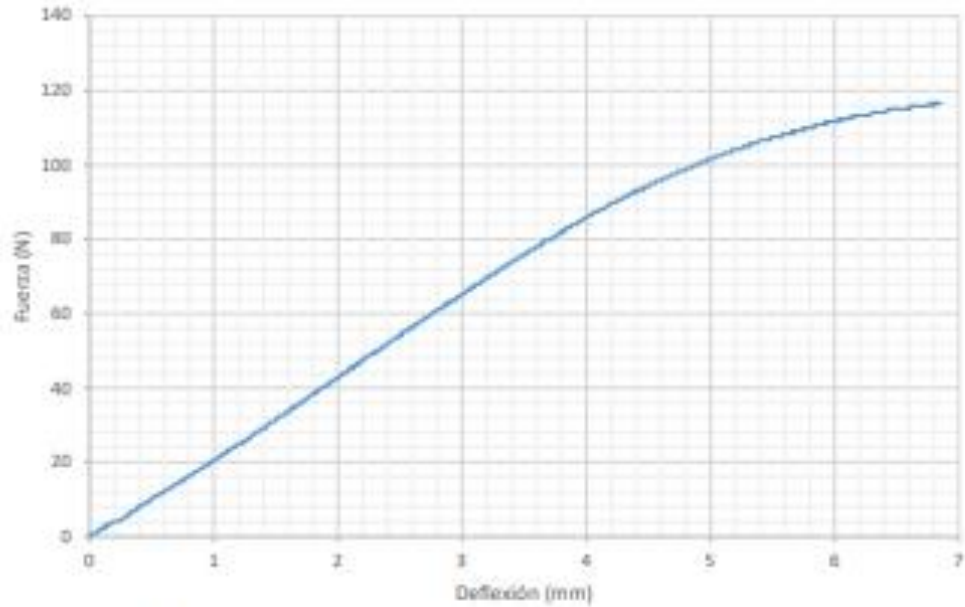


Figura B1.5. Curva de Fuerza vs Deflexión para la probeta "Artillery-05" (25-E46-15).



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño
RUC: 1760005620001 • Tel: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000
Apartado 17-03-2759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador



ANEXO B2. Curvas de Fuerza vs Deflexión obtenidas para las probetas del grupo "Prusa" ensayadas a flexión tomando como referencia la norma ASTM D790-17.

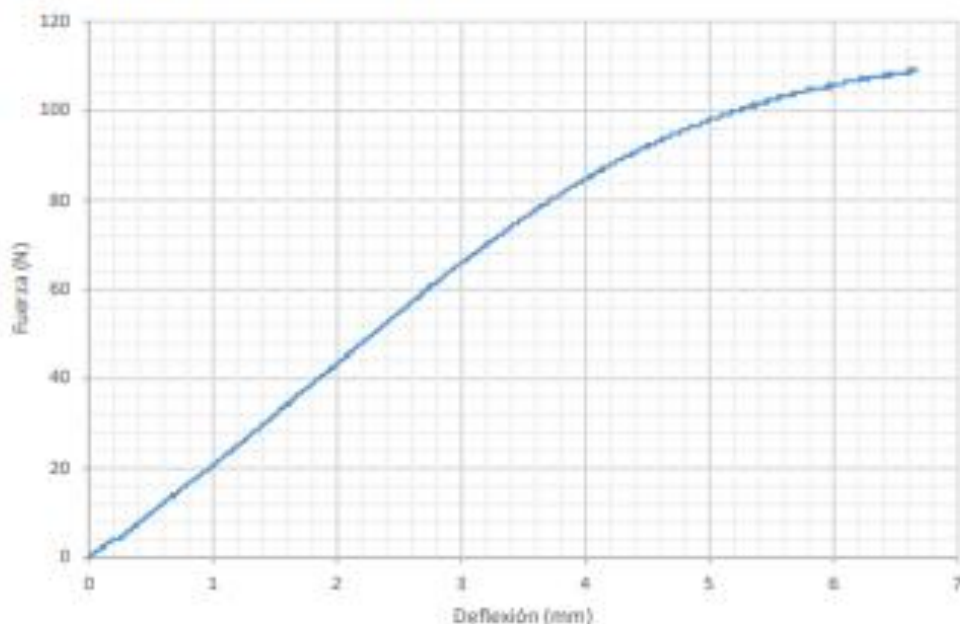


Figura B2.1. Curva de Fuerza vs Deflexión para la probeta "Prusa-01" (25-E46-16).

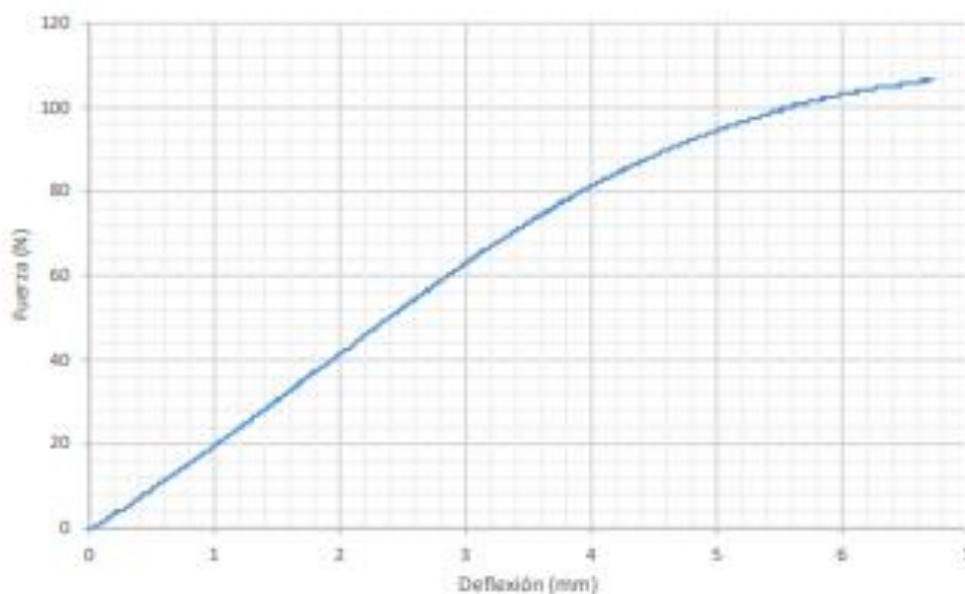


Figura B2.2. Curva de Fuerza vs Deflexión para la probeta "Prusa-02" (25-E46-17).



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Isabel Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-2) 2976300 Ext.: 3000

Apartado 17-05-2759 • E-mail: lanum_fm@epn.edu.ec • Quito – Ecuador

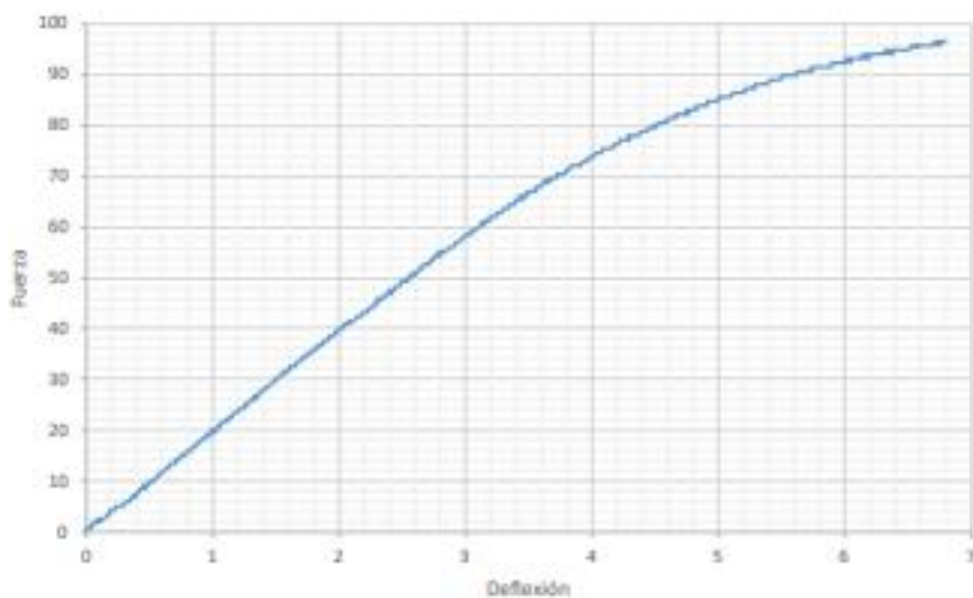


Figura B2.3. Curva de Fuerza vs Deflexión para la probeta "Prusa-03" (25-E46-18).

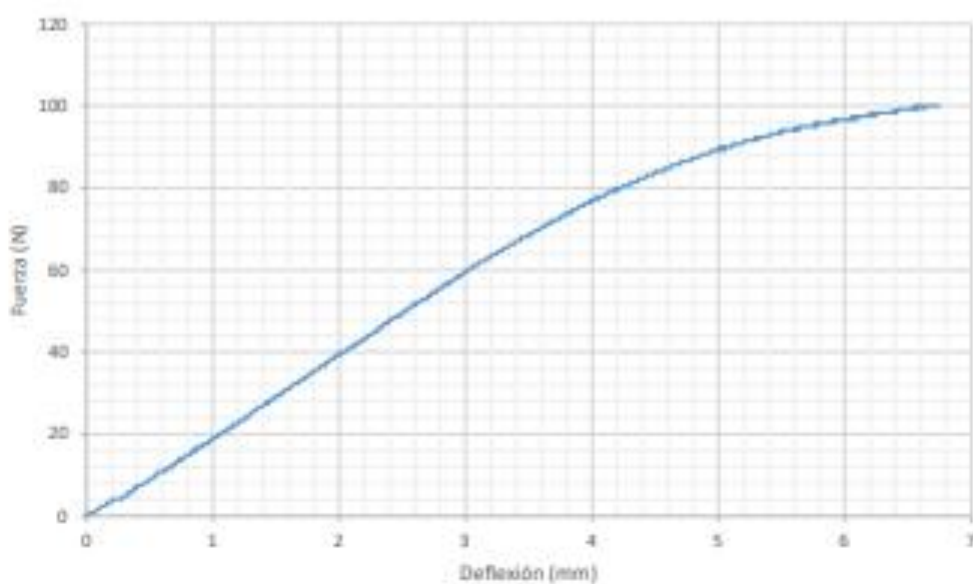


Figura B2.4. Curva de Fuerza vs Deflexión para la probeta "Prusa-04" (25-E46-19).



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES (LANUM)

Campus Politécnico "José Rubín Orellana Ricaurte" • Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Cuamaño
RUC: 1760005620001 • Tel.: (00593-3) 2976200 Ext.: 3000

Apartado 17-01-3759 • E-mail: lanum.fim@epn.edu.ec • Quito – Ecuador

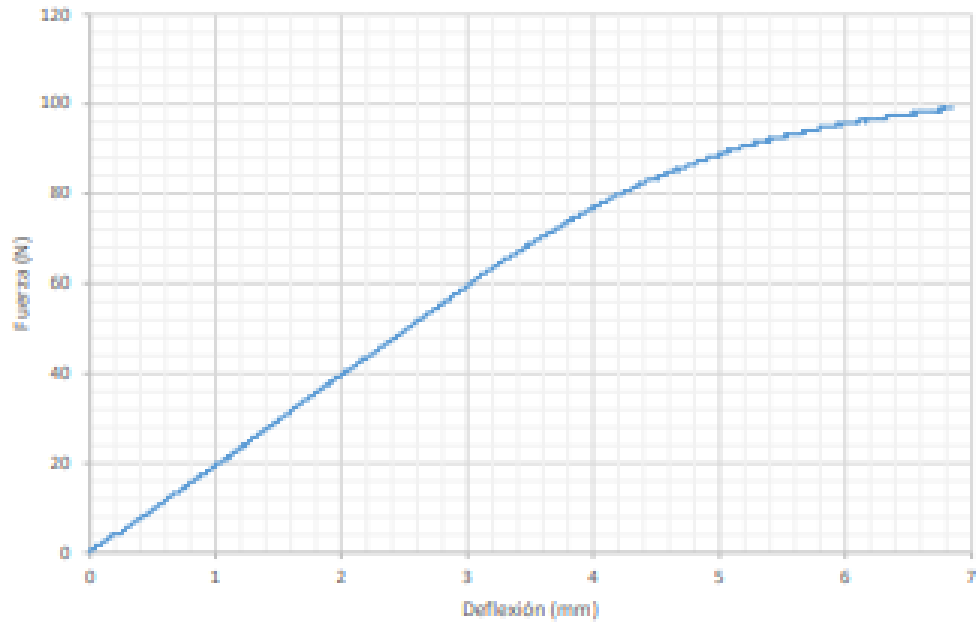


Figura B2.5. Curva de Fuerza vs Deflexión para la probeta "Prusa-05" (25-E46-20).