

Diseño virtual del péndulo de Charpy para polímeros utilizando una interfaz interactiva.

Virtual Design of the Charpy Pendulum for Polymers Using an Interactive Interface.

Erick de Jesús Jiménez de la Cruz (1).
Estudiante del TecNM/ITTG.
L21270744@tuxtla.tecnm.mx.

Hernán Valencia Sánchez* (2). Docente del TecNM/ITTG, hernan.vs@tuxtla.tecnm.mx.

Roberto Carlos García Gómez (3). Docente del TecNM/ITTG, roberto.gg@tuxtla.tecnm.mx.

Mario Alberto de la Cruz Padilla (4). Docente del TecNM/ITTG, mario.dp@tuxtla.tecnm.mx.

Juan Carlos Niños Torres (5). Docente del TecNM/ITTG, juan.nt@tuxtla.tecnm.mx.

Julio Cesar Llaven Gordillo (6). Docente del TecNM/ITTG, julio.lg@tuxtla.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en octubre 13, 2025; aceptado en noviembre 03, 2025.

Resumen.

El péndulo de Charpy es una herramienta fundamental en la evaluación de la tenacidad de los materiales, tradicionalmente utilizada para metales. Sin embargo, la creciente demanda de materiales no metálicos en diversas industrias ha impulsado la necesidad de adaptar y optimizar este método para evaluar sus propiedades mecánicas. Este proyecto se centra en la fabricación de un péndulo de Charpy específicamente diseñado para materiales no metálicos con referencia a la norma ASTM D6110-02, con el objetivo de proporcionar una metodología precisa y confiable para la medición de su resistencia al impacto a materiales Polímeros, además nos permitirá con la interfaz visualizar la gráfica del comportamiento de la energía de Impacto en el Material.

Palabras claves: ASTM, energía, péndulo.

Abstract.

The Charpy pendulum is a fundamental tool in the evaluation of the toughness of materials, traditionally used for metals. However, the growing demand for non-metallic materials in various industries has driven the need to adapt and optimize this method to evaluate their mechanical properties. This project focuses on the manufacture of a Charpy pendulum specifically designed for non-metallic materials with reference to the ASTM D6110-02 standard, with the objective of providing an accurate and reliable methodology for measuring the impact resistance of polymeric materials. It will also allow us to visualize the graph of the behavior of the impact energy in the material through the interface.

Keywords: ASTM, energy, pendulum.

1. Introducción.

El péndulo de Charpy es un dispositivo utilizado en ensayos para determinar la tenacidad de un material. Fue ideado por Georges Charpy y se utiliza para medir la energía absorbida por una probeta cuando es sometida a un impacto. El ensayo de Charpy es comúnmente utilizado en la industria para evaluar la resistencia de los materiales a las fracturas por impacto.

El péndulo Charpy es una herramienta de pruebas ampliamente utilizada por las industrias y centros de investigaciones, para determinar la energía máxima que puede absorber un material antes de llegar a la cedencia o fractura. También es utilizada en institutos de educación enfocadas en la ingeniería, para llevar a cabo prácticas de estudio de materiales. (Budynas, 2011).

2. Métodos.

¿Por qué hacer un péndulo Charpy para pruebas en base a la norma ASTM D6110-02 con su interfaz interactiva y el análisis de materiales no metálicos?

Para permitirnos realizar las siguientes actividades como son:

Evaluación de la resistencia al impacto: En la realización de un péndulo Charpy específico para materiales no metálicos permitiría evaluar la capacidad de estos materiales para resistir fuerzas de impacto, lo cual es crucial en diversas aplicaciones industriales para estos materiales.

Normativas y estándares específicos: Existe una demanda en la industria o en la investigación científica para la evaluación de materiales no metálicos según normativas específicas, la implementación de un péndulo Charpy adaptado a estos materiales podría ser necesaria para cumplir con dichos estándares y regulaciones.

Investigación y desarrollo de nuevos materiales: Es fundamental contar con herramientas de evaluación que permitan caracterizar las propiedades de estos materiales, incluida su resistencia al impacto. Un péndulo Charpy adaptado a materiales no metálicos facilitaría este proceso al proporcionar datos precisos y reproducibles sobre la resistencia al impacto de los nuevos materiales desarrollados.

Optimización de procesos de fabricación: medir la resistencia al impacto de materiales no metálicos puede ser crucial para optimizar procesos de fabricación y mejorar la calidad de los productos finales, que daría datos precisos que permitan ajustar parámetros de producción y mejorar la resistencia al impacto de los materiales.

Comparación con materiales metálicos: Algunas aplicaciones industriales requieren la sustitución de materiales metálicos por materiales no metálicos debido a consideraciones de peso, corrosión, costo, entre otros. La capacidad de comparar la resistencia al impacto de ambos tipos de materiales mediante ensayos con un péndulo Charpy en base a la norma referida sería fundamental para evaluar la viabilidad de dicha sustitución en diferentes aplicaciones.

Interfaz de comunicación interactiva con los usuarios para ver las gráficas del comportamiento de la energía de impacto del polímero obteniendo los datos del experimento en situ.

2.1 Identificación del problema.

El ensayo de impacto tipo Charpy implica el uso de un péndulo físico que, al caer desde una altura específica, golpea una probeta de ensayo colocada en su camino de oscilación. La energía de impacto aplicada varía según la masa y dimensiones del péndulo, oscilando entre 30 J para polímeros y 360 J para metales y aleaciones. La probeta, apoyada en sus extremos, experimenta una flexión a tres puntos que eventualmente resulta en su fractura, lo que lo convierte en un ensayo de flexión por choque. Este ensayo permite caracterizar la tenacidad del material, ya que la energía

absorbida por la probeta se determina mediante la diferencia entre las alturas inicial y final del péndulo. Además, el ensayo Charpy ofrece una rápida evaluación de la tenacidad del material al correlacionar la energía de impacto con el área bajo la curva de fuerza versus desplazamiento.

2.2 Parámetros iniciales.

Un péndulo se describe como una masa suspendida de un punto (*O*) por un hilo que no se puede estirar, con longitud (*L*) y masa insignificante. Según la ley de conservación de la energía, el péndulo solo tiene energía potencial en su posición inicial θ . Al pasar por la posición de equilibrio en *B*, la energía potencial se transforma en energía cinética, tomando cero como referencia en *B*.

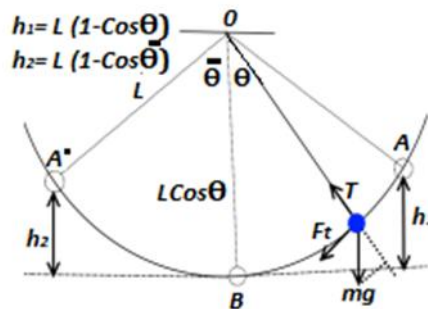


Figura 1. Movimiento del Péndulo.

Por lo tanto, utilizando la ley de la conservación de la energía cuando sobre una partícula actúa una fuerza conservativa se establece la siguiente ecuación:

$$E_{c2} = E_{p1}$$

$$\frac{1}{2} m(v_2)^2 = mgh_1 \quad \text{Ecuación 1}$$

Despejando la ecuación final se obtiene la velocidad.

$$v_2 = \sqrt{2gh_1} \quad \text{Ecuación 2}$$

Por medio del análisis del péndulo simple mostrado en la figura, la altura es:

$$h_1 = L(1 - \cos(\theta)) \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

θ : ángulo inicial

L: distancia al centro de gravedad

Bajo el mismo criterio se calcula h_2 , cuando la masa pasa el punto *B*.

$$h_2 = L(1 - \cos(\theta')) \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde:

θ' : ángulo final

L: distancia al centro de gravedad

Por lo tanto, la energía perdida por el péndulo es la energía que tiene la masa antes de soltarla dada por la ecuación 3, menos la energía que tiene la masa cuando llega a la altura h_2 representada por la ecuación 4, como lo indica la siguiente ecuación:

$$E_p = W(h_1 - h_2) \quad \text{Ecuación 5}$$

Sustituyendo las ecuaciones 3 y 4 en la ecuación 5 se obtiene:

$$E_p = W * L(\cos(\theta') - \cos(\theta)) \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

W : peso

L : distancia al centro de gravedad

θ : ángulo inicial

θ' : ángulo final

2.3 Variables Importantes del Ensayo de Impacto.

Se ha determinado mediante varias investigaciones que los resultados obtenidos en los ensayos de impacto difieren al realizar cambios en ciertas variables. A continuación, se detallan los parámetros y su influencia en el ensayo de impacto:

Tabla 1. Variables del ensayo de impacto.

Variable	Campo de Influencia
Energía que genera el péndulo.	La máxima energía generada por el péndulo restringe el tipo de materiales con los que se puede realizar las pruebas.
Masa del martillo.	La masa del martillo debe representar la mayor parte del peso total del péndulo, para que cumpla con la norma y se produzca la ruptura de la probeta con la fuerza dinámica suficiente.
Velocidad de impacto.	La velocidad que adquiere la masa al golpear la probeta queda determinada por la altura del péndulo.
Ángulo de elevación del martillo.	El Ángulo inicial suministra la velocidad final de Impacto a mayor ángulo mayor Velocidad.
Dimensiones de las probetas.	Para que el ensayo cumpla con los estándares, las probetas deben tener las dimensiones especificadas por la norma referida.
Temperatura.	La temperatura de las probetas influye en las características Mecánicas del Material.

La norma describe los métodos estándar de prueba para determinación de la resistencia al impacto Charpy en materiales plásticos. La norma ASTM D6110 define el método utilizado para determinar la resistencia a la rotura de plásticos mediante un impacto en una configuración de flexión a tres puntos utilizando un péndulo equipado con un martillo de dimensiones apropiadas. (ASTM International, 2021).

Los métodos de ensayo se utilizan para determinar la resistencia de los plásticos a la rotura por choque flexional, indicando la energía extraída del péndulo tipo martillo estandarizado, montado en máquinas estandarizadas, rompiendo probetas estándar con una oscilación del péndulo. Se requieren que las probetas se hagan con una muesca fresada, la muesca produce una concentración de esfuerzos que promueven una fractura quebradiza, más que una fractura dúctil.

Los resultados de los métodos de ensayo se presentan en términos de energía absorbida por unidad de ancho de la probeta.

La probeta deberá ajustarse a las dimensiones y geometría de la figura 2, teniendo la opción de variar la anchura entre 3,00 y 12,7 [mm]. Todas las muestras que tengan una dimensión inferior a 12,7 mm tendrán la muesca cortada en el lado más corto, como se muestra en la figura 2.

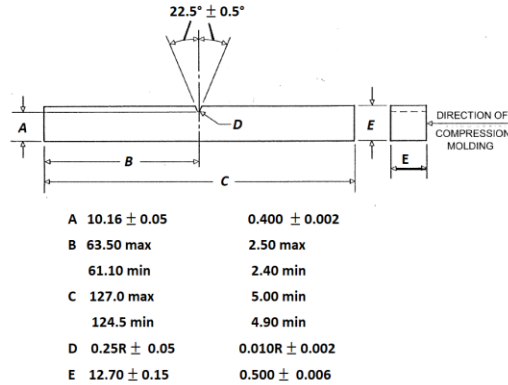


Figura 2. Probeta.

3. Adquisición de Datos para la interfaz interactiva.

La programación es esencial a la hora de proporcionar los valores de las variables estudiadas. El Encoder es un sensor de tipo digital que permite realizar mediciones de posición angular y de velocidad rotacional, por lo que para nuestros ensayos es esencial para adquirir los datos de cada prueba que se realice.

El Encoder utiliza dos sensores receptores ópticos, los cuáles van detectando los pulsos del emisor a través del disco óptico. Mediante una regla de tres se puede obtener la posición angular en función de la resolución del Encoder. La resolución se refiere a la cantidad de marcas o ranuras de referencia por donde entra el haz de luz, detectado por el receptor, como se muestra en la figura 3.

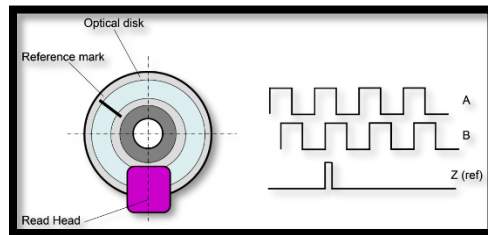


Figura 3. Encoder.

Para realizar la lectura de la posición del brazo del péndulo se realizó una programación en un software libre de adquisición de datos (figura 4) que permita obtener los valores del ángulo inicial y final a través de este dispositivo. Los valores se registran en el monitor Serial.

```

angulo.ino
1   int pinA = 2;
2   int pinB = 4;
3   float alfa = 0;
4   float beta = 0;
5   long posicion;
6   int grados;
7
8
9   void setup() {
10  pinMode(pinA, INPUT_PULLUP);
11  pinMode(pinB, INPUT_PULLUP);
12  Serial.begin(9600);
13  attachInterrupt(0, a10, RISING);
14  attachInterrupt(1, a11, RISING);
15  posicion = 0;
16  }
17
18  void loop() {
19  grados = (posicion * 360 / 600);
20  if (posicion > 1200) {
21  |   posicion = 0;
22  } else if (posicion < -1200) {
23  |   posicion = 0;
24  }
25  if (grados < alfa) {
26  |   alfa = grados;
27  }
28  if (grados > beta) {
29  |   beta = grados;
30  }
31
32  Serial.println(grados);
33  delay(100);
34  }
35
36  void a10() {
37  if (digitalRead(pinB) == LOW) {
38  |   posicion--;
39  } else {
40  |   posicion++;
41  }
42  }
43
44  void a11() {
45  if (digitalRead(pinA) == LOW) {
46  |   posicion++;
47  } else {
48  |   posicion--;
49  }
50  }

```

Figura 4. Software en Arduino.

Para realizar la plataforma interactiva donde el usuario tenga contacto con los datos obtenidos se utilizó el software de LabVIEW. Este es un tipo de programación gráfica que permite mostrar valores más dinámicos, para favorecer el análisis de los datos obtenidos.

El programa en LabVIEW obtiene los valores angulares del programa principal recibiendo los valores del monitor serial de Arduino a través del Ni visa y realiza los cálculos necesarios proporcionados (figura 5). Este programa usa un tipo de comunicación serial.

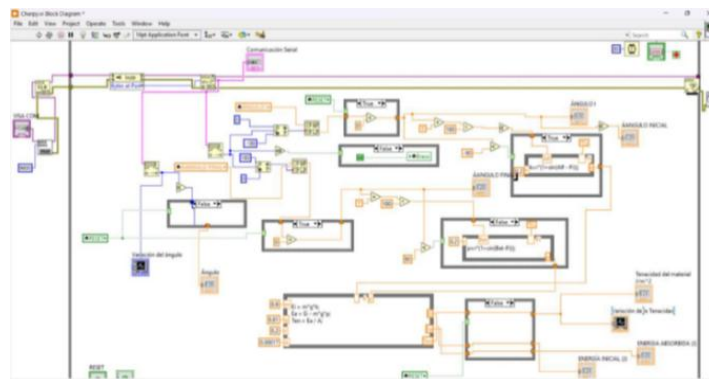


Figura 5. Diagrama de bloques.

Para tener una interfaz que sea atractiva y facilite la comunicación para el usuario, se realizó una personalización en el panel frontal de LabVIEW. Este panel muestra las variables importantes y las herramientas necesarias de reinicio y calibración.

La personalización en el panel frontal, mostrado en la figura 6, facilita la visualización de los resultados en las pruebas realizadas, por lo que los análisis se vuelven más didácticos.



Figura 6. Interfaz de usuario.

4. Diseño.

Bajo las condiciones establecidas por la norma ASTM D6110 – 2, se realizó el diseño y la construcción de los elementos que conforman al péndulo.

Dentro de los elementos principales se encuentran el brazo de impacto, encargado de proporcionar la energía, velocidad y altura sugerida por la norma. La norma sugiere que el brazo tenga una longitud entre 0.325 y 0.406 metros, desde el centro del eje hasta el centro de impacto; el brazo debe proporcionar una energía mínima sugerida de 2.7 ± 0.14 J y la altura de impacto debe de tener un valor de 610 ± 2 mm, para tener una velocidad de impacto aproximado de 3.46 m/s. (ASTM International, 2021)

En base a estas características, se propuso un diseño de brazo con la longitud mínima y un peso de aproximadamente 451.3 g para alcanzar la energía requerida a un ángulo de 60° sobre la horizontal, obteniendo de esta manera un valor aproximado a 608 mm requerido. El resultado obtenido se muestra en la figura 7.

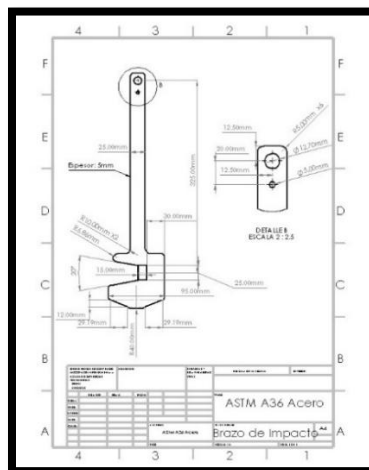


Figura 7. Plano del brazo de impacto.

El eje también es un elemento principal, ya que transmite el movimiento pendular al brazo de impacto. Este elemento debe de ser resistente para poder cargar por si solo al brazo, además, debe tener una perforación para la unión con el sensor encoder y un aditamento que permita unir al eje con el brazo. La propuesta obtenida para estas funciones se muestra en la figura 8.

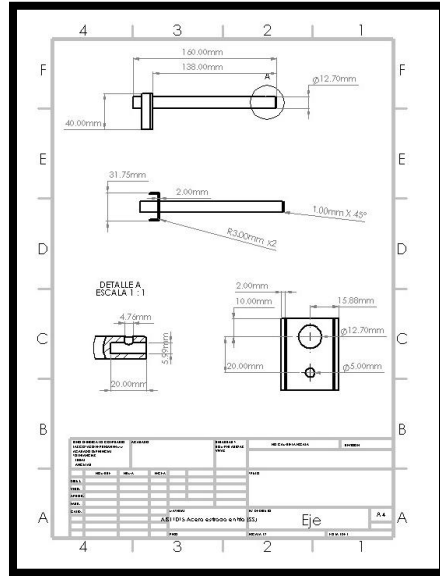


Figura 8. Plano del eje.

La base para los rodamientos (mostrado en la figura 9), es sobre el cual se posa el eje, utilizando rodamientos de $\frac{1}{2}$ in.

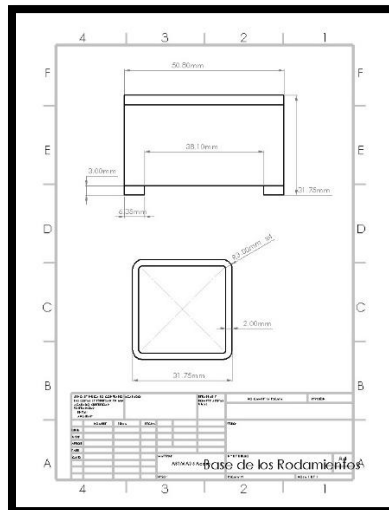


Figura 9. Plano de la base de los rodamientos.

El sujetador de probetas (figura 10) está normalizado por la norma, su anchura de 40 cm es equivalente al largo de la probeta, permitiendo que se posicione con facilidad bajo las características establecidas.

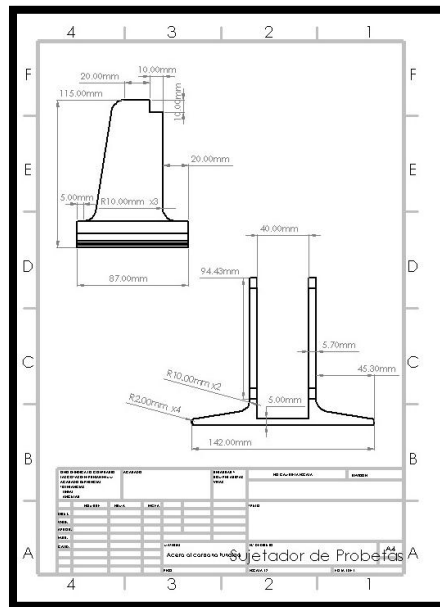


Figura 10. Plano del sujetador de probetas.

Los elementos están colocados sobre una base en forma de C, mostrado en la figura 11, para mantener la firmeza del sistema durante la realización de las pruebas de impacto.

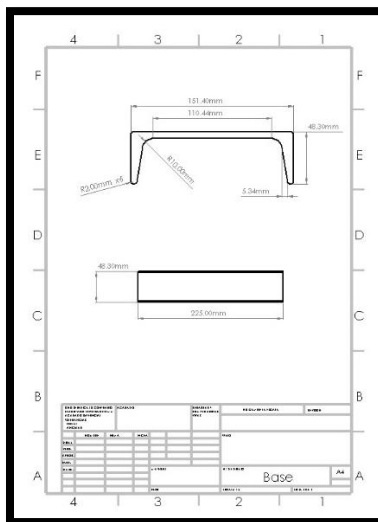


Figura 11. Plano de la base.

Otros elementos adicionales son el soporte principal, sobre el cuál proporciona la altura adecuada del eje respecto al sujetador de probetas, para que el centro de impacto esté adecuadamente sobre la probeta. También se incluyen los ángulos del soporte, que dan mayor rigidez al soporte principal, y el soporte de sujeción, que es sobre el cual se ubica el sistema de liberación. Estos elementos se muestran en la figura 12.

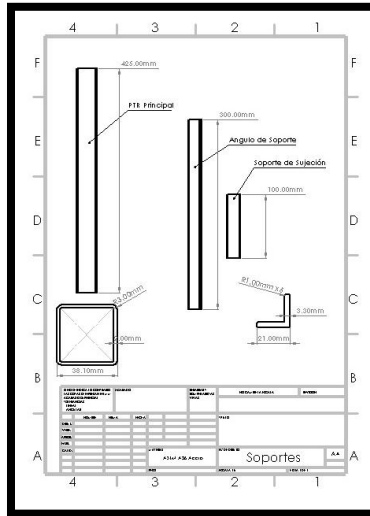


Figura 12. Plano de los soportes.

El ensamble de cada uno de estos elementos se muestra en la figura 13.

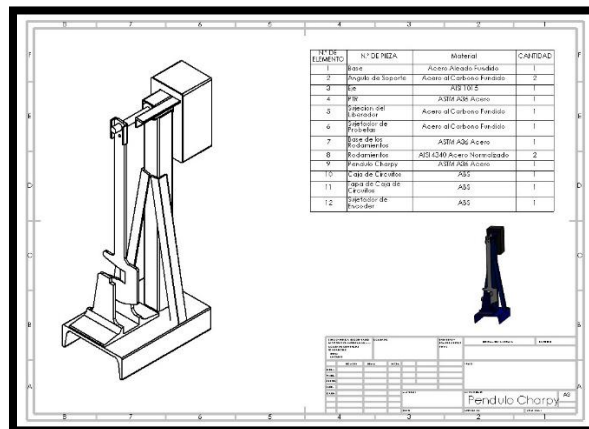


Figura 13. Plano del ensamble.

5. Simulación.

Para determinar si los elementos soportaran las pruebas de impacto realizadas, se realizó una simulación estática empleando el software SolidWorks. (Gómez, 2021).

Los elementos que reciben mayormente las cargas son el eje y el brazo de impacto. La carga máxima transmitida en un péndulo ocurre cuando el brazo toma una posición totalmente vertical, ya que es ahí donde se concentra todo el peso sobre los elementos. Para el brazo, se realizó una simulación aislada del ensamblaje, mientras que se realizó una simulación con el eje, los soportes y la base, para estudiar su comportamiento.

Utilizando la teoría de Von Mises, Los resultados para la tensión en Mpa para la estructura se muestra en la figura 14. Nótese que, a pesar de soportar una pequeña carga (el peso del brazo), existe un valor de tensión considerable.

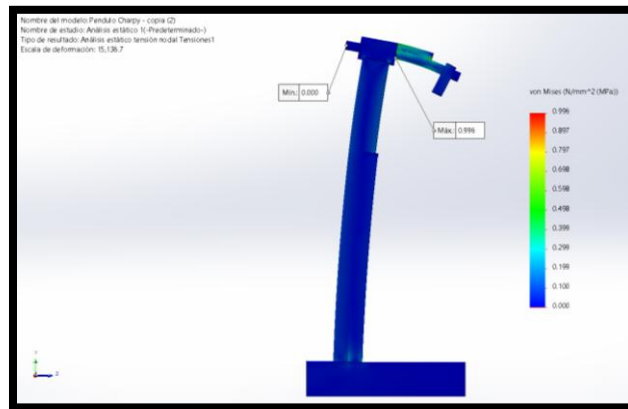


Figura 14. Simulación de tensión del eje y los soportes aplicando Von Mises.

Los desplazamientos ocasionados por la carga se muestran en la figura 15. El mayor valor de desplazamiento se encuentra en el aditamento del eje que une al brazo.

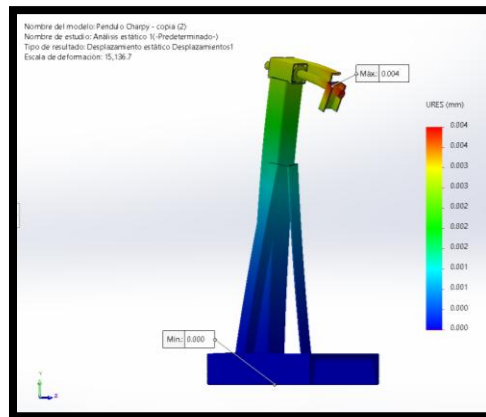


Figura 15. Simulación de desplazamientos del eje y los soportes.

Para validar si estas deformaciones no afectan a estos elementos, se realizó un estudio de simulación de factor de seguridad, aplicando Von Mises Máx (figura 16). El valor del factor de seguridad es, por mucho, superior a dos, por lo que estos elementos soportaran la carga sin ningún problema.

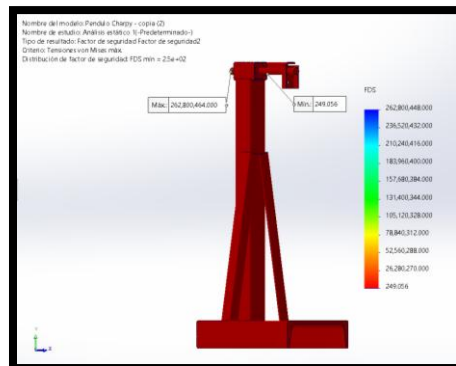


Figura 16. Simulación del factor de seguridad del eje y los soportes aplicando Von Mises Máx.

Bajo las mismas condiciones, se realizó la simulación de tensión del brazo (figura 17). El límite elástico no fue superado, por lo que el brazo soporta las cargas sin ningún esfuerzo.

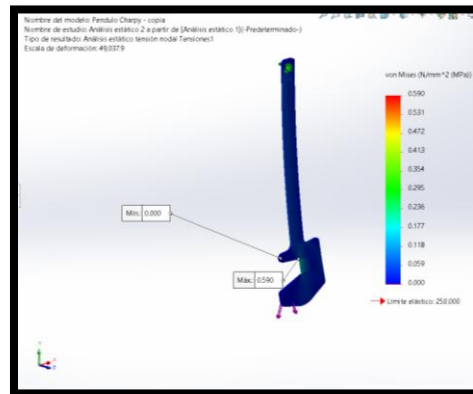


Figura 17. Simulación de tensión del brazo de impacto aplicando Von Mises.

Aplicando una simulación de factor de seguridad con Von Mises Máx (figura 18), se puede confirmar que el brazo soporta las cargas sin ningún esfuerzo, debido a que el valor mínimo de dicho factor es mayor a 2. (Dassault Systemes, 2020).

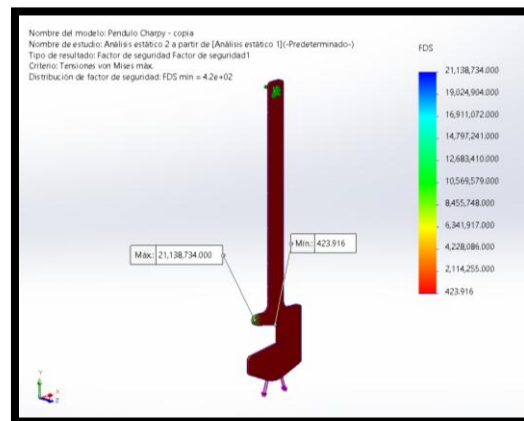


Figura 18. Simulación del factor de seguridad del brazo de impacto aplicando Von Mises Máx.

En estos estudios se utilizó una escala de deformación automática, proporcionado por SolidWorks, para tener una mayor visualización en el comportamiento de la deformación de los elementos, ya que en una escala 1:1 no sería posible observar las deformaciones, ocasionados por cargas muy pequeñas.

Conclusión.

Bajo este estudio, se tiene como conclusión en que todos los elementos soportan este valor de carga y otros valores mayores permitidos por la norma ASTM D6110 – 2. Esto es importante para posibles modificaciones en caso de que el material a probar requiera de un mayor valor energético antes del impacto.

En base a todos estos criterios, el resultado final se muestra en la figura 19. El ensamble de todos los elementos, configurados respectivamente a la función que desempeñan, permite que se logre una correcta función para cada prueba realizada en los elementos.

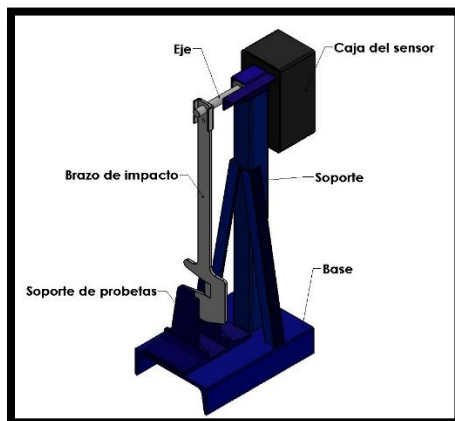


Figura 19. Ensamble del resultado final.

Referencias bibliográficas.

ASTM International,(2021). Standard Test Methods forDetermining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics(ASTM *D6110-2*).<https://store.astm.org/d6110-18.html>

Budynas, R. G. (2011). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. (9na ed.). New York: McGraw-Hill (2011).

Dassault Systemes,(2020). Theoretical manual SolidWorks Simulation.

Gómez G.S. (2021). “SolidWorks”, Ed. Alfaomega México, 12da.

Información de los autores.



Erick de Jesús Jiménez de la Cruz, Estudiante del Noveno de semestre de la carrera de Ingeniería Mecánica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Actualmente está cursando su residencia profesional.



Hernán Valencia Sánchez, Licenciatura en Ingeniería Mecánica, con un Posgrado en Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica Egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Doctorado en Ingeniería Aplica de la Universidad TENAM Reconocimiento al perfil deseable, Jefe de Proyectos de Investigación del Departamento de Metal-Mecánica, Docente del Departamento de Metal-Mecánica del TecNM/Instituto tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.



Roberto Carlos García Gómez, Licenciatura en Ingeniería Mecánica, con tres posgrados: Especialidad en Mecatrónica, Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, Doctorado en Procesos de Manufactura. Egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Jefe de Proyectos de Vinculación del Departamento de Metal-Mecánica, Docente del Departamento de Metal-Mecánica del TecNM/Instituto tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.



Mario Alberto De La Cruz Padilla es Ingeniero Mecánico por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, cuenta con una Maestría en Diseño Mecánico por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, cuenta con Doctorado en Educación y otro en Ingeniería Aplicada.



Juan Carlos Niños Torres es Ingeniero Mecánico egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, cuenta con la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica del Instituto Tecnológico de Celaya, así también con el Doctorado en Ingeniería Aplicada de la Universidad TENAM. Actualmente es Profesor Investigador del Departamento de Metal Mecánica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez y se ha desempeñado como jefe de la División de Estudios Profesionales del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Cuenta con el perfil PRODEP 2022-2025 como miembro del Cuerpo Académico Ingeniería Mecánica en la línea de investigación de Diseño Mecánico. Es miembro del comité de evaluadores del Consejo de Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería (CACEI A.C.) avalado por CIEES desde 2016.



Julio César Llaven Gordillo, Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Maestría en Ciencias de la Educación. Egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Docente del Departamento de Metal-Mecánica del Instituto tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.