

Péndulo de Charpy como herramienta de calibración de SMART-SHIELD

Martín Igartúa

Péndulo de Charpy

Fue ideado por el ingeniero francés Augustin Georges Albert Charpy (1865-1945) que le da su nombre en el año 1905. El experimento está basado en la teoría de la conservación de la energía entre dos puntos y permite determinar la tenacidad de un material cuando se emplean cargas dinámicas[1][2]. Entendiendo por tenacidad a la resistencia que presenta un material al oponerse a ser flexionado o quebrado. El dispositivo construido en este proyecto se puede observar en la figura 1.

Como en toda construcción mecánica, es de esperar pérdida energética por fricción, deformación de los apoyos, vibraciones de componentes, entre otras. Estos efectos se minimizaron con el diseño implementado como se explica en el presente documento. Los ensayos de impacto, se realizan sobre tablas cuadradas de pino con las siguientes medidas estandarizadas: 2.54 cm de espesor y 30 cm de lado. En la figura 2 se pueden observar las mismas.

Como ya se dijo, las tablas trabajan a la flexión en 3 puntos, 2 vínculos estáticos y el impacto incidente en el centro de las mismas. La masa del péndulo se deja caer en forma iterativa a partir de alturas conocidas y crecientes sobre la tabla de madera hasta que esta se quiebra. Es decir, se busca salir de la región elástica hasta que el trabajo realizado por el péndulo sea suficiente para romper la madera. A través de la ley de conservación de energía y conociendo la diferencia entre la altura inicial del péndulo (h) y la final tras el impacto (h') es posible medir la energía absorbida a través de la ecuación 1. En la figura 3 podemos observar el detalle de la implementación del reglado para que las alturas sean constantes para todos los ensayos. A su vez, se encuentra el mecanismo de accionamiento, este se extrae a través de una cuerda para estandarizar la liberación de la masa.

$$E = m.g.(h' - h) \quad (1)$$

Aspectos Principales

Los aspectos principales de una máquina de impacto tipo Charpy, pendular y de un único impacto, son 3:

1. Una masa móvil cuya energía cinética es suficiente para romper la tabla colocada en su trayectoria. Esta masa tiene un movimiento pendular y consiste



Figure 1: Péndulo de Charpy.

de una barra relativamente liviana, pero suficientemente rígida, con una pesa en su extremo. La barra está suspendida de un eje corto que gira en rodamientos y se balancea entre dos soportes verticales. La masa que hace contacto con la tabla es redondeada y alineada de manera que establezca contacto con la tabla sobre un plano vertical.

2. Un soporte sobre el cual se coloca la tabla para recibir el impacto.

3. Un medio para medir la energía residual de la masa móvil después que la madera haya sido rota. La energía cinética es determinada y controlada por la masa del péndulo y la altura de la caída libre, medidas respecto al centro de masa.

Sobre este último punto, se realiza una modificación. En lugar de medir la altura h' para obtener la energía residual, se mide la fuerza con el SS. Es decir, en primera instancia se ensayan todas las maderas del ensamble para hallar un valor modal para el umbral de rotura. Este se corresponde con una altura en la escala reglada del péndulo. Luego se reemplaza la tabla por el SS, se realiza el lanzamiento desde dicho punto para hallar el valor de fuerza buscado. De esta



Figure 2: Madera de pino, antes y después del corte y cepillado.

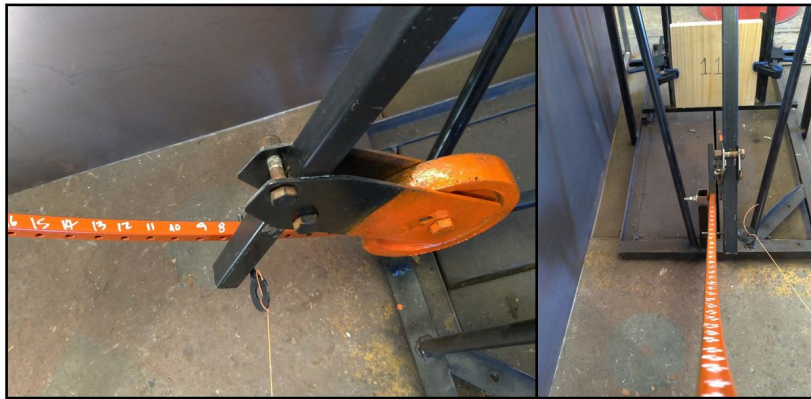


Figure 3: Reglado de alturas y mecanismo de accionamiento.

manera, se minimizan errores ya que las condiciones de ensayo son practicante idénticas. En las figura 4 se observa la configuración para medir tablas, mientras que la figura 5 muestra la disposición con el SS.

Empírica

A continuación, en la primera columna de la tabla de la figura 6 se observa la escala reglada trazada en el péndulo, en la columna siguiente se detalla su correspondiente altura desde el centro de la masa móvil al piso y en la tercer columna se dispone también de la diferencia de altura (Δh) entre la masa móvil en las distintas posiciones y su posición inicial.

Se analizan un total de 13 tablas cortadas y cepilladas a partir de un mismo



Figure 4: Ensayo Charpy con tabla de pino.

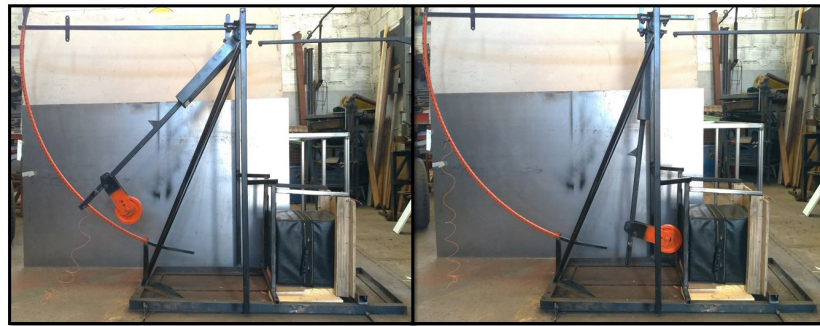


Figure 5: Ensayo Charpy con Smart-Shield.

tablón, el detalle se aprecia en la figura 3. Para el primer ensayo, se coloca una masa móvil de 4.350g, ésta resulta de un peso elevado para el análisis ya que la cantidad de movimiento que desarrolla es desproporcionada para la prueba. En otras palabras, no es posible utilizar todo el rango de la regla del péndulo lo que hubiera restado resolución al instrumento. Por esta razón, se disminuye el peso de la masa a 2.500g y esta se mantiene a lo largo de todos los ensayos. Todas las pruebas son documentadas con 2 cámaras de grabación en simultáneo, ambas de muy alta velocidad (120fps) y resolución FULLHD (1920x1080p). Éstas se ubican en planos de interés para la comprensión de la dinámica de la demostración. La primera de las cámaras registra todo el movimiento del péndulo, desde la liberación de la masa hasta el impacto en la tabla. Mientras que la segunda, es ubicada de tal forma de focalizar el análisis en el comportamiento de la tabla. En la figura 7 se muestra un plano de cada ejemplo y a su vez se invita al lector a observar los vídeos mencionados en el canal de YouTube en el link adjunto en la Bibliografía[3].

Luego de ensayar todas las muestras se plasman los datos en el gráfico de la figura 8. A partir del cual se realizan consideraciones tanto cualitativas respecto a lo observado en las pruebas, como cuantitativas gracias a los datos

Escala Charpy	Altura Absoluta [Cm]	Diferencia de Altura [Cm]
7	33,0	11,5
8	34,0	12,5
9	35,0	13,5
10	36,0	14,5
11	37,0	15,5
12	38,0	16,5
13	39,0	17,5
14	40,0	18,5
15	42,0	20,5
16	43,0	21,5
17	44,0	22,5
18	45,5	24,0
19	46,5	25,0
20	48,0	26,5
21	49,5	28,0
22	51,0	29,5
23	52,5	31,0
24	54,0	32,5
25	55,5	34,0
26	57,0	35,5
27	58,5	37,0
28	60,0	38,5
29	61,5	40,0
30	63,5	42,0
31	65,0	43,5
32	67,0	45,5
33	69,0	47,5
34	71,0	49,5
35	73,0	51,5
36	74,0	52,5
37	76,0	54,5

Figure 6: Escala reglada de Charpy con sus alturas.

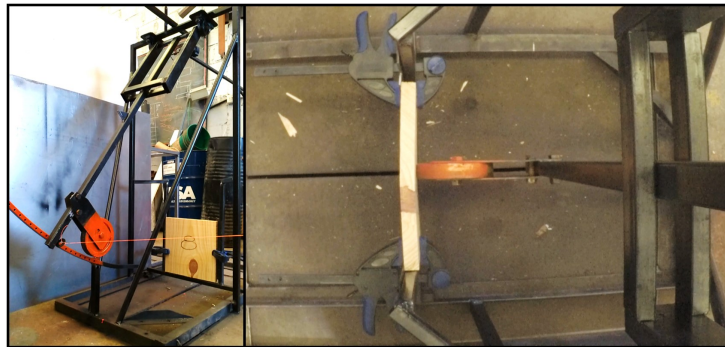


Figure 7: Planos de grabación.

recolectados. Respecto a lo cualitativo, se observó que la presencia de nudos constituyen nodos de tenacidad y que luego de quebrar la madera se conservan. Es decir, el nudo no se quiebra sino que permanece completo en una de las

mitades resultantes de la rotura de la tabla, fenómeno observado en tablas 2, 8 y 10. También, la elección de la veta se debe hacer de tal forma que la herramienta de impacto pueda atravesar el objetivo. Para el caso del péndulo de Charpy siempre fueron paralelas a la barra oscilante mientras que en la práctica de Taekwon-Do existe una orientación de la veta que favorece la rotura de acuerdo a la técnica empleada. A estas dos consideraciones, se adiciona una muy importante, que se explica a través de las muestras 6 y 9, ambas tablas se disponen de acuerdo a las consideraciones anteriores, sin embargo, la tabla 6 se rompe desde la posición 11 de la regla de Charpy, mientras que la tabla 9 se quiebra en la posición 37 de la misma. Analizando en detalle, se observa que en apariencia son similares en la cara de incidencia de los impactos, aunque no ocurre lo mismo desde una vista superior de las mismas. La Tabla 6 presenta una veta convexa respecto a la incidencia del golpe, mientras que la tabla 9 presenta una veta cóncava (lo mismo sucede en la Tabla 11). Esto puede observarse con claridad en la figura 9. Luego, según lo experimentado si las vetas se disponen de forma cóncava a la incidencia del impacto, la tenacidad de la madera incrementa considerablemente. Esta información es una gran contribución para el practicante de roturas de tablas, que junto a las dos consideraciones antes mencionadas, deben ser tenidas en cuenta a la hora de disponer las maderas ya que la orientación de la mismas influye directamente en su tenacidad.

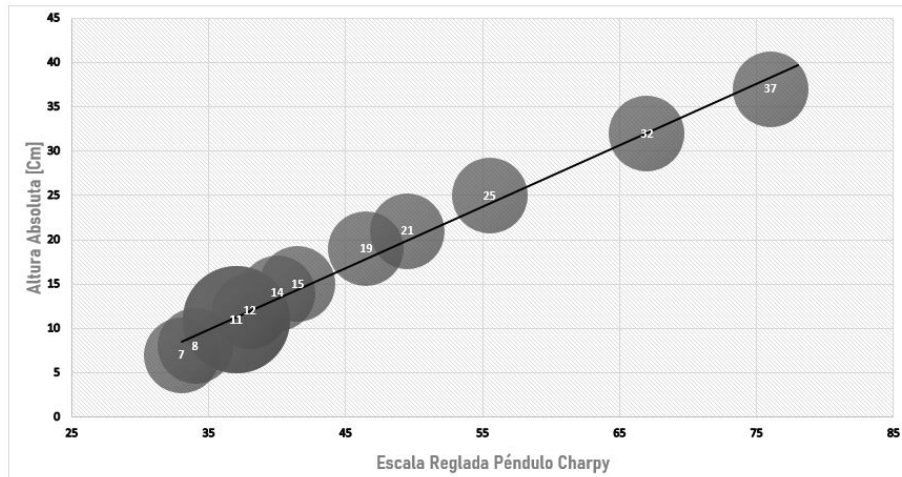


Figure 8: Resultados de los ensayos destructivos.

Analizando la figura 8 se observa que los valores 32 y 37 se corresponden con las tablas 9 y 11 respectivamente. Además, se aprecia un distanciamiento de estas muestras respecto al resto, esto se le atribuye al efecto de la disposición cóncava de la veta al momento de la rotura. Motivo por la cual se adopta como valor modal la esfera 25, y este es el criterio con el cual se fija el umbral de rotura en el código del programa. Esta cota resulta razonable ya que se

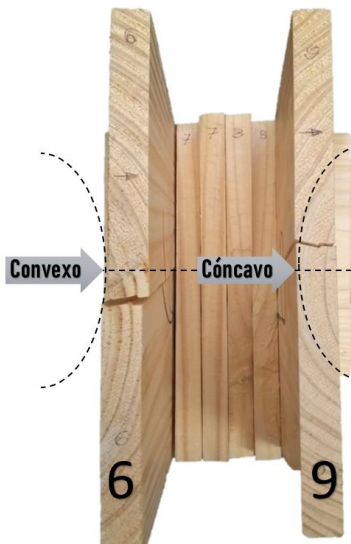


Figure 9: Tablas 6 y 9: Vetas convexas vs cóncavas.

estaría en condiciones de romper el 100% del ensamble asumiendo la correcta disposición de las vetas, o el 83.33% del total de muestras sin esta salvedad.

Llegado este momento se coloca el SS exactamente en el mismo lugar que las tablas realizando una adaptación del soporte como se muestra en la figura 5. Se agrega al experimento un osciloscopio y se mide la señal producida a la salida del circuito acondicionador luego del impacto del péndulo. Este ensayo se realiza de manera iterativa, ajustando la etapa de amplificación. El procedimiento se repite hasta que el impacto indica una tensión máxima del 90% del fondo de escala del conversor analógico digital. De esta manera se asegura un rango dinámico adecuado y se evitan saturaciones sobre la medición.

Para comprobar el comportamiento del diseño desarrollado se analiza con el osciloscopio digital la salida del transductor de fuerza, antes y después del filtro pasa-bajos. En la figura 10 se presentan tres imágenes extraídas del mismo: la primer captura muestra ambas señales mencionadas previamente en la misma gráfica, el segundo caso corresponde a las mismas señales pero separadas entre sí, notando que la señal amarilla corresponde a la salida del filtro. Finalmente, la tercer pantalla se utiliza para medir el tiempo de duración de un golpe de impacto realizado de forma correcta, siendo la duración de 15 mseg aproximadamente, se puede observar que la configuración de tiempo por división del instrumento es de 10 mseg. En la figura 11 se presentan tres imágenes de manera similar al caso anterior, pero esta vez representando un golpe sin concentración temporal. Se aprecia que en este caso la duración del impacto es de alrededor de 500 mseg y no es posible distinguir un máximo definido de la fuerza aplicada. Luego, se puede inferir que se trata de un golpe poco efectivo, ya que la energía no se concentra de manera correcta, es decir no se logra la concentración espacial

y temporal óptima.

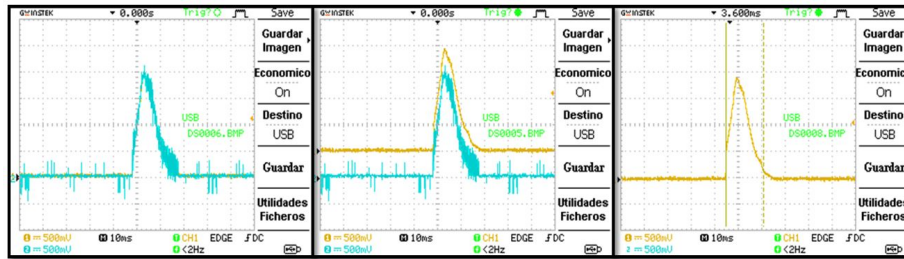


Figure 10: Análisis de impacto en osciloscopio 1.

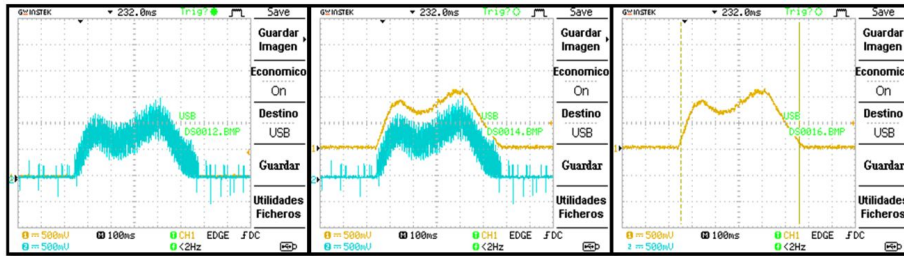


Figure 11: Análisis de impacto en osciloscopio 2.

Péndulo de Charpy:

Construcción

En la base del péndulo se utiliza hierro ángulo de 2.54 cm y 1.25cm de ancho y 5mm de espesor para conformar un rectángulo de 120cm de largo por 60cm de ancho. Para el arco sostenedor del péndulo se utiliza caño estructural cuadrado de 25mm de lado y 1.6mm de espesor, este arco comparte el ancho de la base y se instala a una distancia de 50cm midiendo desde el frente de la maquina. Para aumentar la rigidez y minimizar vibraciones, se utilizo caño estructural redondo de 19mm de diámetro y 1.6mm de espesor para dos columnas diagonales que van desde la base hasta el arco. Para el soporte se utilizó caño estructural cuadrado de 25mm de lado y 1.6mm de espesor, colocado como travesaño por el ancho de la maquina y de que sirve de apoyo vertical de la tabla. También dos columnas verticales con alas en planchuela de hierro de 2cm de ancho y 1.6mm de espesor para apoyo horizontal de la tabla. A su vez, dichas columnas son sujetadas en diagonal al arco sostenedor antes descrito.

La descripción del péndulo, para un mayor detalle, la dividiremos en tres partes:

1. Eje de rotación: para esta parte se utilizaron 2 rodamientos autocentrantes de 19mm de diámetro interior por los cuales rota un eje conformado en hierro macizo de igual diámetro. Este conjunto se adhiere a través de bulones con tuercas autofrenantes a planchuelas de 5cm de ancho y 3 mm de espesor. Estas planchuelas están soldadas al travesaño del arco conformando un vinculo suficientemente robusto. La figura 12 muestra el detalle del rodamiento.
2. Péndulo: esta conformado por caño estructural cuadrado de 25mm de lado y 1.6mm de espesor con tres vínculos al eje a través de soldaduras. Desde arriba hacia abajo disponemos de 3 caños verticales, uno central de 120cm de longitud y dos laterales de 40cm de longitud. Estos dos se unen al central en sus extremos inferiores a través caños horizontales y hacen de refuerzos que impiden rotaciones en la masa incidente. La figura 13 muestra el detalle del mismo.
3. Masa incidente: esta conformada por una pesa de fundición de hierro circular de 3cm de espesor, 20cm de diámetro y un peso de 2.5kg. Esta sujeta



Figure 12: Eje de rotación.



Figure 13: Péndulo.

al péndulo a través de 2 planchuelas de 20cm de largo 10 cm de ancho y 1.6mm de espesor, que posee bulones pasantes con tuercas autofrenantes. La figura 14 muestra la configuración del mismo.

Una vez que se el dispositivo fue finalizado, este fue nivelada en sentido longitudinal y transversal mediante un nivel de gota. En dicha posición de equilibrio, fue soldado al piso para evitar variaciones en las mediciones.



Figure 14: Masa incidente.

Bibliography

- [1] Y. Ortega, Prueba de Impacto: Ensayo Charpy,
https://rmf.smf.mx/pdf/rmfe/52/1/52_1_51.pdf
- [2] Luis Carlos Dominguez, Diseño y Construcción de
Máquina para Prueba de Impacto Tipo Charpy
<https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/2535/T0000828.pdf?sequence=1>
- [3] Rotura de madera con el péndulo de Charpy,
<https://www.youtube.com/watch?v=yaZBKRIxOfw>