



Departamento de
Ingeniería Mecánica
Universidad de Concepción

Influencia de la velocidad de impacto en la fractura primaria del mineral de cobre, mediante la fabricación de un banco de ensayos

Gonzalo Mella Sánchez

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor guía:
Dr.-Ing. Manuel Moncada M.

Abril 2025
Concepción, Chile

©2025 Gonzalo Eduardo Mella Sánchez

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

Agradecimientos

En este apartado quiero agradecer a todas las personas que me han ayudado en mi formación, a algunas que me ayudaron directamente en la memoria y a personas a quienes les tengo aprecio.

Comenzando, quiero agradecer al profesor Manuel Moncada, quien es el profesor guía de este trabajo. Gracias a él conocí el área de elementos discretos en un curso que dicta. A partir de esto nace mi interés en esta área, donde conocí las simulaciones de material particulado. Me apoyó durante todo el trabajo, con muchas reuniones, consejos y enseñanzas. También quiero agradecer al profesor Carlos Medina, quien me ayudó a realizar ensayos de compresión y me otorgó permisos para usar las máquinas del Taller Mecánico, donde encontré más personas que me ayudaron, como Rodrigo Moreno y Mario Ramírez. También recibí ayuda del DIMET, donde me ayudó Edgardo Elorza. Otra persona sin la que no habría podido hacer este trabajo es Carlos Salinas, quien me ayudó a conseguir el mineral de cobre utilizado; le agradezco a él y a su familia. Finalmente, agradezco el respaldo financiero del proyecto Fondecyt de Iniciación, Folio 11251676, el cual fue fundamental para la ejecución de esta investigación.

Mis mejores amigos, que son amistades de más de 10 años, que quiero que continúen, con quienes he compartido diversos momentos: Carlos Muñoz y Nelson Soto, quienes saben que siempre los tengo presentes. A mis amigos de la universidad, Aylin Soto y Vicente Mánquez, con quienes compartí durante toda la pandemia y de los que estoy seguro de que serán grandes profesionales. A Benjamín García, quien me ha ayudado a mejorar en el gimnasio y que es fan del imbunche. A los compañeros Ítalo Cichero y Josefina Jaque, quienes me ayudaron en la creación de las probetas. Y de las personas que más me ayudó directamente y un gran amigo, Emilio López, quien es un gran apostador de la vida y me ha enseñado a tomar las cosas con calma; le agradezco todas las tardes que pasó ayudándome.

No pueden faltar mis casi suegros, Sergio Garcés y Yermette Torres, con quienes he compartido viajes, cafés, charlas, entre otros. Les agradezco cada día que compartimos juntos desde el año 2016 y espero sean muchos años más. Gracias por apoyarme y confiar en que lo lograría. Agregar también un saludo a Remigio Garcés, a quien le tengo mucho aprecio.

Les agradezco a mi familia y en especial, a mi hermana Sandra Mella, su esposo Pedro Ampuero y sus hijos Antonella y Javier. Sé que en su casa tengo un lugar especial, al igual que el cariño que les tengo. Sé que puedo contar con ellos. Gracias por todas las salidas, las risas, los juegos de básquet, las charlas. Los quiero mucho.

A mis padres, Gonzalo Aladino Mella Mansilla y María Inés Sánchez Muñoz, a ellos les debo y agradezco todo. Desde pequeño siempre han sido de admiración para mí, su constancia y dedicación en su trabajo son fundamentales en mi carácter y quien soy hoy en día. Siempre me dijeron que tenía que estudiar, ellos me dieron la oportunidad que no tuvieron. Por eso esta memoria está dedicada a ellos, gracias a ellos soy ingeniero, los amo.

Y finalmente a la persona que me acompaña cada día, a mi pareja a quien amo Camila Yermette Garcés Torres. Difícil expresar todo lo que me ayudas cada día, pero quiero que sepas que me encanta seguir creciendo a tu lado. Estoy seguro de que cumpliremos las metas que nos quedan, pero gracias por ayudarme a cumplir esta de ser ingeniero, sin ti no lo habría logrado.

Resumen

La fractura del mineral de cobre bajo diferentes velocidades de impacto representa un aspecto fundamental en procesos industriales como la conminución, debido a su influencia directa en la eficiencia energética. Esta investigación aborda específicamente la influencia de la velocidad de impacto en la fractura primaria del mineral de cobre.

Para alcanzar este objetivo, se diseñó y fabricó un banco de ensayos tipo Drop Weight Test (DWT) modificado, el cual permitió controlar con precisión la velocidad de diferentes percutores cambiando altura de caída. Se efectuaron cálculos preliminares basados en la teoría de Hertz para contactos elásticos, determinando parámetros críticos como la masa, tamaño de la esfera de acero y altura mínima requerida. El banco se equipó con un sensor PCB Piezotronics modelo 208C05, cuya calibración se verificó mediante ensayos previos con probetas cilíndricas de concreto.

Las muestras de cobre utilizadas fueron probetas de 13 y 7 mm cilíndricas con rigurosidad para asegurar que variables externas no afecten la medición, se descartan aquellas con defectos visibles mediante inspección visual. Los ensayos dinámicos DWT se realizaron a velocidades comprendidas entre 1.066 m/s y 1.456 m/s, complementándose con ensayos de compresión usando una máquina Zwick Roell Z005.

Los resultados obtenidos demostraron una relación inversa entre la velocidad de impacto y la energía específica requerida para producir la fractura primaria en el mineral de cobre. Se observó que, a velocidades menores, la energía necesaria para fracturar el material disminuyó significativamente, lo cual sugiere una mejor capacidad del cobre para redistribuir localmente los esfuerzos a bajas velocidades.

Este estudio aporta una metodología robusta y datos empíricos significativos que avanzan el conocimiento sobre el comportamiento mecánico del cobre bajo cargas dinámicas.

Palabras clave: fractura primaria, mineral de cobre, energía específica de fractura, conminución.

Abstract

The fracture behavior of copper ore under varying impact velocities is a fundamental aspect in industrial processes such as comminution, due to its direct influence on energy efficiency. This research specifically addresses the effect of impact velocity on the primary fracture of copper ore.

To achieve this objective, a modified Drop Weight Test (DWT) bench was designed and constructed, enabling precise control of striker velocity by adjusting the drop height. Preliminary calculations were based on Hertzian contact theory, determining critical parameters such as the mass, size of the steel sphere, and minimum required height. The test bench was equipped with a PCB Piezotronics sensor model 208C05, whose calibration was verified through preliminary tests on cylindrical concrete specimens.

The copper samples used were carefully prepared 7 and 13 mm cylindrical specimens, with strict criteria to eliminate external variables that could affect the measurements. Specimens with visible defects were discarded after visual inspection. DWT dynamic tests were carried out at velocities ranging from 1.066 m/s to 1.456 m/s and were complemented by compression tests using a Zwick Roell Z005 testing machine.

The results showed an inverse relationship between impact velocity and the specific energy required to cause primary fracture in copper ore. At lower velocities, the energy required to fracture the material decreased significantly, suggesting a greater ability of the copper to redistribute local stresses under slower impact conditions.

This study provides a robust methodology and significant empirical data that advance the understanding of copper's mechanical behavior under dynamic loading conditions.

Keywords: primary fracture, copper ore, impact velocity, specific fracture energy, comminution.

Índice

Índice de Tablas	3
Nomenclatura	4
1. Introducción	5
1.1. Contexto	5
1.2. Estado del arte	5
1.3. Condiciones de borde	9
1.4. Objetivos	9
2. Metodología	10
2.1. Cálculos preliminares para el banco de ensayos	11
2.2. Diseño y fabricación del banco DWT	14
2.3. Preparación de muestras	16
2.3.1. Moldes 3D para muestras con concentro	16
2.3.2. Corte previo al uso de broca tipo copa	17
2.3.3. Broca copa	17
2.3.4. Corte final de muestras con esmeril y dremel	17
2.3.5. Muestras descartadas	18
2.3.6. Muestras consideradas válidas	18
2.4. Calibración con ensayos previos y caracterización del tipo de falla	19
2.4.1. Cómo encontrar la energía de fractura a partir de un sensor de fuerza dinámica	19
2.4.2. Ensayos previos tipo DWT	22
2.4.3. Ensayos previos de compresión en Zwick Roell Z005	23
3. Resultados	24
3.1. Ensayo DWT con mineral de cobre	24
3.2. Ensayo de compresión con mineral de cobre	26
3.3. Influencia de la velocidad en la fractura primaria	27
4. Conclusiones	30
Apéndice A. Códigos en Python	33
A.1. Cálculos preliminares	33
A.2. Encontrar el impulso absorbido por la celda PCB C05	35
A.3. Encontrar la energía en ensayos de compresión	38
A.4. Graficar E_{50} vs %P	41
A.5. Graficar E_{50} vs razón de deformación	43
Apéndice B. Todas probetas fabricadas	44
Apéndice C. Planos	46

Índice de Figuras

1.1.	Muestras de cobre planas en un ensayo DWT [1].	6
1.2.	Banco de ensayo utilizado tipo SILC [2].	7
2.1.	Diagrama que se utilizará para realizar el flujo de trabajo.	10
2.2.	Banco de ensayo DWT. (a) Diseño y dimensiones generales del banco de ensayo. (b) Banco de ensayo montado en el laboratorio de vibraciones mecánicas.	14
2.3.	Máquinas del taller mecánico de la Universidad de Concepción. (a) Perforadora vertical. (b) Sierra de cinta bimetálica. (c) Máquina CNC Doosan Lynx 220.	15
2.4.	Piezas para instalación del sensor. (a) PBC Piezotronics modelo 208C05 SN LW54447. (b) Placa superior que recibe el impacto del percutor. (c) Perno de fijación a la placa de acero con hilado 10-32 UNF.	16
2.5.	Parte del mineral de cobre extraído de la región de O'Higgins.	16
2.6.	(a) Molde 3D utilizado para las hacer las probetas de concreto. (b) Partes del molde 3D.	16
2.7.	Mineral de cobre cortado en laminas de 25 mm de espesor.	17
2.8.	Muestras cilíndricas sin cortar. (a) Mineral de cobre. (b) Concreto.	17
2.9.	Preparación final. (a) Molde 3D utilizado para cortas las probetas. (b) Mineral de cobre listo para ensayar.	18
2.10.	Diferentes muestras de mineral de cobre descartadas por falta de material, grietas o porosidad.	18
2.11.	Componentes necesarios para realizar los ensayos DWT.	19
2.12.	Ensayo DWT. (a) Altura inicial del impacto. (b) Después del impacto. (c) Después del impacto, altura real.	21
2.13.	Ensayo DWT. (a) Antes del impacto. (b) Impacto y fractura primaria.	21
2.14.	Ensayos previos DWT. (a) Ensayo con probeta concreto a 10 cm de altura con un percutor de 1 kg. (b) Ensayo N°25 sin probeta de Tabla 2.6. (c) Ensayo con probeta concreto a 10 cm de altura con un percutor de 273 g.	22
2.15.	Máquina de compresión Zwick Roell modelo Z005, que está en el laboratorio de impresiones 3D de la Universidad de Concepción.	23
2.16.	Ensayos previos de compresión de concreto. (a) Probeta N°2c. b) Probeta N°4c. c) Probeta N°6c.	23
3.1.	Muestras ensayadas de mineral de cobre por ensayos tipo DWT y de compresión de 13 mm de diámetro.	24
3.2.	Ensayos DWT para diferentes muestras de mineral de cobre ensayadas a 1.456 m/s con un diámetro de 13 mm. (a) Ensayo 45. (b) Ensayo 49. (c) Ensayo 50. (d) Ensayo 53. (e) Ensayo 57.	25

3.3.	Ensayos DWT para diferentes muestras de mineral de cobre ensayadas a 1.08 m/s con un diámetro de 13 mm. (a) Ensayo 67. (b) Ensayo 69. (c) Ensayo 74. (d) Ensayo 80. (e) Ensayo 85.	25
3.4.	Ensayos de compresión a 8 mm/min con un diámetro de 13 mm. (a) Ensayo 2. (b) Ensayo 5. (c) Ensayo 8. (d) Ensayo 14. (e) Ensayo 17.	26
3.5.	Ensayos de compresión a 0.2 mm/min con un diámetro de 13 mm. (a) Ensayo 24. (b) Ensayo 28. (c) Ensayo 30. (d) Ensayo 32. (e) Ensayo 35.	26
3.6.	Energía de fractura primaria específica del mineral de cobre versus su probabilidad de fractura primaria ensayadas diferentes velocidades de impacto y de compresión. (a) Probetas de 13 mm de diámetro comparado con literatura [27]. (b) Probetas de 7 mm de diámetro.	27
3.7.	Valor de la fractura primaria de mineral de cobre E_{50} para diferentes velocidades a diferentes diámetros.	28
3.8.	Energía E_{50} versus la razón de deformación para los ensayos a diferentes velocidades de impacto y de compresión con probetas de 7 mm y 13 mm de diámetro.	29

Índice de Tablas

2.1.	Datos iniciales para dimensionamiento del banco de ensayos.	11
2.2.	Datos obtenidos para el dimensionamiento del banco de ensayos.	14
2.3.	Combinaciones que se realizarán para los ensayos.	14
2.4.	Lista de materiales usados para el banco de ensayo.	15
2.5.	Algunas probetas utilizadas para ser ensayadas, para revisar todas muestras revisar el anexo B.	18
2.6.	Ensayos realizados para calibrar el sensor de fuerza. Error calculado respecto al impulso teórico de 0.1982 N·s.	20
3.1.	Cantidad de ensayos realizados.	24
B.1.	Características geométricas y masa de probetas ID 1–50.	44
B.2.	Características de las muestras del ID 51 al 101.	45

Nomenclatura

A	Área transversal de la muestra, mm^2
E	Módulo de Young
E^*	Módulo de elasticidad efectiva
E_{50}	Energía específica de fractura, J/kg
E_{Bt}	Energía umbral de fractura, J
E_c	Energía absorbida por la celda, J
E_e	Energía error de medición, J
E_{fract}	Energía de fractura, J
E_m	Energía de fractura primaria, J
E_{sec}	Energía secundaria, J
F	Fuerza normal total, N
F_s	Factor de seguridad
g	Aceleración de gravedad, m/s^2
h	Altura de la probeta, m
h_e	Altura de caída de la esfera, cm
m_b	Masa de la bola de acero, kg
m_{cu}	Masa de la probeta, kg
m_r	Masa muestra cobre, kg
$p(r)$	Presión en la zona de contacto
p_0	Presión máxima en el centro
R^*	Radio de contacto efectivo
R_{cu}	Radio de la probeta de cobre, m
R_e	Radio de la esfera
S	Traslapo
V_{cu}	Volumen de la probeta de cobre, m^3
v	Velocidad del percutor, m/s^3
ν	Coefficiente de Poisson
ρ_{cu}	Densidad del mineral de cobre, kg/m^3
σ	Esfuerzo normal, MPa
$\sigma_{\text{máx}}$	Esfuerzo máximo
CLP	Peso Chileno
DWT	Drop Weight Test
OE	Objetivo específico
PCB	Sensor que mide impulso
PFLC	Piezoelectric Fast Load Cell
SILC	Short Impact Load Cell
SLCA	Streamlined Life Cycle Analysis
UF	Unidad de Fomento
UFLC	Universal Fast Load Cell

1. Introducción

1.1. Contexto

El cobre es un mineral clave a nivel mundial, especialmente para Chile, ya que en 2024 representó el 10.3% del Producto Interno Bruto nacional debido a su importancia en sectores tecnológicos e industriales [3]. Sus propiedades físicas destacadas, como la alta conductividad eléctrica, resistencia mecánica y resistencia a la corrosión lo convierten en un material esencial para cables, tuberías, equipos electrónicos y diversas aplicaciones industriales que sustentan el desarrollo tecnológico y económico [4–8].

En la industria minera, en el proceso de conminución, el entendimiento preciso del comportamiento mecánico del cobre ante cargas dinámicas e impactos es crucial [9–12]. La molienda responsable de fragmentar el mineral para facilitar su transporte y tratamiento posterior consume cantidades significativas de energía y afectan directamente la eficiencia operativa y la seguridad estructural de las faenas mineras [13–15]. A pesar de la extensa investigación existente, persisten vacíos importantes sobre cómo varía específicamente la resistencia a la fractura del cobre en función de la velocidad de impacto en el contexto de generar modelos de fractura para simulaciones en DEM.

Estudios previos, tales como ensayos de impacto tipo Drop Weight Test (DWT) y ensayos Short Impact Load Cell (SILC), han demostrado la importancia de caracterizar la respuesta del material particulado ante diferentes condiciones de impacto [1,2]. Sin embargo, no se han abordado el efecto aislado de la velocidad de impacto sobre muestras cilíndricas de mineral de cobre para implementarlo en modelos DEM de fractura [1].

El presente trabajo tiene como objetivo general analizar la influencia de la velocidad de impacto en la fractura del mineral de cobre, contribuyendo a cerrar esta brecha de conocimiento. Para lograr esto, se diseñará y fabricará un banco de ensayo tipo DWT modificado, permitiendo controlar sistemáticamente la velocidad del percutor y manteniendo la energía de impacto constante cambiando la masa del percutor. Se llevarán a cabo ensayos experimentales para evaluar y caracterizar la respuesta a la fractura del cobre bajo diferentes condiciones de velocidad. Asimismo, se harán ensayos complementarios de compresión para obtener datos adicionales sobre el comportamiento mecánico del material, fortaleciendo la validez y precisión de los resultados obtenidos.

1.2. Estado del arte

El material particulado presenta un comportamiento diferente cuando está en forma como un bloque sólido en comparación con su forma de partícula. Propiedades como el módulo de Young [16] varían notablemente, como se observa en estudios previos [17], disminuyendo desde aproximadamente 110 GPa en forma monolítica hasta cerca de 10 GPa en forma de partícula. Esta es solo una de las diversas propiedades que cambian al estudiar materiales particulados. Hay estudios que se centran en encontrar el comportamiento de la rigidez del material en estado de viruta de cobre y estaño mediante ensayos tradicionales como de compresión donde se usaron pruebas con un diámetro de 3 μm . Con estos ensayos obtuvieron curvas de fuerza-desplazamiento que sirvieron como base para la derivación de tensión-deformación [18], donde se observó que en los micro-pilares una respuesta inicial lineal seguida de un endurecimiento por deformación para una mezcla compuesto de Cu-Sn.

Otro tipo de ensayo que se utiliza en la literatura son los ensayos tipo Charpy el cual

busca la fractura de un material a estudiar. En primer lugar, se prepara una muestra con una cizalladura para que se pueda direccionar la fractura y que otros factores no influyan en los resultados. En [19], se ocupa un ensayo Charpy V-Notch donde se encuentra una curva de carga-desplazamiento a una temperatura ambiente con la cual se encuentra la energía absorbida del material que es el área bajo la curva. Luego, realizaron simulaciones en ABAQUS lo que les permitió comparar los resultados experimentales con los valores obtenidos numéricamente, validando así los parámetros del modelo de fractura y evaluando el comportamiento del material bajo impacto. En los resultados se encontraron que la energía absorbida y la carga máxima disminuyen a medida que la temperatura baja. Además, los resultados de la simulación reprodujeron correctamente la curva de carga-desplazamiento del ensayo Charpy a diferentes temperaturas. Y también que la velocidad de deformación tiene un mayor impacto en la fractura que el calentamiento adiabático, lo que confirma que el material se vuelve más frágil a alta velocidad de impacto.

El DWT es una prueba donde se cae un peso desde una altura determinada sobre una muestra de material para evaluar su resistencia a la fractura en condiciones de impacto. Se usa frecuentemente para estudiar la transición dúctil-frágil en materiales. En el estudio realizado por [1], se utilizó un DWT para evaluar la energía mínima necesaria para fracturar partículas individuales de mineral de cobre provenientes del complejo minero de Sarcheshmeh. Para ello, se prepararon muestras de distintos tamaños entre 15 mm y 120 mm, que las describían como planas, es decir, que se preparaba el material para que el impacto de la bola cayera sobre una cara de la muestra plana tal como se puede en la Figura 1.1. Estas se sometieron a impactos controlados mediante la caída libre de una bola de acero desde alturas específicas. Encontraron que existe una energía umbral de fractura (E_{Bt}) que depende inversamente de la masa de la partícula, ajustándose a la relación $E_{Bt} = 6,26 m_r^{-0,7}$, donde m_r es la masa de la muestra de cobre. Además, se estudió la distribución de tamaños de los fragmentos y se observó que el porcentaje de generación de finos (t_{10}) depende no solo de la energía específica de impacto, sino también del momento lineal de la bola, por esta razón en este estudio se mantiene como una constante la energía de impacto de la bola, para analizar solamente la implicancia de la velocidad o momento lineal de la bola.



Figura 1.1 Muestras de cobre planas en un ensayo DWT [1].

El ensayo SILC que se utiliza para analizar las propiedades del material y su fractura en una carga progresiva, en el cual se deja caer una masa guiada hacia el material a estudiar. SILC se puede utilizar para analizar una variedad de tamaños y formas de muestras [2]. En el estudio [2] se busca determinar la resistencia a la tracción, rigidez y energía de fractura específica del carbón sub-bituminoso y la lutita. Se usaron muestras cilíndricas de diferentes tamaños de diámetros entre 3 a 15 mm. En los resultados encontraron que las muestras cilíndricas presentan una mayor uniformidad en los datos que las irregulares, lo que resulta en que la fractura depende de la forma. Las partículas abruptas prestaron una irregularidad más abrupta y los fragmentos se dispersaron más que las muestras cilíndricas. También, se encontró una relación inversa entre la resistencia a la tracción y el tamaño de la muestra, siguiendo tendencias reportadas en la literatura para rocas y carbones. Otro dato de interés es que el carbón con bandas requería 44 % menos energía para fracturarse cuando la carga de impacto estaba alineada con la dirección de las bandas. Finalmente, con respecto a la velocidad de impacto, el aumento de esta redujo la rigidez aparente de las muestras, pero no afectó la resistencia a la tracción ni la energía de fractura específica. Se presenta la Figura 1.2, que es el banco de ensayo que se usó en el estudio mencionado.

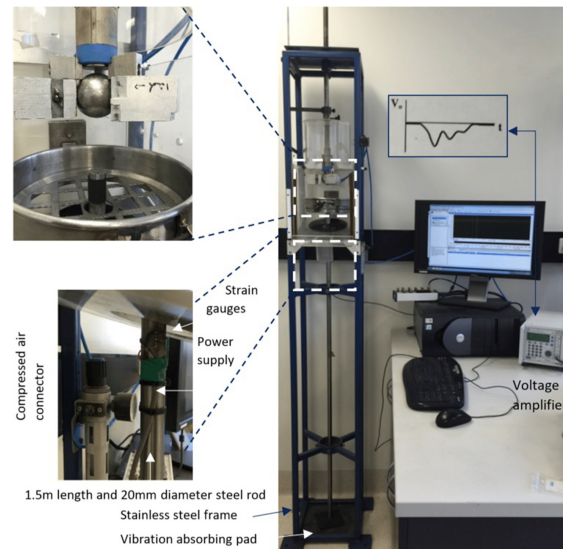


Figura 1.2 Banco de ensayo utilizado tipo SILC [2].

En el estudio de [20], se investigaron las propiedades de ruptura primaria, como la resistencia a la tracción, rigidez y energía de fractura específica, de partículas de rocas ígneas alteradas, utilizando el dispositivo SILC. Este estudio se centró en varias rocas de un depósito de cobre y en un basalto no alterado, con el fin de analizar cómo estas propiedades cambian con el tamaño de partícula en una escala relevante para la conminución. Se encontró que la resistencia a la tracción no dependía del tamaño de las partículas dentro del rango de 3 a 30 mm, mientras que la rigidez y la energía de fractura mostraron una dependencia del tamaño, siguiendo la teoría de Weibull sobre la fractura quebradiza. Además, los resultados mostraron una variabilidad considerable en las propiedades de ruptura dentro de las poblaciones de partículas, que dependía de la alteración mineralógica de las rocas. Sin embargo, [20] comentan que sigue siendo relevante el estudio del material de diferentes tamaños porque estudios de los que se basaron [21] no encontraron una tendencia del mineral de cobre que es la única muestra que tiene una rigidez creciente a medida que aumenta el tamaño de las partículas. También mencionan que sería útil entender si esta tendencia es común para más de un mineral en un depósito de cobre, o si es solo un caso único del estudio.

Uno de los desafíos persistentes en la caracterización mecánica de partículas minerales es la medición precisa de la energía específica de fractura en ensayos de impacto. Tradicionalmente, este objetivo ha sido evaluado mediante un dispositivo conocido como Universal Fast Load Cell (UFLC), el cual emplea barras largas de acero tipo Hopkinson para registrar la curva fuerza-tiempo con alta resolución temporal (hasta 0.1 μs). Esta configuración permite capturar los fenómenos dinámicos involucrados en la fractura de partículas y facilita la implementación de modelos de contacto sin amortiguamiento basados en la teoría de Hertz. No obstante, el UFLC presenta limitaciones prácticas, como su alto costo, complejidad estructural y necesidad de un entorno controlado para asegurar el alineamiento vertical del sistema.

En respuesta a estas limitaciones, [22] desarrollaron un nuevo dispositivo denominado Piezoelectric Fast Load Cell (PFLC), que busca ser una alternativa más económica, compacta y que sea más replicable para evaluar la energía de fractura de partículas individuales. El PFLC consiste en una celda de carga piezoeléctrica de alta frecuencia, un sistema de guía vertical y una cabeza de impacto hemisférica de acero de 150 g. Esta cabeza fue elegida por su capacidad de inducir fractura por compresión y por minimizar la pérdida de velocidad durante la caída. La configuración del sensor permite registrar curvas fuerza-tiempo con una resolución temporal de 1 μs , suficiente para capturar eventos de fractura primaria en partículas de tamaños reducidos. Para interpretar los datos que se obtienen con el PFLC, ellos proponen un modelo de colisión denominado short-rod model, que adapta el modelo clásico de impacto entre esfera y barra larga mediante la integración de un coeficiente C_1 . Este parámetro permite representar el grado de desplazamiento de la cara del yunque durante el impacto, interpolando entre el modelo plano donde $C_1 = 0$ y el modelo de barra larga $C_1 = 1$. Luego, realizaron simulaciones iterativas basados en la teoría de Hertz, donde analizaron diferentes configuraciones del modelo con y sin amortiguamiento. Para encontrar el amortiguamiento utilizaron la fórmula de Hunt-Crossley, que incorpora una fuerza viscosa que depende de la velocidad de compresión.

También describieron el proceso de calibración que se llevó en dos fases. La primera consistió en el uso en hacer ingeniería inversa para encontrar el módulo de Young usando esferas de vidrio con geometría regular, donde compararon los resultados con los valores dados por el fabricante. La segunda fase consistía en comparar la probabilidad de fractura obtenidas mediante ensayos de caída libre y las mediciones con el PFLC, para lo que seleccionaron una configuración de parámetros que minimizaba el error residual. Con este análisis llegaron a que la combinación óptima corresponde a un coeficiente piezoeléctrico de 295 N/V y un valor de $C_1 = 0,350$, por lo que no usaron amortiguamiento, ya que el modelo amortiguado tiende a subestimar la energía obtenida experimentalmente.

Dentro de los resultados que obtuvieron validan la capacidad del PFLC en comparación con estudios previos. Se observó una correlación positiva entre la energía de fractura y la dureza del mineral, siendo el cuarzo uno de los materiales más resistentes. Además, dentro de sus conclusiones afirman que, al aumentar la velocidad del impacto, la energía necesaria para romper las partículas también aumenta, lo cual es consistente con lo que dice la teoría sobre fractura en condiciones dinámicas. Por otra parte, vieron que las partículas más pequeñas necesitan más energía por unidad de masa para romperse, lo que coincide con lo que plantea la teoría de Griffith sobre fractura. Finalmente, comentan que, aunque PFLC presenta limitaciones, como menor resolución temporal y oscilaciones indeseadas en la señal piezoeléctrica, su diseño permite identificar la fractura primaria sin necesidad de aplicar filtros que distorsionen los datos. Esto, junto con su facilidad de implementación y bajo costo relativo, lo convierte en una herramienta prometedora para laboratorios de procesamiento de

minerales que requieren ensayos de fractura energética en partículas irregulares o de pequeña escala.

En [23] se analizaron cuarenta y seis minas, incluyendo algunas de cobre en Chile. El eje central del estudio fue la conminución, que es un proceso fundamental dentro de la minera que básicamente permite reducir el tamaño de las rocas para su transporte y postratamiento. El proceso de rotura de rocas consume una cantidad considerable de energía, de hecho [24] comentan que representa entre el 35 % y el 50 % de los costos operacionales de una mina. También, [25] dice que la conminución puede consumir aproximadamente el 0,2 % del consumo eléctrico mundial y hasta el 1,3 % en países con alta producción de cobre y oro, como Australia. Lo cual equivale al consumo de una ciudad de 2 millones de habitantes durante 16 años. La eficiencia energética en la conminución está influenciada por factores como el tipo de mineral, el tamaño de molienda, su forma y la cantidad de concentración del metal valioso dentro de la roca extraída. En este contexto, el desarrollo de bancos de ensayos que permitan caracterizar la resistencia a la fractura del mineral y su respuesta a impactos controlados, como el SILC, puede contribuir significativamente a la mejora de la eficiencia energética en la reducción de tamaño del mineral de cobre.

Por otra parte, el proceso de conminución demanda una cantidad significativa de electricidad y combustibles fósiles, generando emisiones de CO₂ y residuos sólidos. Para evaluar este impacto, [26] implementan el Análisis de Ciclo de Vida, aunque su aplicación completa puede ser compleja y larga. Como alternativa, se ha propuesto el Streamlined Life Cycle Analysis (SLCA), un método más ágil que permite evaluar la sostenibilidad en la etapa de pre-manufactura (minería), considerando energía, materiales y residuos. El estudio indica que la eficiencia energética varía según el tipo de mina, destinándose el 80-90 % del consumo a la molienda. Además, estrategias como la pre-concentración del mineral y la integración de energías renovables en faenas mineras han reducido significativamente la huella de carbono, como en el caso de la instalación de turbinas eólicas en minas remotas, logrando reducciones de hasta 52 % en las emisiones de CO₂. Se destaca la importancia de implementar soluciones innovadoras para optimizar la conminución y minimizar su impacto ambiental.

1.3. Condiciones de borde

Para este trabajo de investigación se tendrán las siguientes condiciones de borde:

- Se diseñará un banco de ensayo DWT modificado, que además de ser portable, permitirá ajustar diferentes alturas para modificar la velocidad de caída de la bola de acero.
- Se utilizarán diferentes velocidades de la bola de acero en el rango de 1 a 1.5 m/s.
- Se utilizarán probetas cilíndricas con diámetro de 7 a 13 mm, las cuales serán fabricadas en el Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Concepción.

1.4. Objetivos

El objetivo general es analizar la influencia de la velocidad de impacto en la fractura del mineral de cobre. Los objetivos específicos (OE) son:

- (i) Diseñar y fabricar un banco de ensayo DWT modificado.
- (ii) Caracterizar la influencia de la velocidad de impacto en la resistencia del mineral de cobre en ensayos tipo DWT y de compresión.

2. Metodología

Para el dimensionamiento del banco de ensayo tipo DWT se realizarán cálculos preliminares mostrados en el apartado 2.1, también se pueden ver los cálculos realizados en el Apéndice A.1, desarrollados en Python. En cuanto al diseño del banco de ensayo se utiliza el software Autodesk Inventor 2025 y la fabricación de algunas piezas se desarrollará en el Laboratorio de Procesos Mecánicos. También se imprimirán piezas en el Laboratorio de impresión 3D en la Universidad de Concepción. Luego, se ensamblarán las piezas en el Laboratorio de Vibraciones Mecánicas donde se ancla a una bancada para hacer los ensayos. Para realizar la medición se utilizará un sensor de la PCB Piezotronics modelo 208C05 SN LW54447 el cual es montado al banco de ensayo con pernos hechos a medida 10-32 UNF según los requerimientos del fabricante, los planos del banco de ensayo junto a sus piezas se encuentran en el Apéndice C. Este sensor será conectado al dispositivo de adquisición de datos PXI-1002 de la empresa National Instruments. Se ensayará con percutores de diferentes masas para que la partícula cilíndrica de interés se fracture, de esta forma al cambiar la altura se obtendrá una diferente velocidad de impacto, con lo que se conseguirá que las muestras ensayadas tengan una misma energía de impacto a diferentes velocidades. Cabe señalar que el diseño propuesto es original y, aunque no existen referencias directas sobre costos de otros bancos de ensayo similares, se puede observar que este diseño ocupa menos materiales y permite ajustar con facilidad la altura desde la que cae la bola. Esto posibilitará evaluar con precisión la influencia de la velocidad de impacto en la fractura del mineral de cobre. A continuación, se presenta un esquema en la Figura 2.1 que permite visualizar los pasos que se realizarán en este estudio.

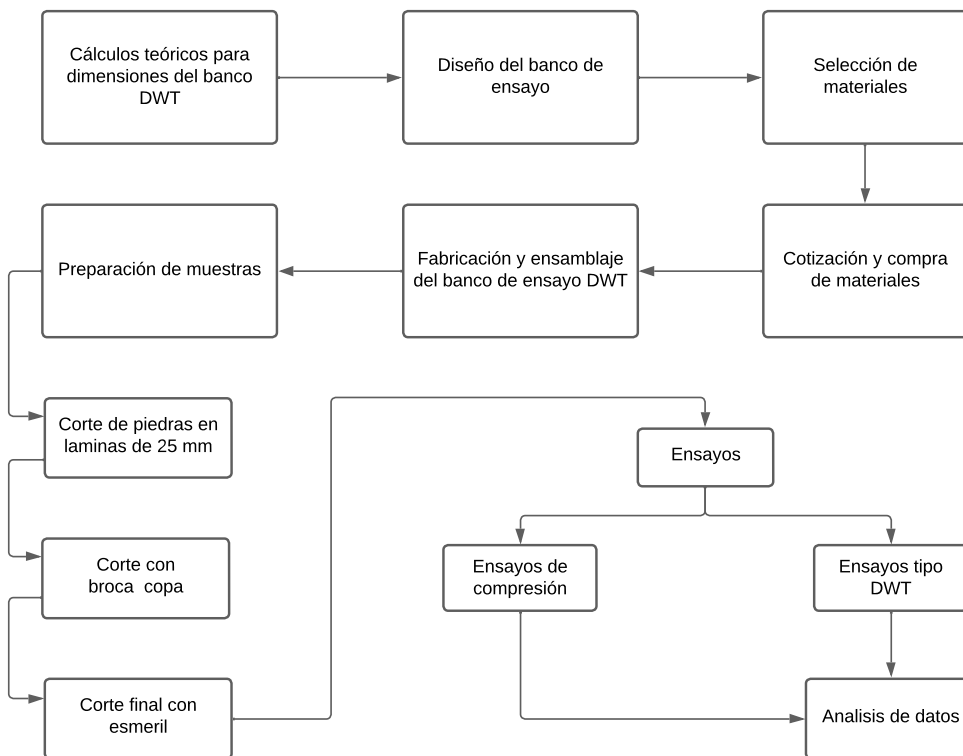


Figura 2.1 Diagrama que se utilizará para realizar el flujo de trabajo.

2.1. Cálculos preliminares para el banco de ensayos

En este apartado se abordarán los cálculos matemáticos para el desarrollo del proyecto, comenzando por el cálculo preliminar para el dimensionamiento del banco de ensayo, donde se busca determinar la altura que debe poseer, la masa de la bola de acero y la mínima energía necesaria para su fractura, entre otros parámetros importantes para el correcto diseño del banco mediante la teoría Hertz para contactos elásticos.

Para dimensionar la masa y energía mínima requerida de la bola de acero se considerará el tamaño más grande de probeta a fracturar. En la Tabla 2.1 se presentan datos iniciales, donde se tiene como objetivo que el percutor alcance los 1.5 m/s como velocidad máxima.

Tabla 2.1 Datos iniciales para dimensionamiento del banco de ensayos.

Propiedad	Valor
Diámetro máximo de probeta, [mm]	12
Densidad mineral de cobre, [g/cm ³]	2.65
Módulo de Young mineral de cobre, [GPa]	10
Módulo de Young acero, [GPa]	210
Coefficiente de Poisson cobre, v_{cu}	0.3
Coefficiente de Poisson acero, v_a	0.3
Velocidad máxima percutor, [m/s]	1.5
Energía de específica de fractura, [J/kg]	150

Como las probetas a ensayar serán cilíndricas ya que es la metodología que se ocupa en la literatura y que son más fáciles de fabricar se comienza calculando su volumen mediante la Ecuación 1.

$$V_{cu} = \pi R_{cu}^2 h \quad (1)$$

Donde V_{cu} es el volumen de la probeta de cobre, R_{cu} es el radio y h es la altura de la probeta, respectivamente. Con este valor y su densidad se puede encontrar la masa de probeta mediante la Ecuación 2.

$$m_{cu} = V_{cu} \cdot \rho_{cu} \quad (2)$$

Se tiene que ρ_{cu} es la densidad del mineral de cobre, y m_{cu} es la masa de probeta que es aproximadamente 7 gramos. Con esto se puede encontrar la energía de fractura E_{fract} , que se puede obtener con la Ecuación 3.

$$E_{fract} = E_{50} \cdot m_{cu} \cdot F_s \quad (3)$$

E_{50} es la energía específica de fractura, que se refiere a la cantidad de energía necesaria para fracturar un objeto, este valor se extrajo de [27], F_s es un factor de seguridad que se considera 1.5 para este trabajo. Por otra parte, se puede obtener la energía del impacto, que vendría siendo la energía cinética de la esfera de acero E_I , que se encuentra con la Ecuación 4.

$$E_I = \frac{1}{2} m_e v^2 \quad (4)$$

Siendo m_b la masa de la bola de acero y v la velocidad que alcanzará la bola de acero al momento del impacto. La altura de caída de la esfera h_e , se pudo encontrar desde un principio, ya que no depende de su masa, y conociendo la velocidad final deseada, se puede calcular la Ecuación 5.

$$h_e = \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

Con g siendo la aceleración de la gravedad se encuentra una altura de h_e de 11.5 cm. Continuando con la teoría de Hertz cuando dos cuerpos elásticos entran en contacto, la zona de interacción se extiende sobre un área aproximadamente circular. Hertz la describe cómo se distribuye la presión en dicha zona, lo que permite deducir el tamaño de la zona de contacto. En este caso, el radio a de la zona de contacto se obtiene mediante la siguiente derivación, donde se asume que la presión $p(r)$ en la zona de contacto, que es circular y de radio a , se distribuye de forma parabólica Ecuación 6. Se tiene que p_0 es la presión máxima en el centro de la zona ($r = 0$).

$$p(r) = p_0 \sqrt{1 - \frac{r^2}{a^2}} \quad (6)$$

Por otra parte, la fuerza normal total F se obtiene integrando la presión sobre toda el área de contacto Ecuación 7.

$$F_n = \int_A p(r) dA \quad (7)$$

Utilizando coordenadas polares, se tiene que $dA = 2\pi r dr$, por lo que queda la Ecuación 8.

$$F_n = 2\pi \int_0^a p_0 \sqrt{1 - \frac{r^2}{a^2}} r dr \quad (8)$$

La teoría de Hertz establece también una relación entre la deformación (traslapo) S y el radio de contacto a como se puede ver en la Ecuación 9.

$$S = \frac{a^2}{R^*} \quad (9)$$

Donde R^* es el radio de contacto efectivo que es como se representa cómo dos cuerpos con distinta curvatura interactúan en el punto de contacto, tal como se puede apreciar en la Ecuación 10, R_e es el radio de la esfera.

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_e} + \frac{1}{R_{cu}} \quad (10)$$

Además, se demuestra que la presión máxima en el centro del contacto se puede escribir como la Ecuación 11.

$$p_0 = \frac{2E^*}{\pi} \sqrt{\frac{S}{R^*}} \quad (11)$$

En la Ecuación 11 aparece el módulo de elasticidad efectiva E^* que es una forma para combinar propiedades elásticas de los materiales que interactúan y permite tratarlos como si fuera un solo elemento. Para calcular E^* se utiliza la Ecuación 12 donde ν_{cu} y ν_a son los coeficientes de Poisson, E_{cu} y E_a son los módulos de Young del cobre y el acero respectivamente, estos datos se presentan en la Tabla 2.1.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_{cu}^2}{E_{cu}} + \frac{1 - \nu_a^2}{E_a} \quad (12)$$

Sustituyendo la expresión de p_0 en la Ecuación 8, y simplificando queda la Ecuación 13.

$$a = \left(\frac{3F_n R^*}{4 E^*} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

El esfuerzo máximo en el área de contacto se asume igual a la presión máxima p_0 alcanzada en el centro de la zona de contacto. Por ello, se define el esfuerzo máximo $\sigma_{\text{máx}}$ como la Ecuación 14. Esta expresión se obtiene al integrar la presión hertziana $p(r)$ sobre el área de contacto circular, y evaluar la presión máxima en el centro del contacto. De este modo, se relaciona directamente la fuerza normal aplicada con el esfuerzo máximo en el punto de contacto.

$$\sigma_{\text{máx}} = p_0 = \frac{3F_n}{2\pi a^2} \quad (14)$$

Esta relación muestra que, para una fuerza F determinada, el esfuerzo máximo es inversamente proporcional al área de la zona de contacto, que depende de a^2 . Es decir, a mayor radio de contacto a , la presión máxima (y por ende la tensión) disminuye; mientras que un contacto más reducido (menor a) produce tensiones más elevadas. Finalmente se tienen dos criterios para saber si se produce la fractura, una local y una total, las cuales se resumen en las ecuaciones (15) y (16).

$$\sigma_{\text{máx}} \geq \sigma_{\text{ult,Cu}} \quad (15)$$

$$E_I \geq E_{\text{fract}} \quad (16)$$

A continuación, se presenta la Tabla 2.2, que resume los datos más relevantes para la fabricación del banco de ensayo. Es importante mencionar que se utilizará más de una esfera de acero con el fin de mantener la misma energía de impacto, esto tiene en consideración tanto este objetivo como la disponibilidad del mercado respecto al tiempo acotado de este trabajo.

Tabla 2.2 Datos obtenidos para el dimensionamiento del banco de ensayos.

Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
Diámetro de la bola de acero 1, [mm]	76.0	Masa de la probeta de cobre, [g]	7.49
Diámetro de la bola de acero 2, [mm]	78.1	Energía de impacto objetivo, [J]	1.69
Diámetro de la bola de acero 3, [mm]	83.5	Esfuerzo máximo, [MPa]	3284.9
Diámetro de la bola de acero 4, [mm]	90.0	Altura mínima requerida, [cm]	11.7

2.2. Diseño y fabricación del banco DWT

Para la fabricación del banco de ensayo se tiene en consideración que el percutor debe cambiar de altura para lograr el objetivo principal de este trabajo que es conocer la influencia la velocidad en la energía de fractura primaria. Se opta por crear un banco de ensayo con las dimensiones mostradas en la Figura 2.2.

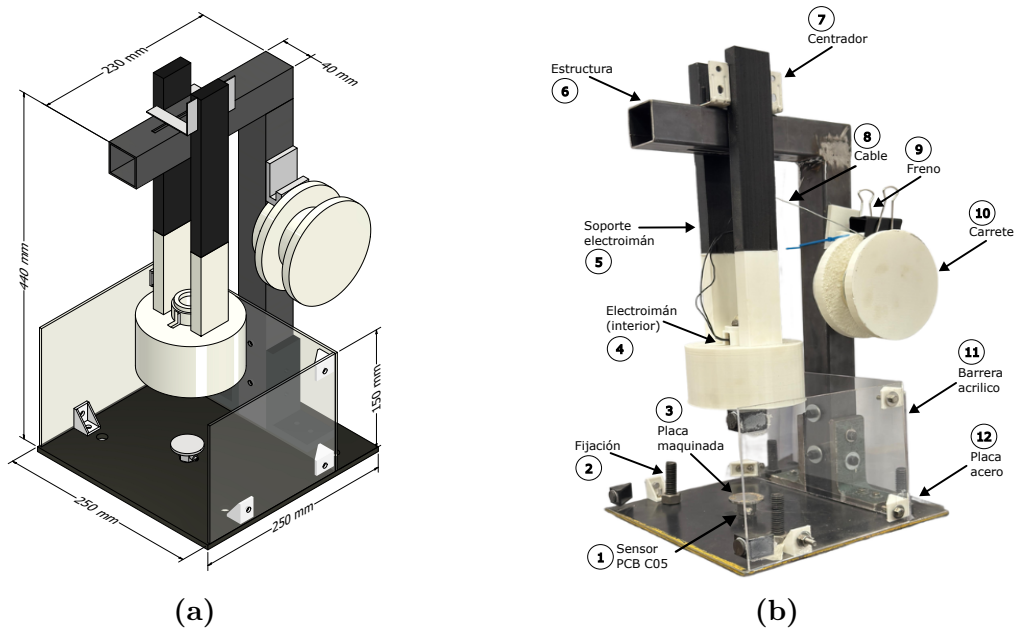


Figura 2.2 Banco de ensayo DWT. (a) Diseño y dimensiones generales del banco de ensayo. (b) Banco de ensayo montado en el laboratorio de vibraciones mecánicas.

En función de la velocidad máxima que alcanzará el percutor que será de 1.456 m/s, se necesita una altura de 10.8 cm tal como se muestra en la Tabla 2.3. Con el fin de tener un espacio cómodo de trabajo y considerando otras alturas que se suman como la del sensor, la placa o la misma muestra a ensayar se opta por dejar una altura de 40 cm para la columna vertical.

Tabla 2.3 Combinaciones que se realizarán para los ensayos.

Tipo ensayo	Velocidad	Diámetro bola [mm]	Masa bola [kg]	Energía de impacto [J]	Altura caída [cm]
DWT	1.456 m/s	77	1.588	1.75	10.8
	1.066 m/s	90	3.050	1.75	5.8
Compresión	8 mm/min	-	-	-	-
	0.2 mm/min	-	-	-	-

Para construir el banco de ensayos se necesitó de los materiales que se encuentran listados la Tabla 2.4. Para ello se cortó, soldó, unió y perforó, donde se ocuparon las máquinas del Taller Mecánico de la Universidad de Concepción mostrado en la Figura 2.3. Por lo que se puede estimar un coste de fabricación de \$1.200.000 CLP, que considera los materiales y horas de trabajo, donde cada percutor ronda los \$90.000, el acero \$50.000, PCB c05 aproximadamente \$700.000 y lo demás en los otros materiales.

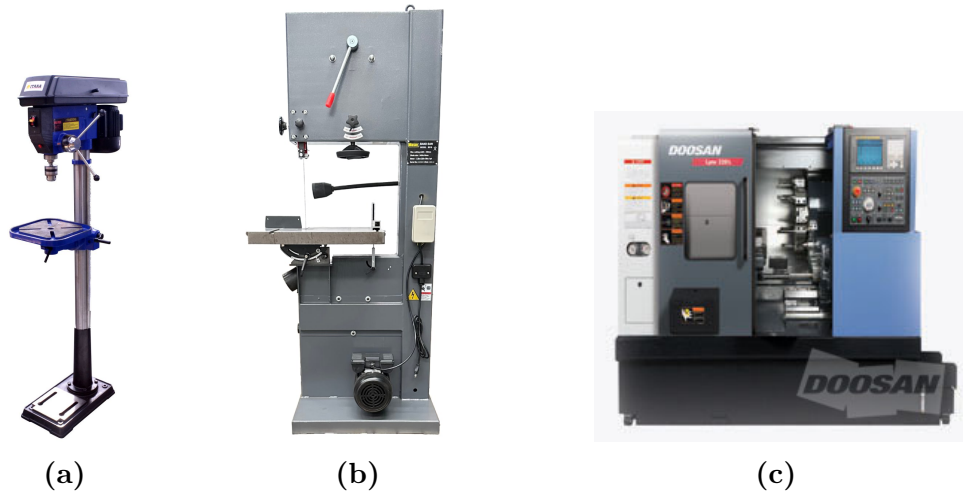


Figura 2.3 Máquinas del taller mecánico de la Universidad de Concepción. (a) Perforadora vertical. (b) Sierra de cinta bimetálica. (c) Máquina CNC Doosan Lynx 220.

Tabla 2.4 Lista de materiales usados para el banco de ensayo.

Material	Cant.	Material	Cant.
Columna de acero, 40x40x400 [mm]	1	Imanes para tapa de acrílico, 10 [mm]	4
Travesaño de acero, 40x40x230 [mm]	1	Pernos para columna acero, 80x6 [mm]	2
Pernos con base soldada, 12x30 [mm]	4	Arandelas y tuercas, 6x60 [mm]	4
Tuercas para pernos base, 12 [mm]	4	Cable para el electroimán, 1900 [mm]	1
Placa de acero, 250x250x6 [mm]	1	Perno sistema enrollar cable, 60x2 [mm]	2
Acrílicos laterales, 183x150x3 [mm]	2	Perno 10-32 UNF, 9x6 [mm]	1
Acrílicos frontales, 250x150x3 [mm]	2	Rodamiento, 10x30x9 [mm]	1
Ángulos de 90 acrílicos, 20x25x3 [mm]	10	Bridas, 100 [mm]	2
Ángulos de 90 de aceros, 100x60x3 [mm]	2	Electroimán, 24 [V]	1
Pernos, 5x20 [mm]	16	Perno electroimán, 4x40 [mm]	1
Arandelas y tuercas, 5 [mm]	16	Placa 10-32 UNF, 35x5 [mm]	1

Respecto al diseño del banco de ensayo las piezas más difíciles de fabricar son las que se hicieron en la máquina CNC del mismo taller. Estas piezas que consisten en un perno hexagonal y una placa unida a un perno son las que se unen al sensor PBC Piezotronics modelo 208C05 SN LW54447 que posee un hilado 10-32 UNF, se pueden ver tanto el sensor como las piezas maquinadas en la Figura 2.4, encima de la placa es donde se ubican las muestras de cobre y recibe el impacto del percutor y luego es transferida la energía al sensor, para mayor detalle se puede ver el Apéndice C.

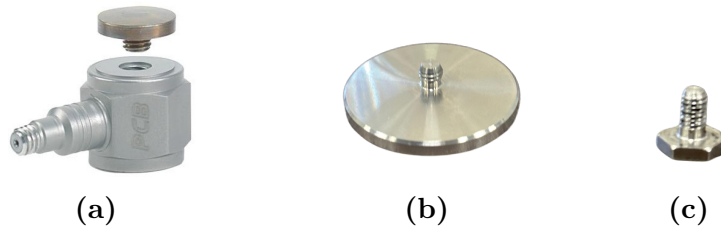


Figura 2.4 Piezas para instalación del sensor. (a) PBC Piezotronics modelo 208C05 SN LW54447. (b) Placa superior que recibe el impacto del percutor. (c) Perno de fijación a la placa de acero con hilado 10-32 UNF.

2.3. Preparación de muestras

Con el fin de calibrar parámetros, analizar cómo se comporta un material homogéneo y probar cómo funciona el banco de ensayo se harán muestras en concreto y cobre. A continuación, se muestran dos métodos para la preparación de muestras, uno con moldes 3D y otro con broca tipo copa. Para usar el método con la broca de copa es necesario un paso previo que es cortar el mineral para que tenga dos caras paralelas, ya que el material es extraído después del primer chancado, tal como se ve en la Figura 2.5. Para trabajos futuros se harán ensayos químicos para conocer la composición del mineral.



Figura 2.5 Parte del mineral de cobre extraído de la región de O'Higgins.

2.3.1. Moldes 3D para muestras con concreto

Una forma de conseguir muestras de concreto fue con los moldes 3D impresos en laboratorio de impresiones 3D de la UdeC. Los moldes empleados se presentan en la Figura 2.6.

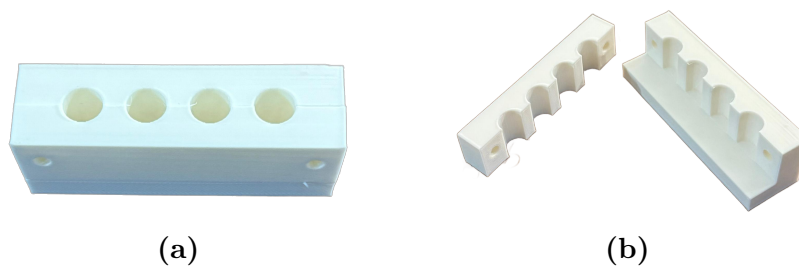


Figura 2.6 (a) Molde 3D utilizado para las hacer las probetas de concreto. (b) Partes del molde 3D.

2.3.2. Corte previo al uso de broca tipo copa

Para trabajar con la broca tipo copa es necesario cortar el mineral chancado con una sierra bimetalica, con el fin de poder presar el material mientras se taladre con la broca. Esto evita movimientos indeseados, lo que permite sacar muestras sin grietas, además ayuda a prevenir que zonas del material serán útiles para sacar muestras, se evita lugares porosos a simple vista. El material queda como se muestra en Figura 2.7.



Figura 2.7 Mineral de cobre cortado en laminas de 25 mm de espesor.

2.3.3. Broca copa

Para hacer las muestras cilíndricas se utiliza la broca tipo copa, que es una herramienta que se acopla a un taladro. Durante el proceso de hacer muestras previas se probó con concreto y mineral de cobre para probar el método. Se descubrió en el proceso que al ser materiales no heterogéneos y de diferentes composiciones hay partes más blandas, con humedad, o con grietas internas por lo que las muestras que no cumplan con el estándar de un cilindro perfecto serán descartadas con el fin de evitar grietas por esfuerzos de concentración. Las muestras obtenidas mediante este método se presentan en la Figura 2.8.



Figura 2.8 Muestras cilíndricas sin cortar. (a) Mineral de cobre. (b) Concreto.

2.3.4. Corte final de muestras con esmeril y dremel

Para terminar de preparar las muestras estas se dejan en una relación de diámetro con el largo de 1:1 en estudios previos [20]. Una vez obtenido las muestras como aparecen en la Figura 2.8a se deben cortar para que queden del mismo tamaño con un esmeril, para el caso de probeta de 13 mm y se usará un dremel diamantado para la muestra de 6 mm. En la Figura 2.9 se presenta la pieza utilizada para el corte de las muestras y se presenta como queda el mineral listo para ser ensayado.

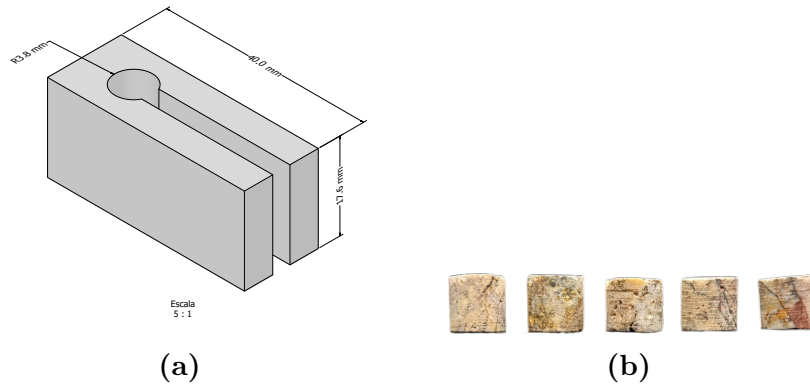


Figura 2.9 Preparación final. (a) Molde 3D utilizado para cortar las probetas. (b) Mineral de cobre listo para ensayar.

2.3.5. Muestras descartadas

Para el criterio de seleccionar las muestras se utilizó una inspección visual, donde se buscaba que fuera un cilindro lo más perfecto posible. Dentro de los motivos de descarte es cuando se apreciaba una porosidad visible, un agujero, que le faltará material, que tuviera una grieta profunda o que no cumpliera con la razón de aspecto 1:1 del cual se permitió tener un error del 10 %. Algunas de las muestras descartadas se presentan en Figura 2.10



Figura 2.10 Diferentes muestras de mineral de cobre descartadas por falta de material, grietas o porosidad.

2.3.6. Muestras consideradas válidas

Una vez las muestras pasaran la inspección visual, se toma la relación de aspecto de cada una, estas se guardan en una bolsa única con su ID. Luego, estas se van a masar en una balanza electrónica TM exj2204h con una sensibilidad de 0.001 g, de esta forma se puede encontrar la energía específica de fractura. Posteriormente a ser ensayada la muestra se guardará el mineral en su bolsa correspondiente para un tamizado de trabajos futuros. A continuación, se presenta la Tabla 2.5 que es un resumen de algunas probetas ensayadas.

Tabla 2.5 Algunas probetas utilizadas para ser ensayadas, para revisar todas muestras revisar el anexo B.

ID	Diámetro, [mm]	Altura, [mm]	Razón de aspecto	Masa, [g]
10	13.03	13.02	1.0007	4.0786
20	13.07	13.64	0.9582	4.1129
40	13.12	12.98	1.0107	3.8643
60	13.08	12.16	1.0756	3.5795
80	13.10	13.02	1.0061	4.0159

2.4. Calibración con ensayos previos y caracterización del tipo de falla

Para verificar la funcionalidad del banco de ensayo DWT fabricado, así como calibrar los parámetros del sensor y la adquisición de datos antes de hacer los ensayos definitivos con el mineral de cobre, se realizaron ensayos preliminares utilizando muestras cilíndricas de concreto.

En estos ensayos preliminares tipo SILC con muestras de concreto, se observó consistentemente que la fractura ocurrió principalmente por tracción, aunque la carga aplicada era de compresión. Este fenómeno ocurre debido a que, al impactar la muestra en un punto específico (el manto), se genera una concentración localizada de esfuerzos, provocando que la muestra tienda a expandirse lateralmente debido al efecto Poisson. Esta expansión lateral induce esfuerzos internos perpendiculares a la dirección de aplicación de la carga, generando finalmente una grieta vertical y fallando por tracción.

Adicionalmente, para complementar la calibración y obtener una referencia cuantitativa, se llevaron a cabo ensayos de compresión utilizando la máquina universal Zwick Roell Z005. En estos ensayos complementarios, las muestras se sometieron a cargas cuasi estático controladas con una velocidad de avance constante de 2 mm/min, obteniendo así curvas detalladas de fuerza versus desplazamiento. Dichas curvas permiten validar y complementar la información obtenida en los ensayos dinámicos DWT. A continuación, en la Figura 2.11 se presenta el sistema completo para hacer los ensayos.

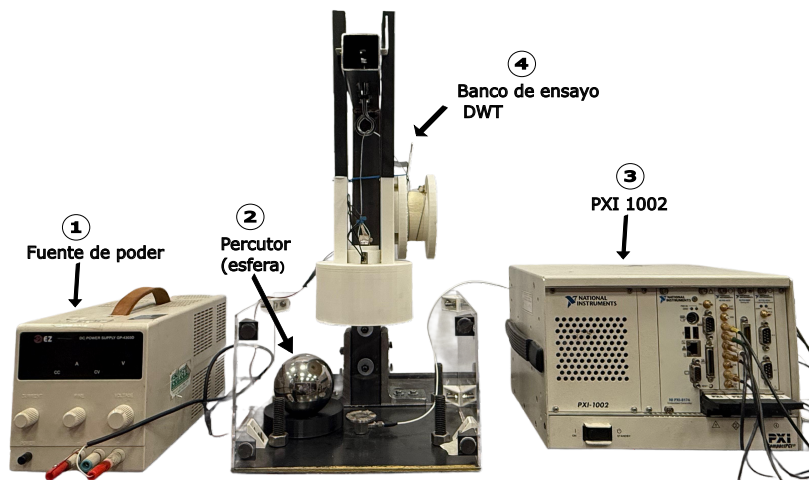


Figura 2.11 Componentes necesarios para realizar los ensayos DWT.

2.4.1. Cómo encontrar la energía de fractura a partir de un sensor de fuerza dinámica

Para cuantificar la energía absorbida por la muestra durante los ensayos preliminares y ensayos futuros se propone analizar dos casos para verificar el correcto funcionamiento de y forma que adquiere los datos el sensor PCB c05. El primero consiste en dejar caer una bola de acero de masa conocida a una altura conocida, pero sin ninguna probeta a fracturar. Entendiendo esto, en primer lugar, se verá el balance de ecuaciones para el caso sin probeta. El balance se hace a partir del análisis de antes del impacto y después del impacto como aparece en la Ecuación 17.

$$E_{k,i} = E_{k,r} + E_c + E_e \quad (17)$$

$$E_{k,i} = \frac{1}{2}m_e v_i^2 \quad (18)$$

$$E_{k,r} = \frac{1}{2}m_b v_r^2 \quad (19)$$

Donde $E_{k,i}$ corresponde a la energía cinética justo antes del impacto, por lo que v_i es la velocidad que lleva la esfera antes del impacto, m_e es la masa de la esfera, v_r es la velocidad a la que rebota la esfera, E_c es la energía que absorbe la celda y finalmente E_e es el error asociado a las mediciones, y energías perdidas por roce, calor, etc. En este caso se mide la altura del percutor con un pie de metro con una sensibilidad de 0.1 mm, la altura de rebote se mide en Inskape con una sensibilidad de 1 mm, además se conoce la sensibilidad del sensor de fuerza que es de 224.82 mV/kN. Para encontrar E_c es necesario utilizar el impulso, ya que el sensor mide fuerza vs tiempo. El impulso se escribe como la Ecuación 20.

$$I = m_e(v_i + v_r) \quad (20)$$

Las velocidades se suman debido a que están en sentidos opuestos. Luego, trabajando la Ecuación 17 se crea una diferencia de energía, ΔE_k . Con la diferencia de cuadrados se puede integrar la Ecuación 20, y de esta forma queda una expresión de E_c como aparece en la Ecuación 21.

$$\frac{1}{2}I(v_i - v_r) = E_c \quad (21)$$

De esta forma se puede encontrar la energía absorbida de la celda y verificar si es que se está obteniendo bien la energía. Por lo que se hicieron 30 ensayos a una altura de 15.3 cm con una masa de 84 gramos, alcanzando una altura de rebote de 20 mm. Usando la Ecuación 20 se obtiene un impulso teórico de 0.1982 N·s, mientras que de los 30 ensayos realizados su promedio es de 0.2021 N·s, tal como aparece en la Tabla 2.6. La diferencia de error porcentual del teórico versus experimental que es de 1.55 %, que está asociada a como se realiza la medición del rebote, que se encuentra grabando los ensayos de prueba a 240 Hz y se escoge la imagen que tenga altura más grande y se trabaja en Inskape para encontrar la altura de rebote como aparece en la Figura 2.12. Esta calibración - comprobación previa permite asegurar que el sistema de medición y adquisición de datos funcione adecuadamente, entregando resultados confiables y consistentes para los ensayos definitivos en cobre verificando que no pase los límites dados por el fabricante que son de fuerzas de 5000 lb.

Tabla 2.6 Ensayos realizados para calibrar el sensor de fuerza. Error calculado respecto al impulso teórico de 0.1982 N·s.

Ensayo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...	28	29	30	Prom.
Impulso [N·s]	0.2248	0.2191	0.1886	0.1838	0.1562	0.1939	0.2069	0.1723	0.1764	0.2071	...	0.2068	0.2054	0.2068	0.2021
Error %	+13.42	+10.56	-4.83	-7.26	-21.21	-2.17	+4.39	-13.07	-11.00	+4.47	...	+4.33	+3.63	+4.33	+1.97

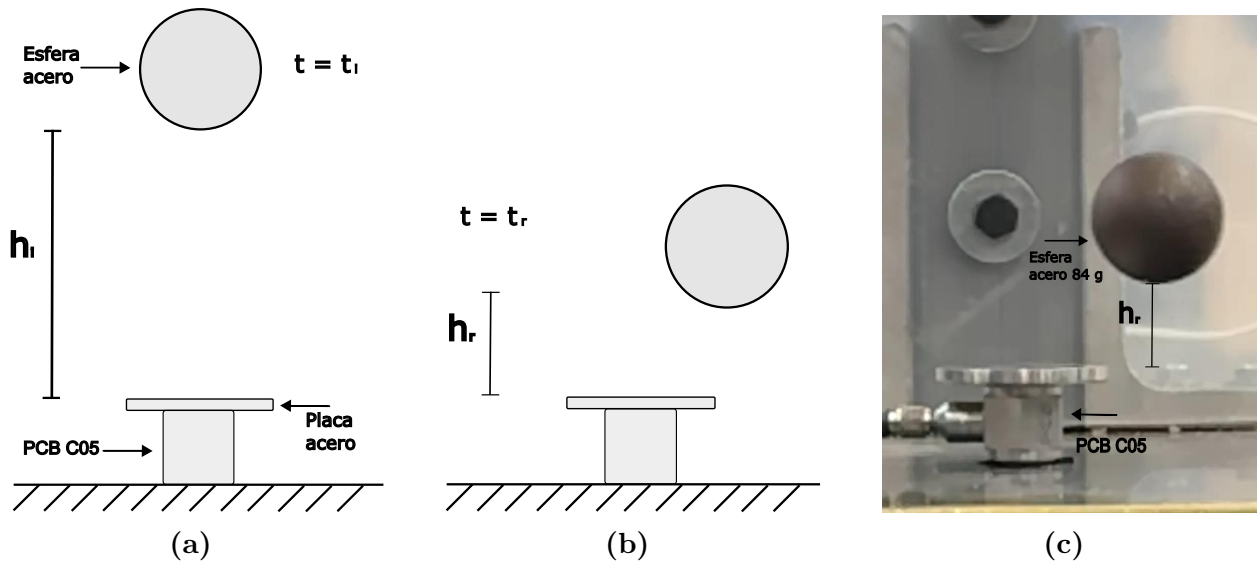


Figura 2.12 Ensayo DWT. (a) Altura inicial del impacto. (b) Después del impacto. (c) Después del impacto, altura real.

Continuando con los balances de energía ahora se analizará el segundo caso, donde habrá una muestra ensayada, por lo que aparece un nuevo término en el balance E_m , que es la energía la energía de fractura primaria específica, ver Ecuación 22.

$$E_{k,i} = E_{k,r} + E_c + E_m + E_e \quad (22)$$

Como ahora se busca encontrar la energía de fractura primaria se asumirá que $v_r = 0$, esto debido a que estamos interesados junto en este instante de tiempo, no cuando la esfera rebota. En la Figura 2.13 se aprecia en que instantes de tiempo se hace el balance de ecuaciones cuando hay una probeta, se conoce la altura inicial, y la masa de bola. En este caso es de interés conocer E_m es obligatorio que la muestra se fracture para que el ensayo sea válido, pero es importante entender que no todo el impulso recibido por el sensor corresponde a la energía necesaria para la fractura, sino que se buscará el instante donde el material falla y ocurre la fractura primaria, por lo que en la transferencia de fuerza hay un quiebre y ocurre un máximo local, esto se ve en profundidad en la Subsubsección 2.4.2.

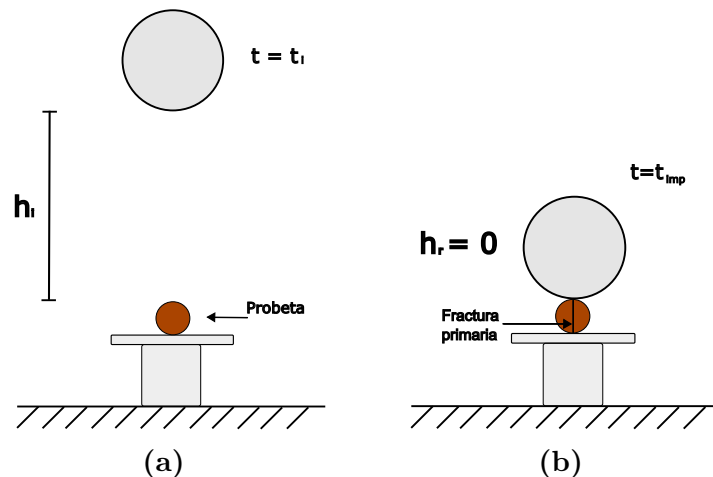


Figura 2.13 Ensayo DWT. (a) Antes del impacto. (b) Impacto y fractura primaria.

Es importante mencionar que el balance teórico de las ecuaciones es inconsistente. Si se reemplaza en la Ecuación 22 la Ecuación 21 y Ecuación 20 queda como la ecuación Ecuación 23. Donde $E_{k,i} = E_c$, esto se debe a a que se asume que $v_r = 0$ en la fractura primaria. Lo mencionado no es correcto, por lo que en trabajos futuros se agregará al sistema de medición la velocidad que lleva la esfera. Lo que ocurre en la realidad es que $I < mv_i$, aun así se utilizará el balance de la Ecuación 23.

$$E_{k,i} = E_c + E_m + E_e \quad (23)$$

2.4.2. Ensayos previos tipo DWT

Los ensayos previos tipo DWT se hicieron con las muestras de concreto creadas a partir de los moldes 3D de PLA. Tienen un diámetro de 12.5 cm, el percutor se dejará caer en caída libre a una altura de 10.7 cm que corresponde a la velocidad de 1.45 m/s, los cálculos encuentran en el Subsección A.2.

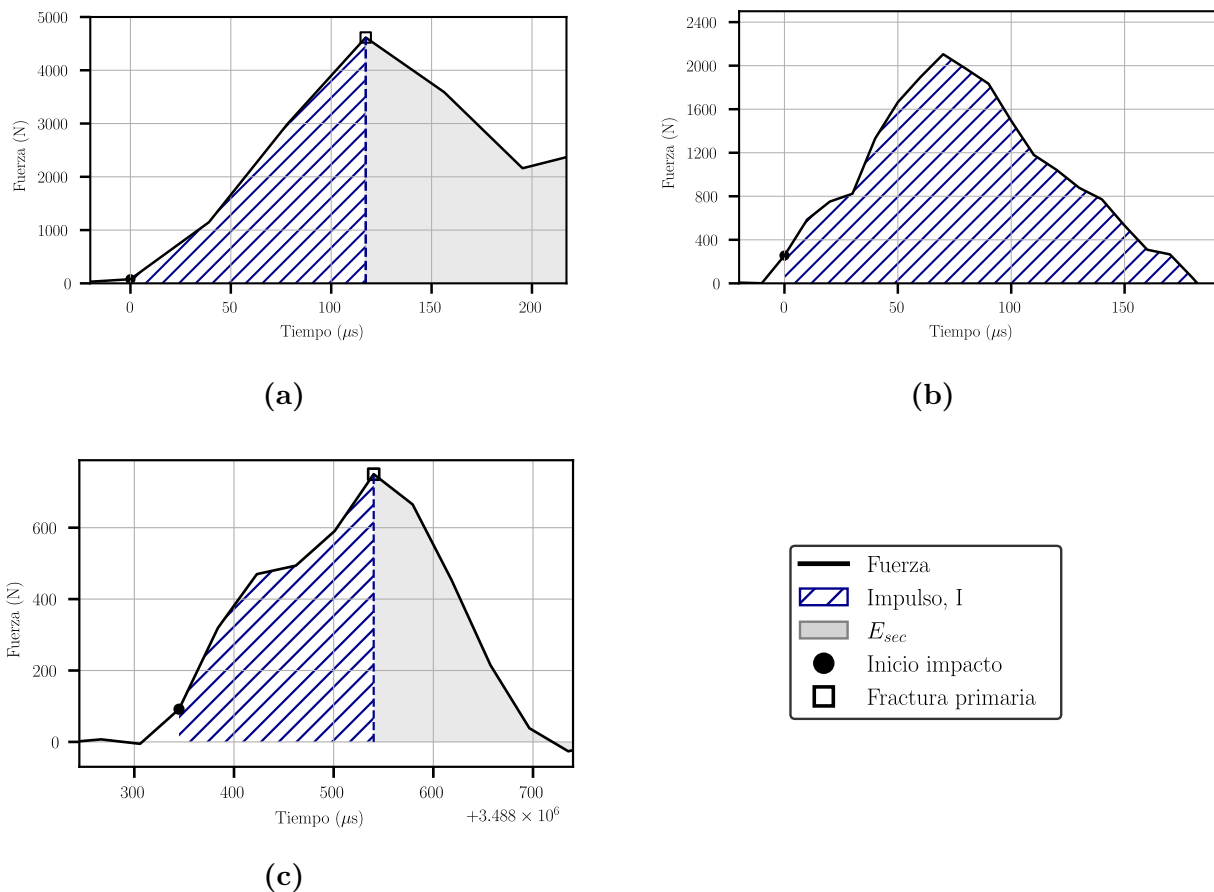


Figura 2.14 Ensayos previos DWT. (a) Ensayo con probeta concreto a 10 cm de altura con un percutor de 1 kg. (b) Ensayo N°25 sin probeta de Tabla 2.6. (c) Ensayo con probeta concreto a 10 cm de altura con un percutor de 273 g.

En la Figura 2.14a y Figura 2.14c son ensayos realizados con una probeta de concreto, por lo que la energía que se encuentra es el impulso absorbido de la celda tal como se presentó en el balance de la Ecuación 23 que se considera hasta la fractura primaria. Por otra parte, la Figura 2.14b es un ensayo sin probeta por lo que el impulso se calcula para todo el tramo, en este caso corresponde al ensayo N°25 donde dio un valor de 0.1952 Ns.

2.4.3. Ensayos previos de compresión en Zwick Roell Z005

En los ensayos de compresión se orienta la probeta en la misma dirección que en el ensayo DWT. Esta máquina que se puede ver en la Figura 2.15 entrega datos de la fuerza vs el desplazamiento de la probeta, por lo que mediante el área bajo la curva se puede encontrar la energía absorbida por la probeta. Uno de los parámetros más importantes a configurar es la velocidad de avance de la compresión, para este caso de ensayos previos se usó 2 mm/min. A continuación, se presenta la Figura 2.16 que son los gráficos de los datos obtenidos por este ensayo.



Figura 2.15 Máquina de compresión Zwick Roell modelo Z005, que está en el laboratorio de impresiones 3D de la Universidad de Concepción.

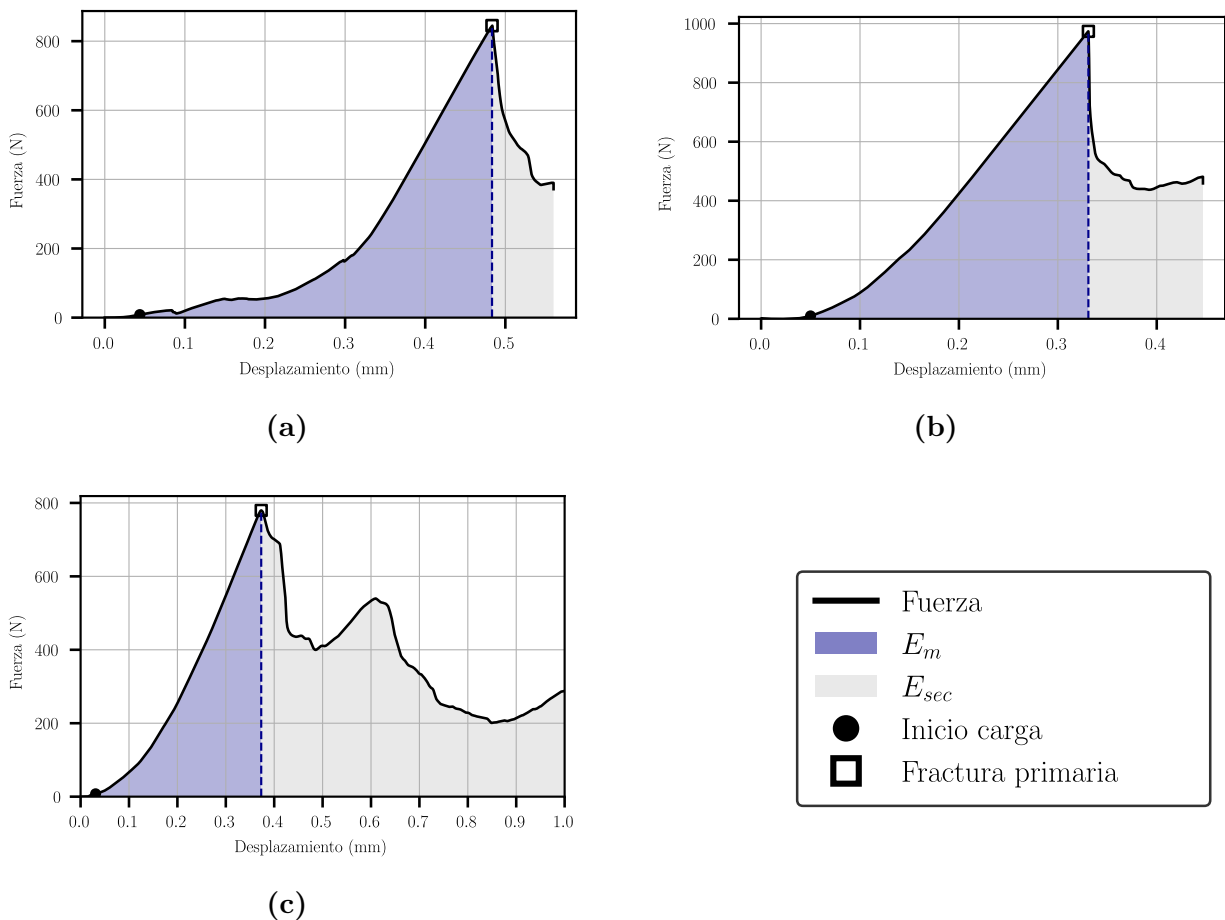


Figura 2.16 Ensayos previos de compresión de concreto. (a) Probeta N°2c. b) Probeta N°4c. c) Probeta N°6c.

3. Resultados

En este capítulo se presentarán los resultados encontrados para las muestras de cobre de diámetro aproximado de 13 y 7 mm. En cuanto al comportamiento de cómo se fracturan estas probetas es el mismo por lo que nos concentraremos solo en el tamaño de diámetro de 13 mm. Sin embargo, se verá a detalle en la Subsección 3.3. La configuración de los ensayos se presentó en la Tabla 2.3, el detalle de cuantos ensayos se realizó están en la Tabla 3.1, dando un total de 130 ensayos. Para ambos ensayos tanto los de tipo DWT y los de compresión el tipo de falla es la misma, tal como aparece en la Figura 3.1.



Figura 3.1 Muestras ensayadas de mineral de cobre por ensayos tipo DWT y de compresión de 13 mm de diámetro.

Tabla 3.1 Cantidad de ensayos realizados.

Tipo de ensayo	Diámetro (mm)	Velocidad (m/s)	Velocidad (mm/min)	Cantidad
DWT	13	1.456	–	20
		1.066	–	20
	7	1.456	–	5
		1.066	–	5
Compresión	13	–	8	20
		–	0.2	20
	7	–	8	20
		–	0.2	20

3.1. Ensayo DWT con mineral de cobre

En la Figura 3.2 se presentan los resultados obtenidos mediante el ensayo DWT para mineral de cobre con una bola de acero de 1.588 kg y a una velocidad de 1.456 m/s para las probetas con un diámetro de 13 mm que corresponde al impulso absorbido por la celda. La fractura primaria se considera en el máximo local y cambia el comportamiento creciente de la curva. Esto se ve claramente en los ensayos 45, 49, 50, 53, pero en el ensayo 57 hay un quiebre en la curva cercano a los 100 microsegundos y luego vuelve a crecer, la explicación se debe a que como el mineral no es heterogéneo se pudo haber fracturado solo una parte de la probeta y luego se fractura completamente, esto no se pudo comprobar visualmente con un cámara a 240 Hz, por lo que se recomienda usar una cámara con mayor cantidad de FPS. A continuación, se presentan en la Figura 3.3 los ensayos DWT a 1.08 m/s.

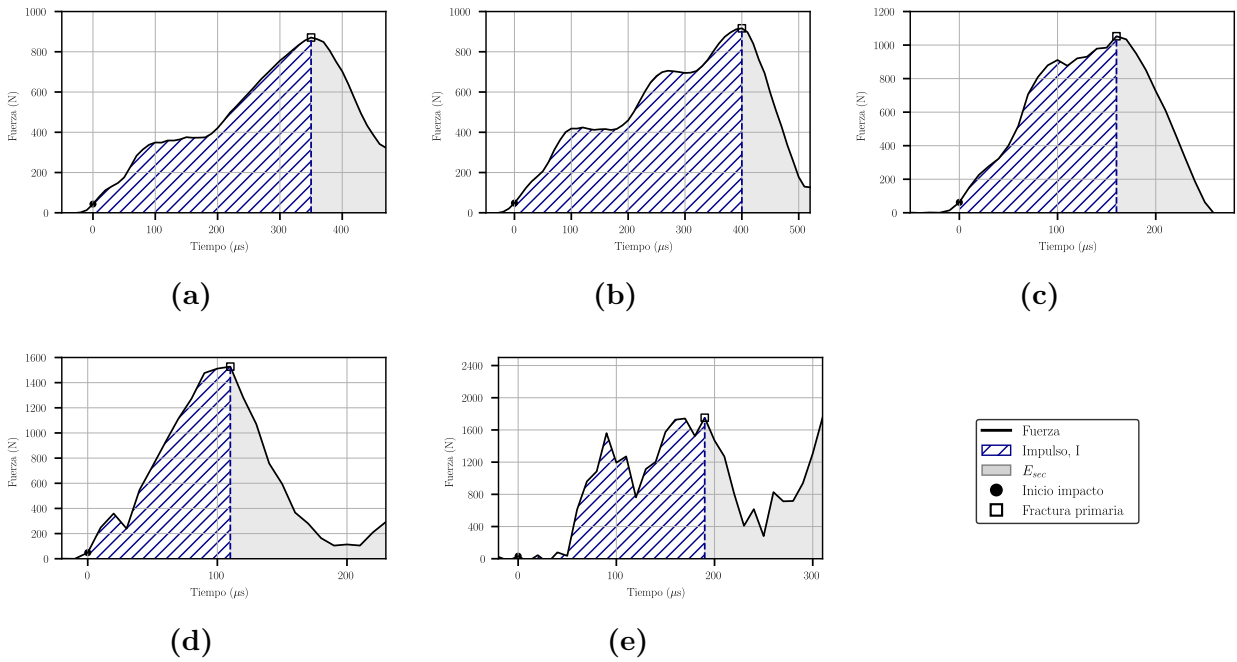


Figura 3.2 Ensayos DWT para diferentes muestras de mineral de cobre ensayadas a 1.456 m/s con un diámetro de 13 mm. (a) Ensayo 45. (b) Ensayo 49. (c) Ensayo 50. (d) Ensayo 53. (e) Ensayo 57.

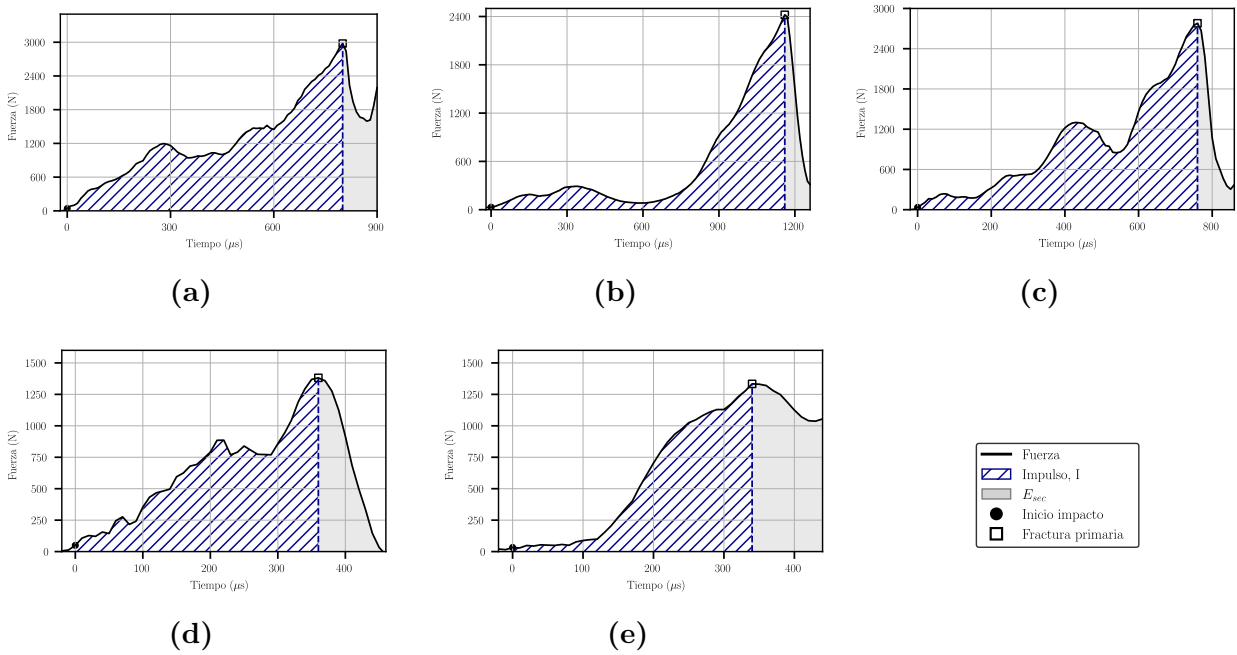


Figura 3.3 Ensayos DWT para diferentes muestras de mineral de cobre ensayadas a 1.08 m/s con un diámetro de 13 mm. (a) Ensayo 67. (b) Ensayo 69. (c) Ensayo 74. (d) Ensayo 80. (e) Ensayo 85.

3.2. Ensayo de compresión con mineral de cobre

En la Figura 3.4 se presentan los ensayos de compresión de mineral de cobre a una velocidad de 8 mm/min. Para este tipo es más fácil encontrar la energía absorbida por la probeta ya que corresponde al área bajo la curva hasta que cambia ocurre un máximo local, se tomo como limite una diferencia de 400 N.

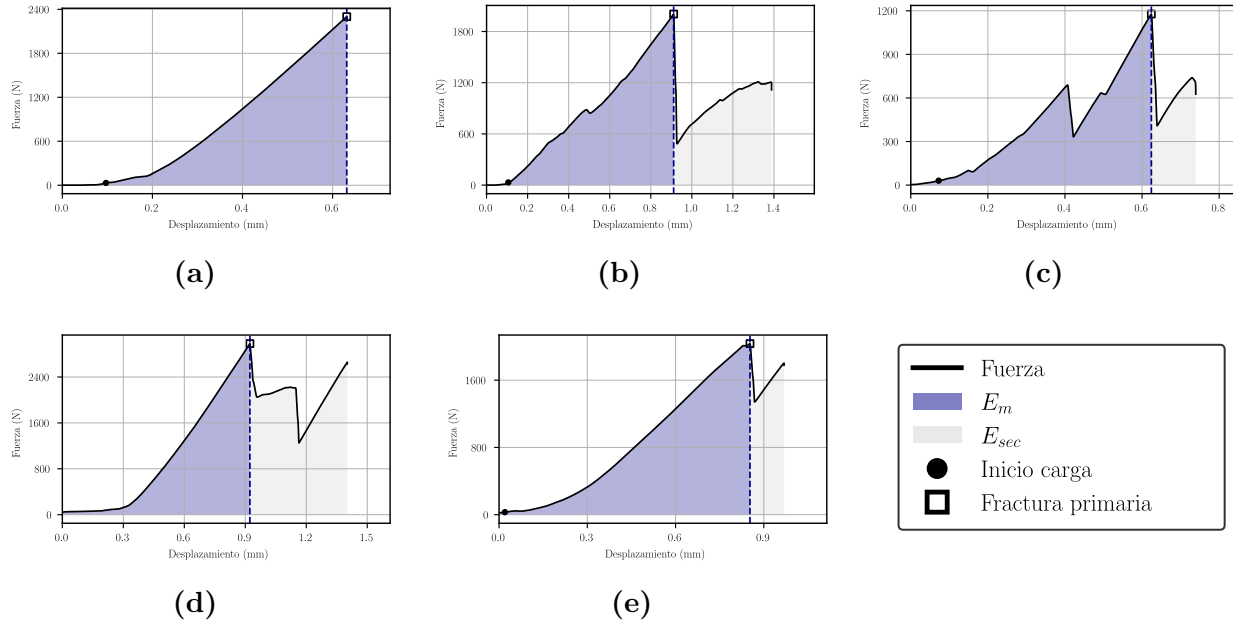


Figura 3.4 Ensayos de compresión a 8 mm/min con un diámetro de 13 mm. (a) Ensayo 2. (b) Ensayo 5. (c) Ensayo 8. (d) Ensayo 14. (e) Ensayo 17.

Ahora en la Figura 3.5 se presenta el comportamiento y la energía de fractura primaria para mineral de cobre a una velocidad de 0.2 mm/min.

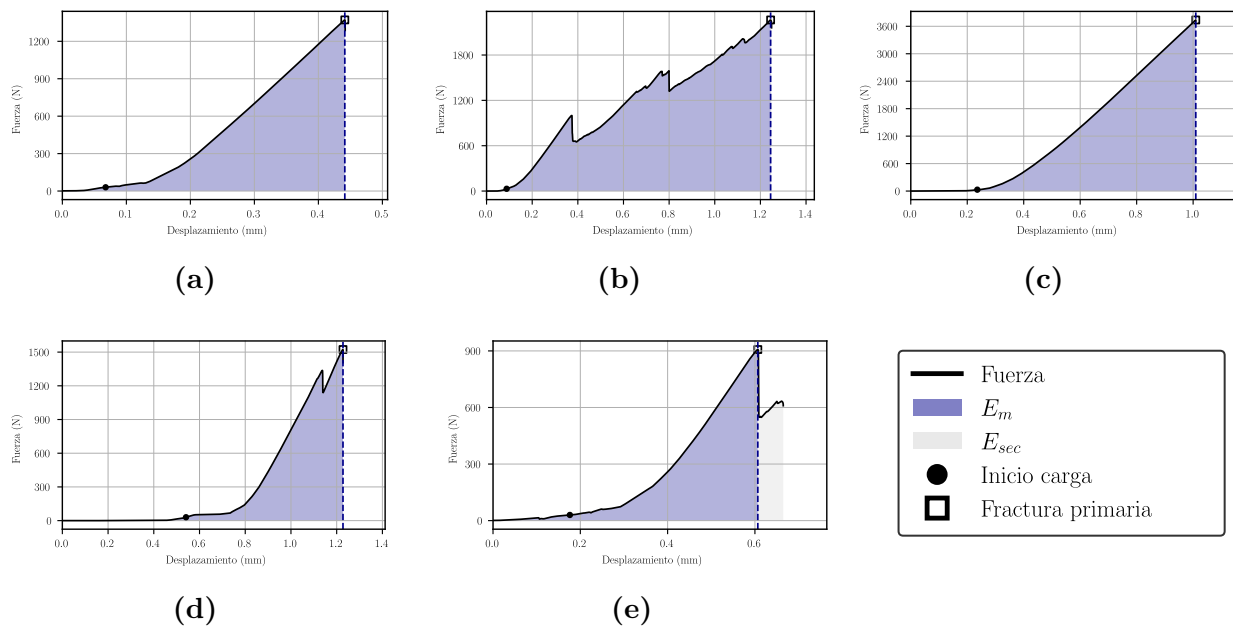
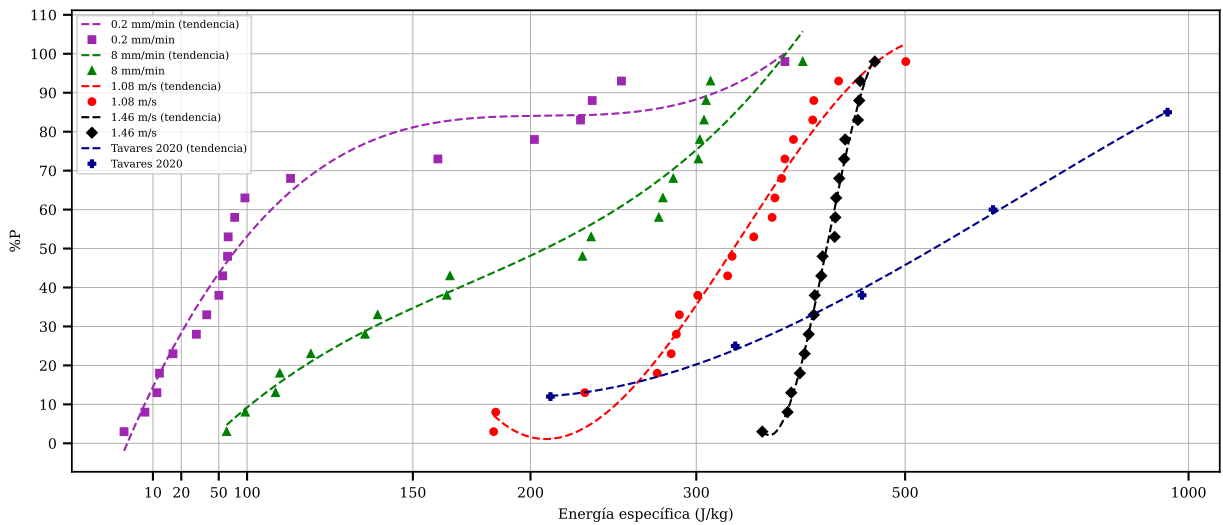


Figura 3.5 Ensayos de compresión a 0.2 mm/min con un diámetro de 13 mm. (a) Ensayo 24. (b) Ensayo 28. (c) Ensayo 30. (d) Ensayo 32. (e) Ensayo 35.

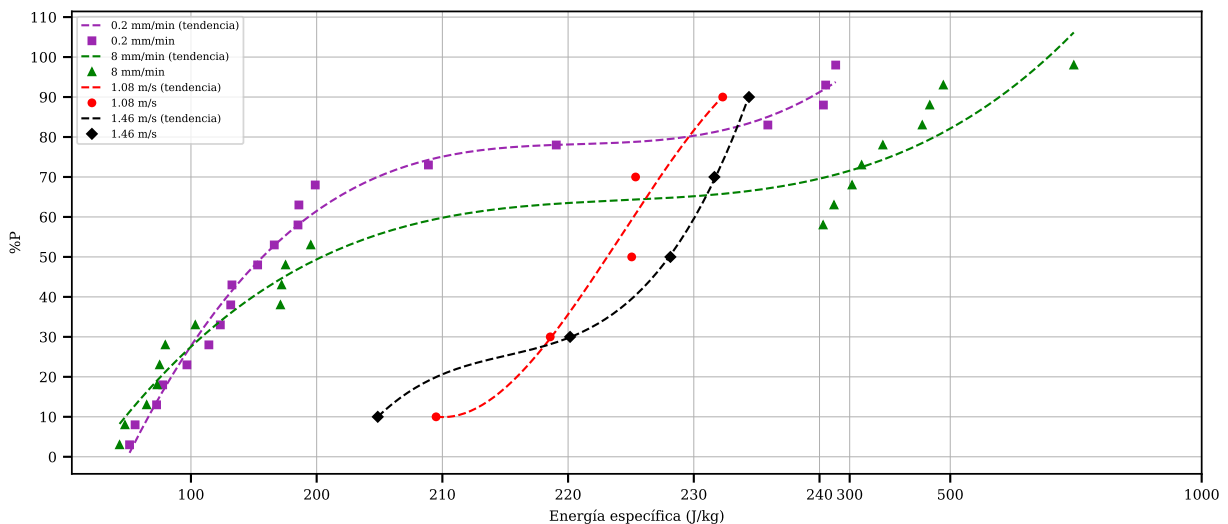
3.3. Influencia de la velocidad en la fractura primaria

En este ítem se presentan los resultados de todos los ensayos realizados. Para ello se muestran los 130 ensayos realizados a cuatro velocidades distintas mediante la Figura 3.6 para un diámetro aproximado de 13 mm y de 7 mm. Donde se tiene la probabilidad de fractura vs la energía específica de fractura primaria. Para encontrar la probabilidad de falla se utiliza la Ecuación 24. Donde $\%P$ es la probabilidad de falla porcentual, i es el número de ensayo específico y n es la cantidad de ensayos que hay para ese tipo de configuración.

$$\%P = \frac{i - 0,5}{n} \quad (24)$$



(a)



(b)

Figura 3.6 Energía de fractura primaria específica del mineral de cobre versus su probabilidad de fractura primaria ensayadas diferentes velocidades de impacto y de compresión. (a) Probetas de 13 mm de diámetro comparado con literatura [27]. (b) Probetas de 7 mm de diámetro.

Dentro de los resultados observados tanto los gráficos presentados en las Figura 3.2, Figura 3.3, Figura 3.4, Figura 3.5 tienen un comportamiento similar donde en todos los casos la fuerza crece hasta un máximo local y luego ocurre un quiebre que marca la fractura primaria, aunque es importante recordar que los ensayos DWT el área bajo la curva es el impulso que absorbe la celda, mientras que para los ensayos de compresión es el área bajo la curva, tal como se ha explicado en el capítulo 2. En la Figura 3.6 se puede ver como en los diferentes ensayos la energía está en un orden de magnitud coherente, pero lo más importante que aporta este grafico es que las curvas no son las mismas para los diferentes ensayos, a pesar de que se trataron las muestras y se mantuvo constante la energía de impacto en los ensayos DWT cambiando el percutor. Esto demuestra que hay una influencia de la velocidad de impacto en la fractura primaria, ya que las curvas están desplazadas sobre el X tanto para las muestras de 7 mm y de 13 mm de diámetro. Si bien las curvas presentan algunos datos alejados de la tendencia de la curva sigue siendo coherente por la naturaleza del mineral de cobre, que al ser heterogéneo posee diferentes composiciones dentro del mismo mineral lo que hace que cambie su tenacidad, porosidad, tamaño de grano entre otras propiedades. Dentro de la Figura 3.6a se agregaron datos extraídos de [27] los de color azul que es de mineral de cobre ensayado a una velocidad entre 1 a 2.5 m/s, pero no se especifica el tamaño de la probeta. Sin embargo, se puede notar una tendencia similar a la encontrada, donde su valor E_{50} ronda los 450 J/kg, una diferencia del 8.9% en comparación a la velocidad de 1.46 m/s con un diámetro de 13 mm.

El valor E_{50} es representativo para cada ensayo, este dato es utilizado en la Figura 3.7 donde se compara el valor de E_{50} con respecto a su diámetro a diferentes velocidades ensayadas. Si se compara con [27] que comentan que a mayor tamaño se necesita menor energía específica de fractura el único caso que cumple con esta condición es el ensayo a 0.2 mm por minuto. Esto se puede deber a múltiples razones, desde la porosidad del material ensayado, composición del mineral, etc. Sin embargo, este dato extraído de la literatura no menciona si la energía específica disminuye siempre en relación con su diámetro a diferentes velocidades por lo que es de interés verificar con más ensayos para tener más y comparar nuevamente con la literatura debido a que otros autores [22] en el año 2024 obtuvieron datos como los encontrados en este trabajo.

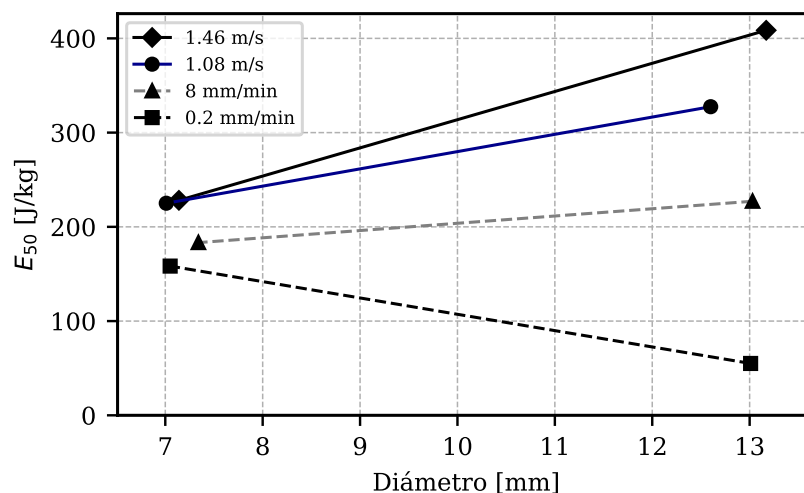


Figura 3.7 Valor de la fractura primaria de mineral de cobre E_{50} para diferentes velocidades a diferentes diámetros.

Se presenta la Figura 3.8, donde en el eje Y está el valor E_{50} ocupado en la Ecuación 3 para cada ensayo. En el eje X esta la razón de deformación $\dot{\epsilon}$, que se encuentra dividiendo la velocidad del ensayo en el diámetro de la probeta. Este grafico presenta como a menor velocidad se necesita menor energía para que ocurra una fractura primaria. Si bien entre los ensayos hay una diferencia de magnitud considerable en la razón de deformación esto se debe a las velocidades a las que se hizo los ensayos de compresión debido a las limitaciones que posee la maquina Zwick, sin embargo, se sigue cumpliendo que a menor velocidad se requiere menor energía para que ocurra la fractura primaria siendo aproximadamente 8 veces menor la E_{50} para el ensayo a 2 mm/min comparado al ensayo a 1.46 m/s para la probeta de 13 mm. Como se puede ver en la Figura 3.8 para ambos ensayos de diferentes diámetros a medida que crece la velocidad se necesita mayor energía para que ocurra la fractura inicial.

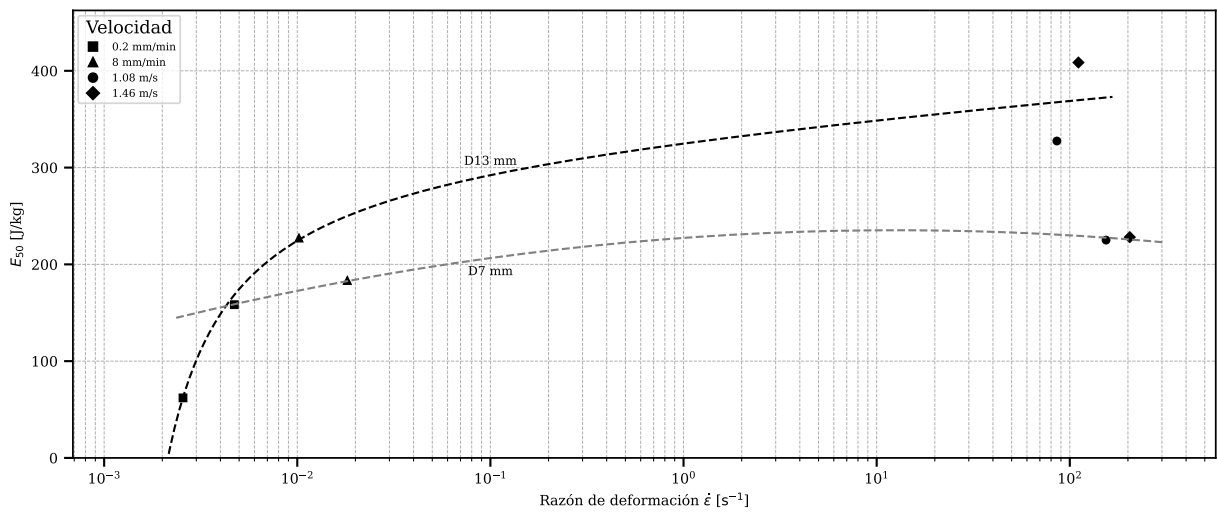


Figura 3.8 Energía E_{50} versus la razón de deformación para los ensayos a diferentes velocidades de impacto y de compresión con probetas de 7 mm y 13 mm de diámetro.

4. Conclusiones

En esta Memoria de Titulo se diseñó, y fabricó un banco de ensayo tipo DWT en que se ensayaron a diferentes velocidades muestras de mineral de cobre. También, se realizaron ensayos del mismo mineral en una máquina de compresión Zwick Roell Z005. Del trabajo realizado se llegaron a las siguientes conclusiones:

- El banco de ensayo mostrado en la Figura 2.2b fue diseñado con la idea que sea simple de fabricar, las partes más complejas son las que tienen relación con la celda PCB C05 que son maquinadas en una CNC, como son la placa sobre la que se sitúa el mineral de cobre y el perno de hilado 10-32UNF. El costo del banco de ensayo ronda las 30 UF, mientras mandar a ensayar a una empresa ronda los 100 UF. Por lo tanto, es aproximadamente 3 veces más económico y queda el banco de ensayos disponible en el laboratorio de vibraciones mecánica de la universidad de Concepción para trabajos futuros. El banco de ensayo consta de dos percutores para mantener la misma energía de impacto a diferentes velocidades.
- El procedimiento para obtener las probetas de mineral de cobre resulta complejo, no por la metodología empleada, sino por la naturaleza del material. Al ser un mineral heterogéneo, presenta zonas con diferentes durezas, algunas partes son muy duras y requieren refrigeración constante de la broca copa para lograr el corte cilíndrico. Sin embargo, al cortar a tan solo 5 cm de una muestra anterior que fue dura, la composición cambiaba significativamente. En ciertos casos, el contacto con el agua de refrigeración provocaba que el mineral se desmoronaba o formara una especie de pasta al contacto con el agua, lo que impedía crear las probetas. A pesar de esta dificultad, es de suma importancia este paso debido a que ayuda a eliminar variables que pueden influir en la determinación de la influencia de la velocidad en la fractura.
- Dentro de los resultados encontrados se presentaron gráficos de la energía de fractura específica versus el porcentaje de probabilidad de fractura porcentual a velocidades de 0.2 mm/min, 8 mm/min, 1.08 m/s y 1.46 m/s, donde las curvas están espaciadas en el eje X para cada ensayo. Para tener un dato más de cada ensayo se utiliza el valor E_{50} versus la razón de deformación, donde estos están desplazados lo que indica que existe una influencia de la velocidad en la fractura primaria, donde a la velocidad más baja ronda los 50 J/kg y a la velocidad más alta es de 408 J/kg. Esto se debe a que, a menores velocidades, el material presenta una mayor capacidad para redistribuir los esfuerzos de forma localizada, lo que permite la activación de mecanismos de falla progresiva, tales como la propagación estable de microgrietas o la deformación limitada en zonas más dúctiles.

Para trabajos futuros es importante tener un sistema de medición para el percutor y así saber que velocidad lleva la bola en el momento de la fractura inicial. Para complementar, también se podría utilizar una cámara con una alta tasa de captura para detectar este momento, donde además de los ensayos ya realizados se pueden agregar otras velocidades en el banco DWT. Otra mejora que se podría hacer al sistema que una vez las muestras estén listas se les haga una inspección de ultrasonido, de esta forma se podrían descartar algunas que paseen un umbral de porosidad.

Referencias

- [1] M. Akhondizadeh and M. Rezaeizadeh, “Mechanics industry experimental investigation of the effect of energy on the ore breakage,” *Mechanics and Industry*, vol. 18, 2017.
- [2] K. Barbosa, J. Esterle, B. Bonfils, and Z. Chen, “The use of short impact load cell to derive geomechanical properties of sub-bituminous coal and mudstone,” *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 72, p. 103018, 12 2019.
- [3] B. C. de Chile, “Base de datos estadísticos (bde),” 2024.
- [4] S. Qin, H. Ren, Y. Hu, S. Ma, J. Ding, F. Lai, C. Zhang, C. Shen, and H. Zhao, “Efficient recovery of cu, co, and au from polymetallic magnetite: Insights into mineral liberation mechanisms and interfacial behavior,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 13, p. 115940, 4 2025.
- [5] S. Li, J. Sun, Y. Guo, Y. Li, B. Wang, Y. Zhu, M. Li, and X. Yao, “Analysis of the damage effects of carbon fiber composites under the mechanical impact loads of lightning based on a modified simulation calculation method,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 283, p. 111644, 8 2024.
- [6] X. Jin, D. O’Grady, R. P. Affleck, S. Martini, and A. Saluja, “Freeze drying and vial breakage: Misconceptions, root causes and mitigation strategies for the pharmaceutical industry,” *Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 113, pp. 1306–1318, 5 2024.
- [7] L. Zhao, H. Li, Z. Liu, Z. Wang, D. Xu, J. Zhang, J. Ran, H. Mo, and L. Hu, “Copper ions induces ferroptosis in staphylococcus aureus and promotes healing of mrsa-induced wound infections,” *Microbiological Research*, vol. 296, p. 128122, 7 2025.
- [8] M. de Leon and H. S. Shin, “Review of the advancements in aluminum and copper ultrasonic welding in electric vehicles and superconductor applications,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 307, p. 117691, 9 2022.
- [9] W. Liu, J. Sun, C. Ai, R. Zhang, H. Cheng, Z. Chen, H. Zhou, and Y. Wang, “Moderate permeability enhanced microbial community turnover and copper extraction during bioleaching of low-grade copper ores,” *Science of The Total Environment*, vol. 954, p. 176563, 12 2024.
- [10] M. Ajmal, T. Roessler, C. Richter, and A. Katterfeld, “Calibration of cohesive dem parameters under rapid flow conditions and low consolidation stresses,” *Powder Technology*, vol. 374, pp. 22–32, 9 2020.
- [11] H. J. Suárez, N. A. Sánchez, J. ASPRILLA, and A. SANCHEZ, *Introducción a la mecánica de la fractura y análisis de fallas*. 1 2008.
- [12] P. Pourghahramani, “Effects of ore characteristics on product shape properties and breakage mechanisms in industrial sag mills,” *Minerals Engineering*, vol. 32, pp. 30–37, 5 2012.
- [13] S. Jiang, S. Jiao, L. Shen, Y. Wang, and Y. Wan, “Particle shape effect on dynamic mechanical responses, energy conversion and fragmentation behaviours of granular materials under impact,” *Construction and Building Materials*, vol. 470, p. 140525, 4 2025.

- [14] D. Leśniewska, A. Tordesillas, M. Pietrzak, S. Zhou, and M. Nitka, “Structured deformation of granular material in the state of active earth pressure,” *Computers and Geotechnics*, vol. 157, p. 105316, 5 2023.
- [15] Narayanan and S. Sankara, “Development of a laboratory single particle breakage technique and its application to ball mill modelling and scale-up,” 1 1985.
- [16] U. Demirbas, “Cr:colquiriite lasers: Current status and challenges for further progress,” *Progress in Quantum Electronics*, vol. 68, 11 2019.
- [17] Y. Zhou, C. S. Yang, J. A. Chen, G. F. Ding, W. Ding, L. Wang, M. J. Wang, Y. M. Zhang, and T. H. Zhang, “Measurement of young’s modulus and residual stress of copper film electroplated on silicon wafer,” *Thin Solid Films*, vol. 460, pp. 175–180, 7 2004.
- [18] Q. Xu, Y. Cao, B. Chen, J. Zhou, and F. Xue, “In-situ compression tests and analysis of strength-ductility synergy in heterogeneous structured copper-tin composite joint,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 912, p. 147000, 10 2024.
- [19] K. W. Seo, J. Y. Kim, Y. J. Kim, and K. S. Kim, “Finite element ductile fracture simulation of charpy and drop weight tear tests for api x52,” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 133, p. 104629, 10 2024.
- [20] P. Lois-Morales, C. Evans, and D. Weatherley, “Characterising tensile strength and elastic moduli of altered igneous rocks at comminution scale using the short impact load cell,” *Powder Technology*, vol. 388, pp. 343–356, 8 2021.
- [21] L. M. Tavares and R. P. King, “Single-particle fracture under impact loading,” *International Journal of Mineral Processing*, vol. 54, pp. 1–28, 6 1998.
- [22] P. Li, S. Liu, Y. Wang, Z. Deng, J. Wang, and Z. Cao, “A new device and calibration method for the fracture energy testing of single-particle impact,” *Powder Technology*, vol. 445, p. 120142, 9 2024.
- [23] G. R. Ballantyne and M. S. Powell, “Benchmarking comminution energy consumption for the processing of copper and gold ores,” *Minerals Engineering*, vol. 65, pp. 109–114, 10 2014.
- [24] J. A. Curry, M. J. Ismay, and G. J. Jameson, “Mine operating costs and the potential impacts of energy and grinding,” *Minerals Engineering*, vol. 56, pp. 70 – 80, 1 2014.
- [25] CEEC, “Proportion of energy attributable to comminution - ceec (coalition for eco efficient comminution),” 2012.
- [26] J. Jeswiet and A. Szekeres, “Energy consumption in mining comminution,” *Procedia CIRP*, vol. 48, pp. 140–145, 1 2016.
- [27] L. M. Tavares, F. P. André, A. Potapov, and C. Maliska, “Adapting a breakage model to discrete elements using polyhedral particles,” *Powder Technology*, vol. 362, pp. 208–220, 2 2020.

A. Códigos en Python

A.1. Cálculos preliminares

A continuación, se muestra el código utilizado para poder dimensionar el banco de ensayos.

```
import numpy as np

# Datos iniciales
d_p = 0.012 # Diametro partícula (m)
r_p = d_p / 2 # Radio partícula (m)
h_p = 0.025 # Largo del cilindro (m)
v = 1.5 # Velocidad impacto (m/s)
E_50 = 150 # Energia especifica de fractura (J/kg)
rho_Cu = 2650 # Densidad cobre (kg/m3)
rho_acero = 7850 # Densidad acero (kg/m3)
E_Cu = 10e9 # Modulo Young cobre (Pa)
E_acero = 210e9 # Modulo Young acero (Pa)
nu_Cu = 0.34
nu_acero = 0.30
g = 9.81 # gravedad (m/s2)
sigma_ult_Cu = 210e6 # Resistencia ultima cobre (Pa)

# Masa partícula cobre (cilindro)
V_p = np.pi * r_p**2 * h_p # Volumen del cilindro
m_p = rho_Cu * V_p # Masa del cilindro

# Energia para fractura total
E_fractura = E_50 * m_p * 1.5

# Funcion para evaluar fractura segun masa de la bola
def evaluar_fractura(masa_bola):
    E_impacto = 0.5 * masa_bola * v**2
    h = v**2 / (2 * g)

    R_b = ((3 * masa_bola) / (4 * np.pi * rho_acero))**(1/3)
    R_efectivo = 1 / (1/R_b + 1/r_p)
    E_efectivo = 1 / ((1 - nu_Cu**2)/E_Cu + (1 - nu_acero**2)/E_acero)

    F_max = ((5/4) * (E_impacto**3 * E_efectivo**2) / R_efectivo)**(1/5)
    a = ((3 * F_max * R_efectivo) / (4 * E_efectivo))**(1/3)
    sigma_max = (3 * F_max) / (2 * np.pi * a**2)

    fractura_local = sigma_max >= sigma_ult_Cu
    fractura_total = E_impacto >= E_fractura

return {
        "Altura_caida": v**2 / (2 * g),
        "Tension_maxima_MPa": sigma_max / 1e6,
        "Fractura_local": fractura_local,
```

```

        "Fractura_total": fractura_total
    }

# Ejemplo de evaluacion para diferentes masas
masas_bola = [1.5] # kg, ajusta segun necesidad

for masa in masas_bola:
    resultados = evaluar_fractura(masa)
    print(f"\nResultados para masa bola acero = {masa:.4 f} kg:")
    print(f"Altura requerida: {resultados['Altura_caida']:.3 f} m")
    print(f"Fractura local?: {'Si' if resultados
    ----- ['Fractura_local'] else 'No'}")
    print(f"Fractura total?: {'Si' if resultados
    ----- ['Fractura_total'] else 'No'}")

masa_bola = 1.5 # kg
R_b = ((3 * masa_bola) / (4 * np.pi * rho_acero)) ** (1 / 3)
D_b = 2 * R_b * 100
print(f"El diametro de la bola de acero es: {D_b:.6 f} cm")

```

A.2. Encontrar el impulso absorbido por la celda PCB C05

```
#!/usr/bin/env python3
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
----- Calculo de Impulso con deteccion de fractura primaria
cuando la fuerza ha decaido 100-N desde el valor maximo
anterior.
----- Estilo grafico conservado segun formato original.
----- """

import os
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib as mpl
from scipy.integrate import trapezoid
from matplotlib.ticker import MultipleLocator

# === Configuracion estilo LaTeX ===
mpl.rcParams.update({
    "text.usetex": True,
    "font.family": "serif",
    "axes.labelsize": 8,
    "xtick.labelsize": 8,
    "ytick.labelsize": 8,
    "legend.fontsize": 6,
    "axes.linewidth": 1.0,
    "lines.linewidth": 1.2,
})

# === Parametros ===
archivo = "Cu_57.xlsx"
hoja = "Untitled"
umbral_N = 30
delta_fuerza = 200

# === Leer datos y convertir fuerza ===
df = pd.read_excel(archivo, sheet_name=hoja, usecols=["
    Force_Time*", "Force"])
df.columns = ["Tiempo_s", "Fuerza_lbf"]
df["Fuerza_N"] = df["Fuerza_lbf"] * 4.44822
df["Tiempo_us"] = df["Tiempo_s"] * 1e6

# === Detectar inicio del impacto ===
idx_inicio = df[df["Fuerza_N"] > umbral_N].index.min()
t_inicio_s = df.at[idx_inicio, "Tiempo_s"]
t_inicio_us = t_inicio_s * 1e6

# === Buscar el valor maximo que precede a una caida 200 N
```

```

===
df_post = df[df["Tiempo_s"] >= t_inicio_s].copy()
fuerzas = df_post["Fuerza_N"].values
indices = df_post.index.to_numpy()

f_max = fuerzas[0]
idx_max = indices[0]
idx_fractura = None

for i in range(1, len(fuerzas)):
    if fuerzas[i] > f_max:
        f_max = fuerzas[i]
        idx_max = indices[i]
    elif f_max - fuerzas[i] >= delta_fuerza:
        idx_fractura = idx_max
    break

if idx_fractura is None:
    print("-No se detecto una caida de 200 N. Se usara el -
          maximo global.")
    idx_fractura = df_post["Fuerza_N"].idxmax()

# === Tiempo y fuerza de fractura ===
t_final_s = df.at[idx_fractura, "Tiempo_s"]
t_final_us = t_final_s * 1e6
fuerza_fractura = df.at[idx_fractura, "Fuerza_N"]

# === Seleccion del tramo ===
df_sel = df[(df["Tiempo_s"] >= t_inicio_s) & (df["Tiempo_s"
    "] <= t_final_s)].copy()
df["Tiempo_rel_us"] = df["Tiempo_us"] - t_inicio_us
df_sel["Tiempo_rel_us"] = df_sel["Tiempo_us"] -
    t_inicio_us
t_fractura_rel_us = t_final_us - t_inicio_us

# === Calculo del impulso ===
impulso = trapezoid(df_sel["Fuerza_N"], df_sel["Tiempo_s"
    ])
print(f"-Impulso calculado: {impulso:.4f} Ns")

# === Grafico ===
fig, ax = plt.subplots(figsize=(4, 2.5))
ax.plot(df_sel["Tiempo_rel_us"], df_sel["Fuerza_N"], color='black',
    , label='Fuerza')

# Zona integrada (hachurada)
ax.fill_between(df_sel["Tiempo_rel_us"], df_sel["Fuerza_N"
    ], facecolor='none',
    edgecolor='darkblue', hatch='///', linewidth=0, label='

```

```

Zona - integrada ')

# Sombreado gris despues de la fractura
ax.fill_between(df["Tiempo_rel_us"], df["Fuerza_N"],
where=df["Tiempo_us"] >= t_final_us, color='lightgray',
alpha=0.5)

# Linea punteada en fractura
ax.vlines(t_fractura_rel_us, 0, fuerza_fractura, color='
darkblue', linestyle='--')

# Marcadores
ax.scatter(0, df_sel["Fuerza_N"].iloc[0], marker='o',
color='black', s=15, label='Inicio - impacto')
ax.scatter(t_fractura_rel_us, fuerza_fractura, marker='s',
edgecolors='black', facecolors='none', s=25, label='
Fractura - primaria')

# Ticks y etiquetas
ax.xaxis.set_major_locator(MultipleLocator(100))
ax.yaxis.set_major_locator(MultipleLocator(250))
ax.tick_params(axis='both', width=1.2, length=5)
ax.set_xlabel(r"Tiempo - ( $\mu$ s)")
ax.set_ylabel(r"Fuerza - (N)")
ax.set_xlim(-20, t_fractura_rel_us + 50)
ax.set_ylim(0, 1800)
ax.grid(True, linestyle='-', linewidth=0.5)

# Guardar grafico
base = os.path.splitext(os.path.basename(archivo))[0]
svg_filename = f"grafico_{base}_impulso.svg"
fig.savefig(svg_filename, dpi=300, bbox_inches='tight')
print(f" - Grafico - guardado - como: - {svg_filename}")

plt.tight_layout()
plt.show()

```

A.3. Encontrar la energía en ensayos de compresión

```
import os
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib as mpl
from scipy.integrate import trapezoid

# Configuración de matplotlib para estilo LaTeX/TikZ
mpl.rcParams.update({
    "text.usetex": True,
    "font.family": "serif",
    "axes.labelsize": 8,
    "xtick.labelsize": 8,
    "ytick.labelsize": 8,
    "legend.fontsize": 6,
    "axes.linewidth": 1.0,
    "lines.linewidth": 1.2,
})

# Entrada del usuario
archivo = input("Ingrese el nombre del archivo Excel del ensayo de compresión (.xlsx): ").strip()

# Procesamiento
df = pd.read_excel(archivo, skiprows=2)
df.columns = ['Desplazamiento_mm', 'Fuerza_N']
df['Desplazamiento_m'] = df['Desplazamiento_mm'] / 1000
df['Desplazamiento_m'] = df['Desplazamiento_m'] - 0.0001

# Detectar inicio del aumento de fuerza
umbral_N = 30
idx_inicio = df[df['Fuerza_N'] > umbral_N].index.min()
fuerza_inicio = df.loc[idx_inicio, 'Fuerza_N']
desplazamiento_inicio = df.loc[idx_inicio, 'Desplazamiento_m']

# Detectar pico de fuerza
idx_pico = df['Fuerza_N'].idxmax()
fuerza_pico_real = df.loc[idx_pico, 'Fuerza_N']
desplazamiento_pico = df.loc[idx_pico, 'Desplazamiento_m']

# Filtrar datos hasta el pico
df_fractura = df.loc[:idx_pico].copy()
energia_fractura_primaria = trapezoid(df_fractura['Fuerza_N'], df_fractura['Desplazamiento_m'])

# Salida
nombre_salida = os.path.splitext(os.path.basename(archivo))
```

```

    ) [0]
print(f"\nResultados del ensayo de compresion -- {
    nombre_salida}")
print(f"Energia absorbida hasta la fractura primaria: {
    energia_fractura_primaria:.4f}-J")
print(f"Fuerza pico real medida: {fuerza_pico_real:.2f}-N"
    )
print(f"Desplazamiento al pico de fuerza: {
    desplazamiento_pico*1000:.2f}-mm")
print(f"Inicio del aumento de fuerza: {fuerza_inicio:.2f}-
    N a {desplazamiento_inicio*1000:.2f}-mm")

# Graficar
fig, ax = plt.subplots(figsize=(4, 2.5))

# Curva completa
ax.plot(df['Desplazamiento_m'] * 1000, df['Fuerza_N'],
        color='black', linewidth=1.2)

# Area de energia absorbida
ax.fill_between(df_fractura['Desplazamiento_m'] * 1000,
df_fractura['Fuerza_N'],
facecolor='darkblue',
alpha=0.3,
linewidth=0)

# Area gris despues de la fractura
mask_outside_after = df['Desplazamiento_m'] >=
    desplazamiento_pico
ax.fill_between(df['Desplazamiento_m'] * 1000,
df['Fuerza_N'],
where=mask_outside_after,
facecolor='lightgray',
alpha=0.3,
linewidth=0)

# Linea de fractura primaria
ax.axvline(desplazamiento_pico * 1000, color='darkblue',
    linestyle='—')

# Punto de inicio del aumento de fuerza
ax.scatter(desplazamiento_inicio * 1000,
fuerza_inicio,
color='black',
s=12,
zorder=5)

# Marcador del pico de fuerza
ax.scatter(desplazamiento_pico * 1000,

```

```

fuerza_pico_real ,
marker='s' ,
facecolors='none' ,
edgecolors='black' ,
s=25,
linewidth=1.2)

# Etiquetas y ejes
ax.set_xlabel(r"Desplazamiento (mm)")
ax.set_ylabel(r"Fuerza (N)")
ax.set_xlim(0, df['Desplazamiento_m'].max() * 1000 * 1.15)

# Ticks y cuadrícula
ax.xaxis.set_major_locator(plt.MultipleLocator(0.2))
ax.yaxis.set_major_locator(plt.MultipleLocator(300))
ax.grid(True, which='major', axis='both', linestyle='-',
        linewidth=0.5)

# Guardado
plt.tight_layout()
plt.savefig(f"grafico_{nombre_salida}_fractura.svg", dpi
           =300, bbox_inches='tight')
plt.savefig(f"grafico_{nombre_salida}_fractura.pdf")
plt.show()

print(f"Grafico guardado como: grafico_{nombre_salida}
      _fractura.svg")

```

A.4. Graficar E_{50} vs %P

```
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib as mpl
from matplotlib.ticker import MultipleLocator

# Estilo tipo LaTeX (sin usar LaTeX)
mpl.rcParams.update({
    "font.family": "serif",
    "axes.labelsize": 8,
    "xtick.labelsize": 8,
    "ytick.labelsize": 8,
    "legend.fontsize": 4,
    "axes.linewidth": 1.0,
    "lines.linewidth": 1.2,
})

# Datos
datos = {
    "0.2 mm/min": {
        "energia": [372.61, 249.82, 232.59,
                    226.03, 201.91, 159.46, 111.21, 94.79,
                    73.82, 62.98,
                    62.03, 55.03, 50.15, 37.28, 28.92, 16.32,
                    11.74, 11.02, 8.22, 4.93],
        "prob": [98, 93, 88, 83, 78, 73, 68, 63,
                58, 53, 48, 43, 38, 33, 28, 23, 18, 13,
                8, 3]
    },
    "8 mm/min": {
        "energia": [389.25, 310.67, 307.28,
                    305.72, 302.58, 301.53, 283.58, 276.48,
                    273.72,
                    232.00, 227.15, 164.24, 162.96, 137.62,
                    133.42, 116.88, 108.33, 107.21,
                    95.63, 60.57],
        "prob": [98, 93, 88, 83, 78, 73, 68, 63,
                58, 53, 48, 43, 38, 33, 28, 23, 18, 13,
                8, 3]
    },
    "1.08 m/s": {
        "energia": [500.79, 424.94, 399.91,
                    398.83, 380.50, 372.59, 369.59, 363.63,
                    361.14,
                    345.29, 327.48, 323.90, 301.10, 287.84,
                    285.74, 282.15, 272.67, 228.42,
                    183.70, 182.79],
        "prob": [98, 93, 88, 83, 78, 73, 68, 63,
                58, 53, 48, 43, 38, 33, 28, 23, 18, 13,
                8, 3]
    }
}
```

```

    },
    "1.46 m/s": {
        "energia": [464.26, 447.93, 446.86,
                    445.40, 431.81, 430.69, 425.58, 422.39,
                    421.55, 420.86,
                    408.58, 407.33, 400.87, 399.90, 394.96,
                    391.00, 386.52, 378.44, 375.05,
                    352.58],
        "prob": [98, 93, 88, 83, 78, 73, 68, 63,
                58, 53, 48, 43, 38, 33, 28, 23, 18, 13,
                8, 3]
    }
}

# Colores
colores = {
    "0.2 mm/min": "#1f77b4",
    "8 mm/min": "#2ca02c",
    "1.08 m/s": "#ff7f0e",
    "1.46 m/s": "#d62728"
}

# Grafico
fig, ax = plt.subplots(figsize=(4, 2.5))

for etiqueta, valores in datos.items():
    ax.plot(valores["energia"], valores["prob"], marker='o',
            linestyle='',
            label=etiqueta, markersize=3, color=colores[etiqueta])

ax.set_xlabel("Energia especifica (J/kg)")
ax.set_ylabel("%P")
ax.xaxis.set_major_locator(MultipleLocator(50))
ax.yaxis.set_major_locator(MultipleLocator(10))
ax.tick_params(axis='both', width=1.2, length=5)
ax.grid(True, linestyle='-', linewidth=0.5)
ax.legend(title="Ensayo", loc='upper left')

plt.tight_layout()
plt.show()

```

A.5. Graficar E_{50} vs razón de deformación

```
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib as mpl
import numpy as np

# Estilo tipo LaTeX (sin usar LaTeX real)
mpl.rcParams.update({
    "font.family": "serif",
    "axes.labelsize": 8,
    "xtick.labelsize": 8,
    "ytick.labelsize": 8,
    "legend.fontsize": 6,
    "axes.linewidth": 1.0,
    "lines.linewidth": 1.2,
})

# Datos
strain_rate = [110.86, 85.71, 0.0102, 0.00256]
E50 = [408.58, 327.48, 227.15, 62.03]
etiquetas = ["1.46 m/s", "1.08 m/s", "8 mm/min", "0.2 mm/
    min"]

# Colores asignados
colores = {
    "0.2 mm/min": "#1f77b4", # azul
    "8 mm/min": "#2ca02c", # verde
    "1.08 m/s": "#ff7f0e", # naranja
    "1.46 m/s": "#d62728" # rojo
}

# Crear grafico
fig, ax = plt.subplots(figsize=(4, 2.5))

for x, y, etiqueta in zip(strain_rate, E50, etiquetas):
    ax.plot(x, y, 'o', color=colores[etiqueta], markersize=4,
        label=etiqueta)

# Configuracion de ejes
ax.set_xscale('log')
ax.set_xlabel(r'Tasa de deformacion  $\dot{\epsilon}$  [ $s^{-1}$ '])
ax.set_ylabel(r' $E_{50}$  [J/kg]')
ax.tick_params(axis='both', width=1.2, length=5)
ax.grid(True, which='both', linestyle='—', linewidth=0.5)

# Leyenda
ax.legend(title="Ensayo", loc='upper-left')
plt.tight_layout()
plt.show()
```

B. Todas probetas fabricadas

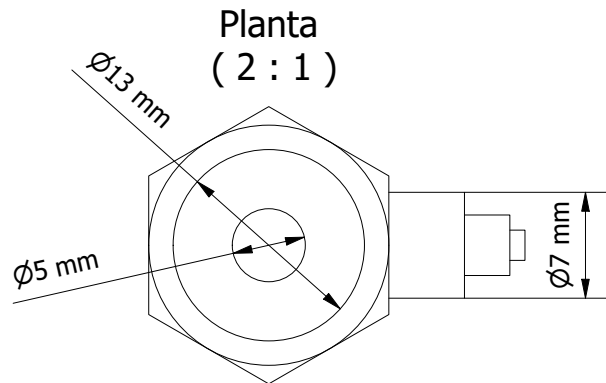
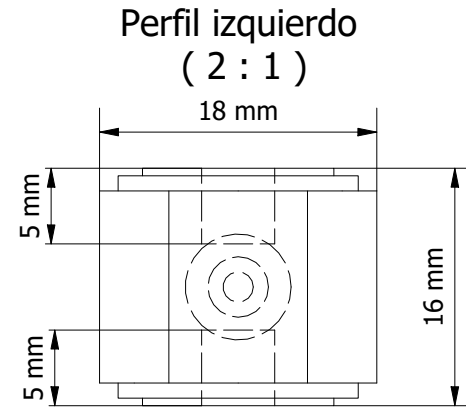
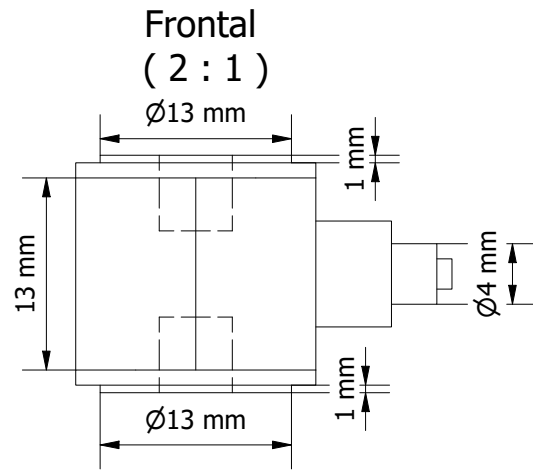
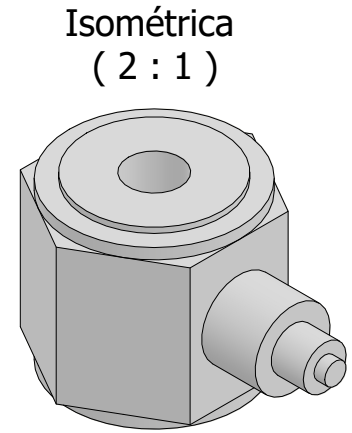
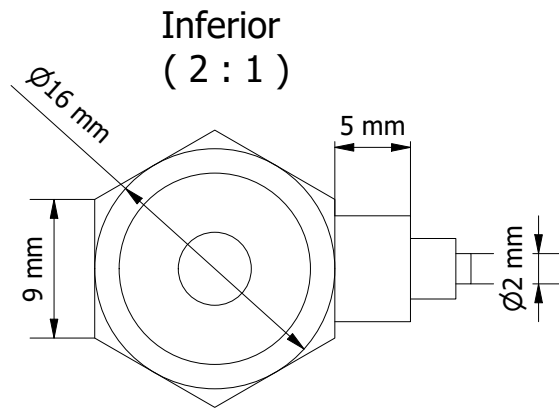
Tabla B.1 Características geométricas y masa de probetas ID 1–50.

ID	Diámetro [mm]	Altura [mm]	Razón aspecto	Masa [g]	Comentario
1	12.91	13.18	0.9795	4.0482	No se ensayo correctamente
2	12.80	11.80	1.0847	3.6834	Ideal
3	12.70	12.57	1.0103	3.7948	Ideal
4	12.91	12.65	1.0206	4.1822	Ideal
5	13.07	11.74	1.1133	3.5252	No cumple relación aspecto
6	12.92	11.84	1.0912	4.0057	Ideal
7	12.92	11.72	1.1024	3.7997	Ideal
8	13.06	12.81	1.0195	4.1785	Ideal
9	13.05	11.83	1.1031	3.6770	Ideal
10	13.03	13.02	1.0008	4.0786	Ideal
11	12.98	13.16	0.9863	3.9585	Ideal
12	13.12	13.11	1.0008	4.2841	Ideal
13	13.03	11.84	1.1005	3.8098	Ideal
14	13.21	12.41	1.0645	3.8702	Ideal
15	13.12	12.69	1.0339	4.2770	Ideal
16	12.85	13.61	0.9442	4.4692	No se fracturo!
17	12.92	13.80	0.9362	4.2323	Ideal
18	13.00	13.55	0.9594	4.4367	Ideal
19	13.13	13.24	0.9917	4.2434	Ideal
20	13.07	13.64	0.9582	4.1129	Porosidad grave
21	12.85	11.55	1.1126	3.0514	Porosidad grave
22	12.91	12.00	1.0758	3.7872	Porosidad grave
23	12.87	12.23	1.0523	3.8443	Ideal
24	12.89	11.85	1.0878	3.3567	Ideal
25	13.06	12.00	1.0883	3.4761	Ideal
26	12.88	12.52	1.0288	3.7435	Ideal
27	13.00	12.09	1.0753	3.4269	Ideal
28	13.10	12.51	1.0472	3.7224	Ideal
29	13.10	12.92	1.0139	4.1089	Ideal
30	13.11	12.44	1.0539	4.1745	No se fracturo!
31	12.98	12.75	1.0180	4.0083	Pequeña falta de material
32	13.01	12.75	1.0204	4.3470	Tiene una línea diametral marcada
33	13.01	10.87	1.1969	3.3632	No cumple relación aspecto
34	13.05	11.87	1.0994	3.8359	Leve fisura
35	13.04	12.60	1.0349	3.7604	Caras no completamente paralelas
36	13.16	13.03	1.0100	4.1053	Ideal
37	13.34	11.14	1.1975	3.5206	No cumple relación aspecto
38	13.02	13.02	1.0000	4.3215	Ideal
39	13.17	10.43	1.2627	3.4844	No cumple relación de aspecto
40	13.12	12.98	1.0108	3.8643	Tiene un leve grieta
41	12.92	10.80	1.1963	3.5237	Ideal
42	12.96	12.15	1.0667	3.4599	Ideal
43	13.01	12.50	1.0408	3.7160	Caras no completamente paralelas
44	12.98	12.60	1.0302	3.8283	tiene marcada una línea al medio
45	12.97	11.29	1.1488	3.4157	No cumple relación aspecto
46	13.07	12.04	1.0855	3.7733	Ideal
47	13.08	13.42	0.9747	4.3050	fisura al medio, leve
48	13.04	12.20	1.0689	3.9292	Leve fisura
49	13.12	12.06	1.0879	3.7742	Ideal
50	12.96	12.14	1.0675	3.7468	Muesca en una cara

Tabla B.2 Características de las muestras del ID 51 al 101.

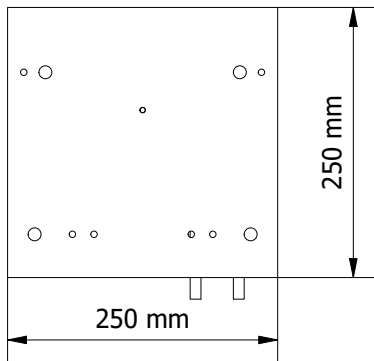
ID	Diámetro [mm]	Altura [mm]	Razón aspecto	Masa [g]	Comentario
51	13.08	12.47	1.0489	3.9891	Ideal
52	13.05	12.55	1.0398	3.8710	Ideal
53	13.03	13.08	0.9962	4.1085	Ideal
54	13.11	13.08	1.0023	4.1491	Ideal
55	13.17	12.44	1.0587	3.7814	Ideal
56	13.05	12.69	1.0284	3.9503	Le falta material
57	13.05	11.94	1.0930	3.7167	Ideal
58	13.08	12.90	1.0140	3.9866	Pequeña grieta
59	12.82	12.82	1.0000	3.6798	Porosidad notoria
60	13.08	12.16	1.0757	3.5795	Ideal
61	13.06	12.70	1.0283	3.9393	Porosidad notoria
62	13.02	11.97	1.0877	3.7511	Grietas superficiales
63	13.13	12.92	1.0163	4.2607	Ideal
64	13.12	13.20	0.9939	3.7501	Tiene un agujero en su interior
65	13.06	12.67	1.0308	4.0666	Se ve un poco poroso
66	13.12	12.88	1.0186	4.0341	Ideal
67	12.95	13.39	0.9671	4.2325	Ideal, leves grietas
68	12.93	12.21	1.0590	3.9139	Ideal
69	12.83	12.85	0.9984	4.2147	Le falta un poco de material
70	12.84	13.82	0.9291	4.3356	Ideal
71	13.18	13.05	1.0100	4.0713	Grieta en una esquina
72	12.78	13.24	0.9653	4.1515	Ideal
73	12.97	14.12	0.9186	4.3091	Le falta de material en una esquina
74	12.91	13.76	0.9382	4.3390	Ideal
75	13.37	10.71	1.2484	3.4261	Ideal porosidad leve
76	12.84	11.47	1.1194	3.3816	No cumple con relación de aspecto
77	13.09	9.49	1.3793	3.0156	No cumple con relación de aspecto
78	13.02	12.84	1.0140	4.0403	Ideal
79	12.95	13.45	0.9628	4.2205	Ideal
80	13.10	13.02	1.0061	4.0159	Tiene un agujero
81	12.60	12.51	1.0072	3.6736	Ideal
82	13.15	13.30	0.9887	4.3260	Ideal
83	13.05	13.27	0.9834	4.1805	Le falta material en una esquina
84	13.17	13.52	0.9741	4.2990	Le falta de material en una esquina
85	12.91	13.47	0.9584	4.3950	Tiene una grieta marcada en un borde
86	13.15	13.17	0.9985	3.8907	Ideal
87	12.99	13.94	0.9319	4.3598	Ideal
88	12.81	13.77	0.9303	3.9756	Le falta considerable de material
89	13.10	12.81	1.0226	3.9546	Ideal
90	12.81	12.14	1.0552	3.5379	Ideal
91	12.46	12.50	0.9968	3.4490	Ideal
92	12.82	12.84	0.9984	3.9076	Ideal
93	13.12	12.59	1.0421	3.7542	Ideal
94	12.71	13.48	0.9429	3.9584	Ideal
95	13.05	12.92	1.0101	4.1305	No se fracturó
96	12.97	11.19	1.1591	3.3466	No cumple con la relación de aspecto
97	13.22	13.91	0.9504	4.0516	Ideal
98	12.98	13.76	0.9433	3.7209	Ideal
99	13.25	13.10	1.0115	3.7684	Ideal
100	12.96	12.83	1.0101	3.8658	Ideal
101	13.26	13.25	1.0008	3.9775	Ideal

C. Planos

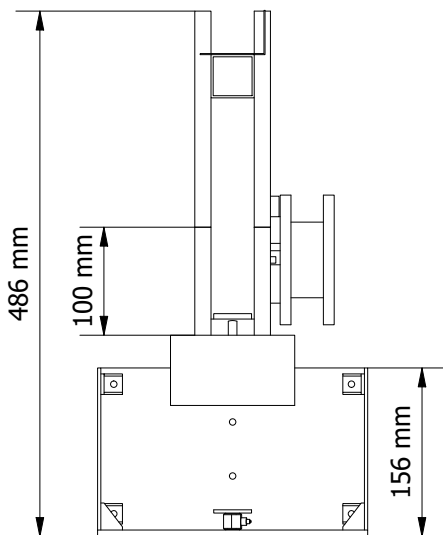


FECHA 09/07/25	 UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica		
CONTENIDO PCB C05		DIBUJADO POR Gonzalo Mella S.	
		REVISADO POR	
PROYECTO Memoria de Título	PLANO N° 1	ESC 2 : 1	

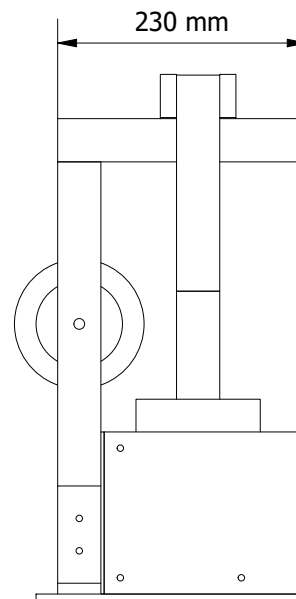
Inferior (1 : 7)



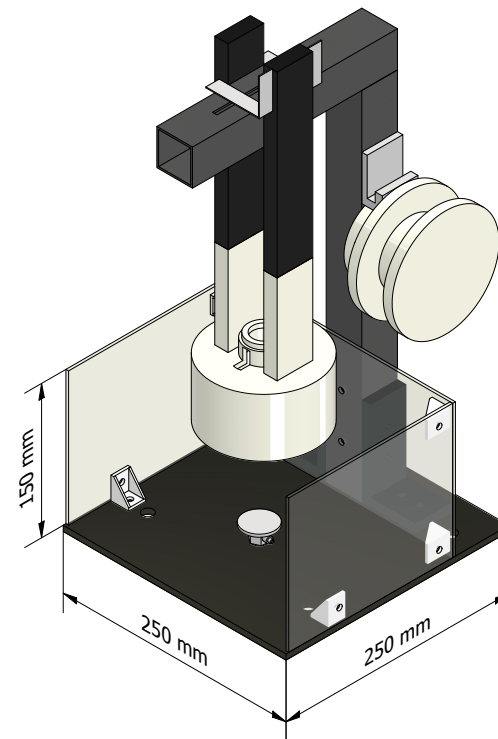
Frontal (1 : 7)



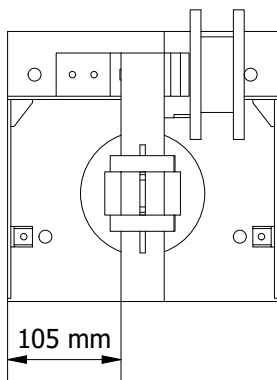
Perfill izquierdo (1 : 7)



Isométrica (1 : 6)



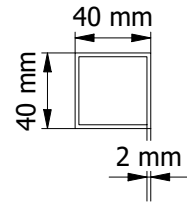
Planta (1 : 7)



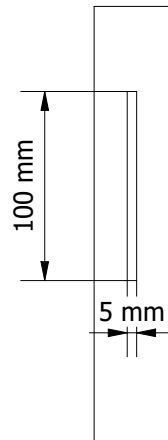
FECHA 09/07/25	 UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica		
CONTENIDO Banco de ensayo DWT	DIBUJADO POR Gonzalo Mella S.		REVISADO POR
	PROYECTO Memoria de Título	PLANO N° 2	ESC 1 : 6
			

Isométrica (1 : 4)

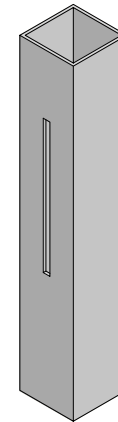
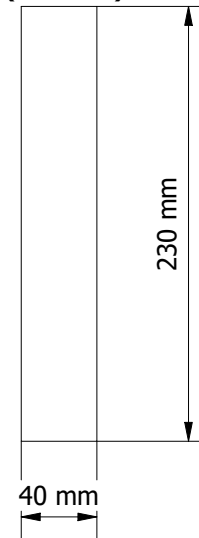
Inferior (1 : 4)



Frontal (1 : 4)



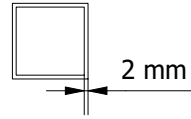
Lateral izquierdo (1 : 4)



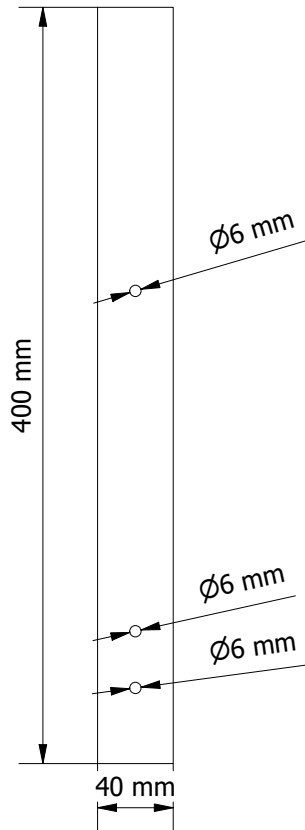
FECHA 09/07/25	 UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica 		
CONTENIDO Perfil acero transversal	DIBUJADO POR Gonzalo Mella S.		
	REVISADO POR		
PROYECTO Memoria de Titulo	PLANO N° 3	ESC 1 : 4	

Isométrica (1 : 4)

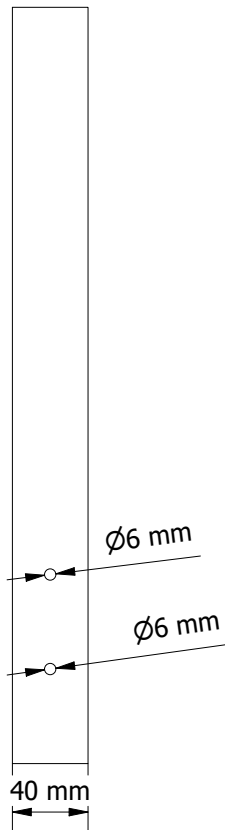
Inferior (1 : 4)



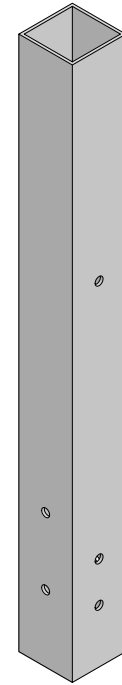
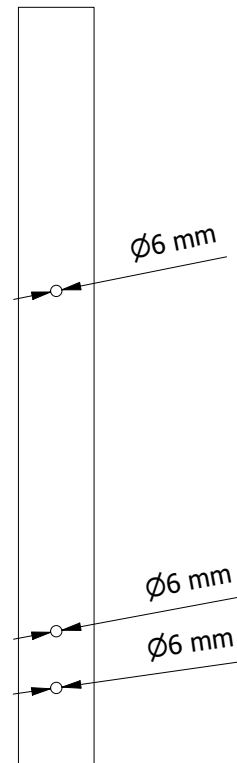
Lateral De.
(1 : 4)





Frontal (1 : 4)

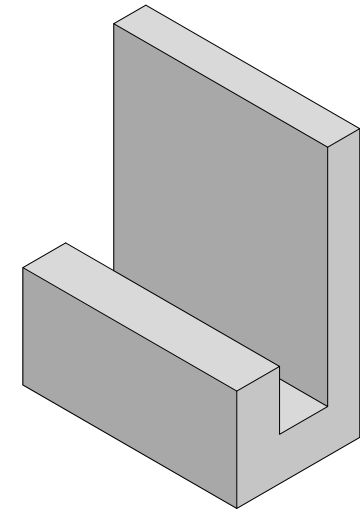


Lateral Iz.
(1 : 4)

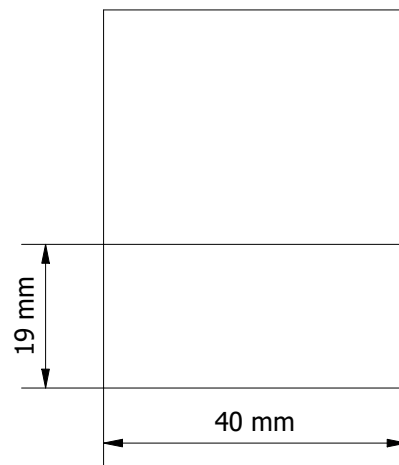


FECHA 09/07/25	 UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica		
CONTENIDO Perfil acero vertical	DIBUJADO POR Gonzalo Mella S.		REVISADO POR
	PROYECTO Memoria de Titulo		
PLANO N° 4	ESC 1 : 4		

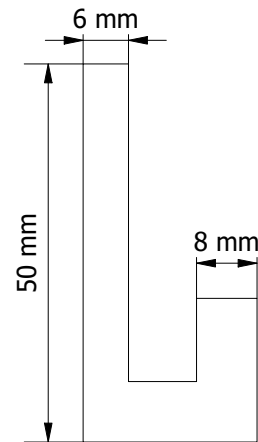
Isométrica (1 : 1)



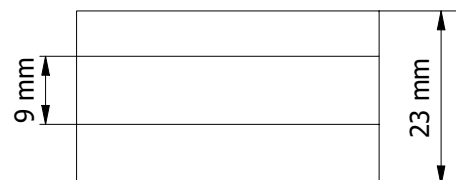
Frontal (1 : 1)





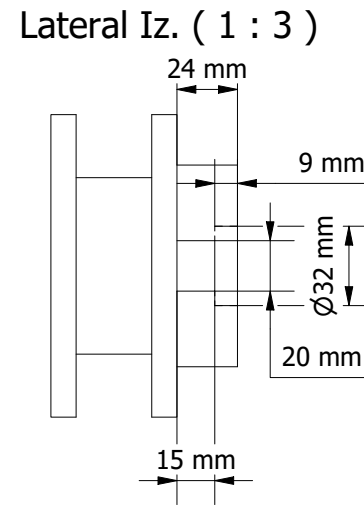
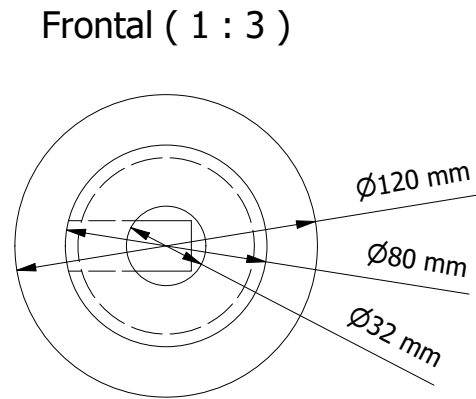
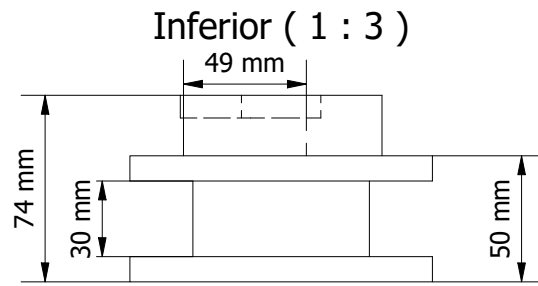
Perfil Iz. (1 : 1)



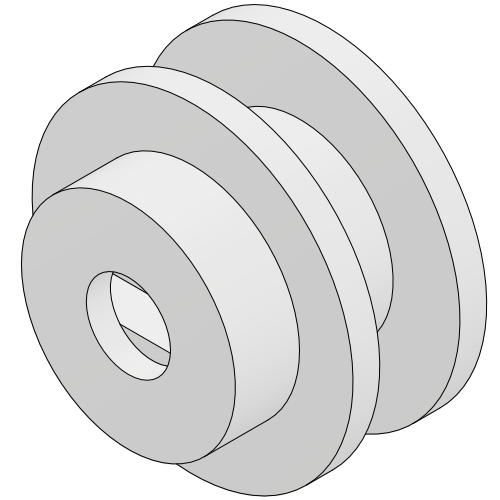
Planta (1 : 1)






FECHA 09/07/25	 UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica		
CONTENIDO Sistema de freno para cable		DIBUJADO POR Gonzalo Mella S.	
		REVISADO POR	
PROYECTO Memoria de Título	PLANO N° 5	ESC 1 : 1	

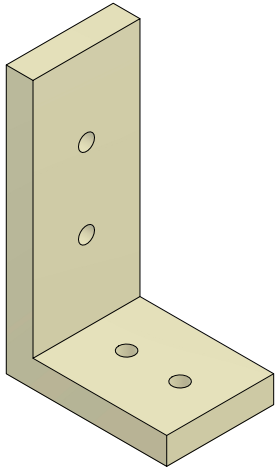


Isométrica (1 : 2)

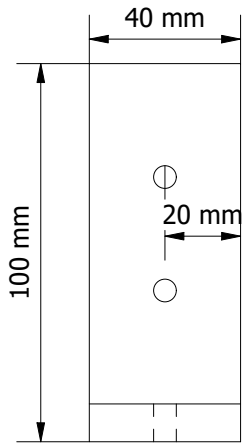
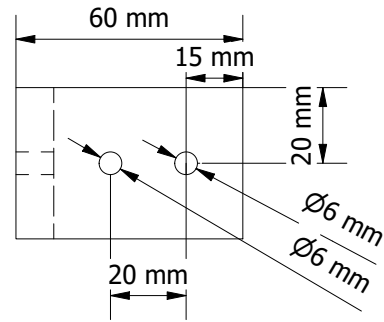


FECHA 09/07/25	 UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica		
CONTENIDO Enrollar cable		DIBUJADO POR Gonzalo Mella S.	
		REVISADO POR	
PROYECTO Memoria de Título	PLANO N° 6	ESC 1 : 2	

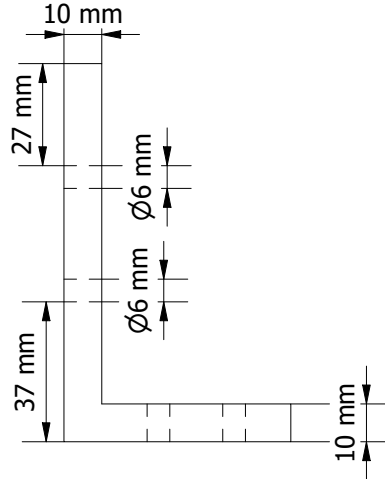
Isométrica (1 : 2)



Inferior (1 : 2)

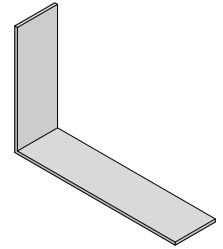


Lateral De. (1 : 2)

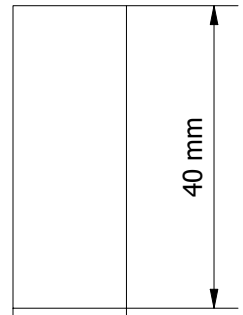


Frontal (1 : 2)

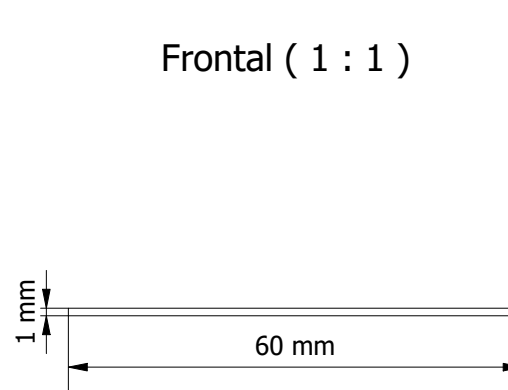
Isométrica (1 : 2)



Lateral Iz. (1 : 1)



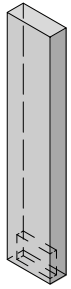
Frontal (1 : 1)



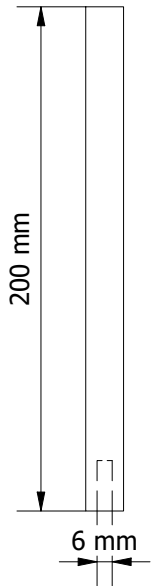
Planta (1 : 1)

FECHA 09/07/25	 UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica
CONTENIDO Soportes de perfil de acero y alineador de soporte electroiman	DIBUJADO POR Gonzalo Mella S. REVISADO POR
PROYECTO Memoria de Título	PLANO N° 7
ESC 1 : 2	

Isométrica (1 : 5)



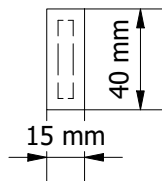
Frontal (1 : 3)



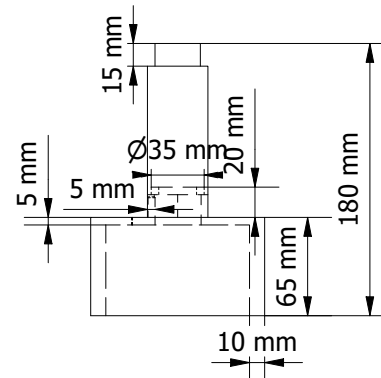
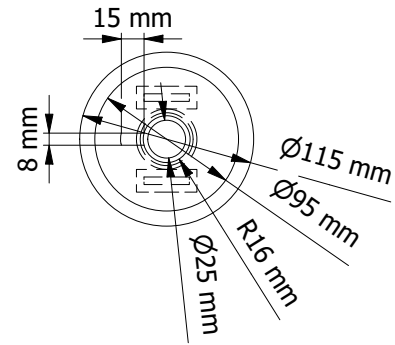
Lateral Iz. (1 : 3)



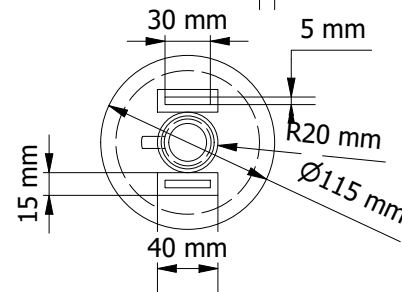
Planta (1 : 3)



Inferior (1 : 5)

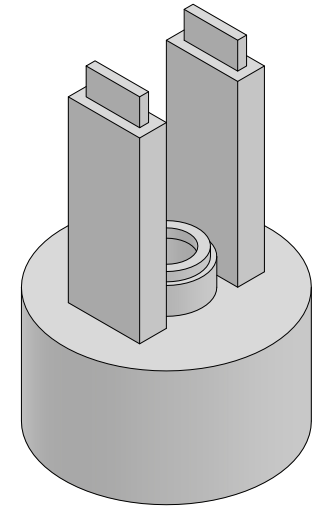


Frontal (1 : 5)



Planta (1 : 5)

Isométrica (1 : 3)



FECHA

09/07/25



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Mecánica



CONTENIDO

Piezas soporte electroiman

DIBUJADO POR

Gonzalo Mella S.

REVISADO POR

PROYECTO

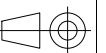
Memoria de Titulo

PLANO Nº

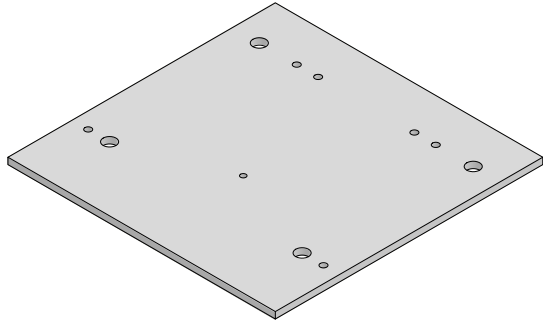
8

ESC

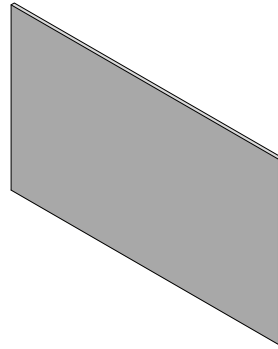
1 : 3



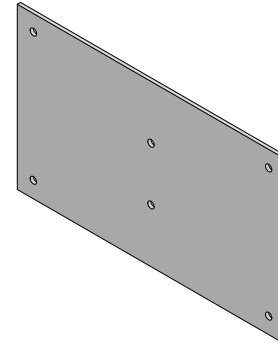
Isométrico placa acero
(1 : 5)



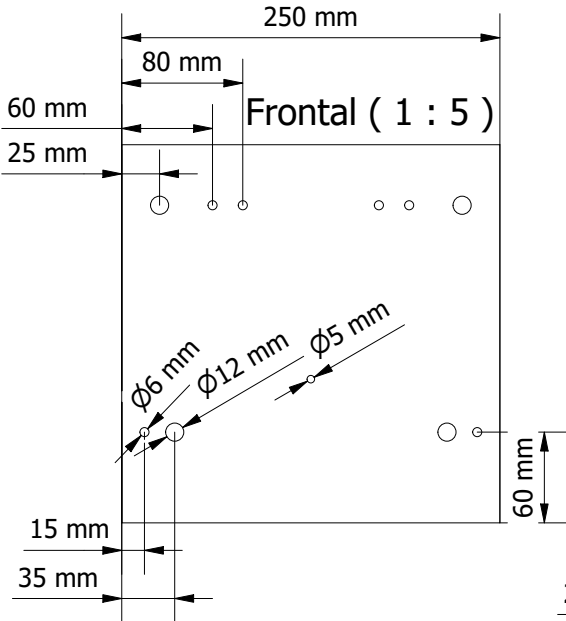
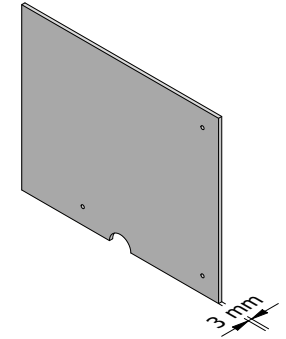
Acrilico frente barra (1 : 5)



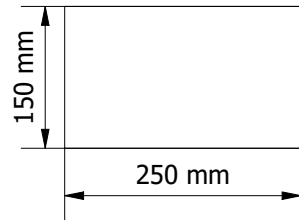
Isométrico unido barra (1 : 5)



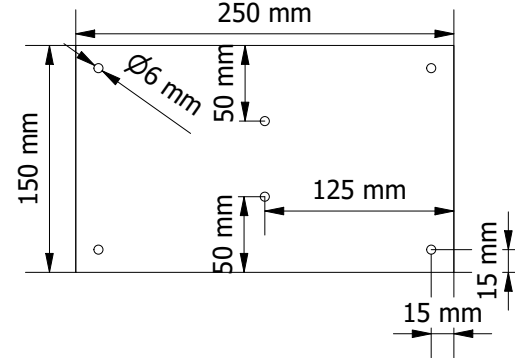
Isométrico (lateral)
(1 : 5)



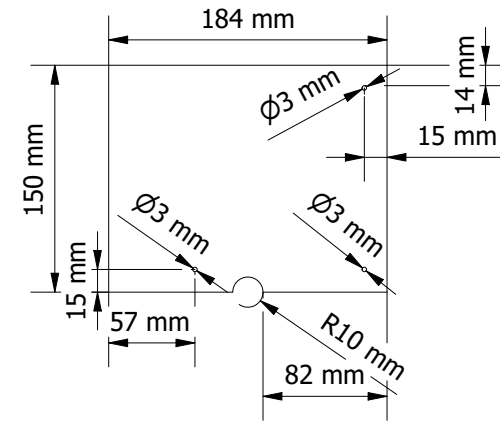
Frontal (1 : 8)



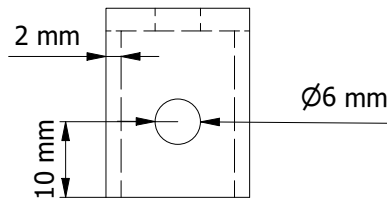
Frontal (1 : 5)



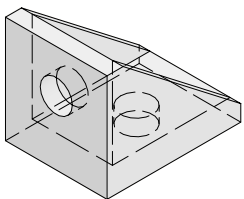
Frontal (1 : 5)



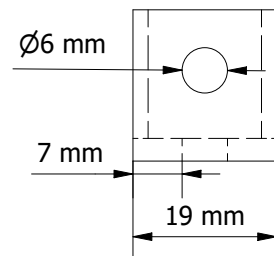
Inferior (1:1)



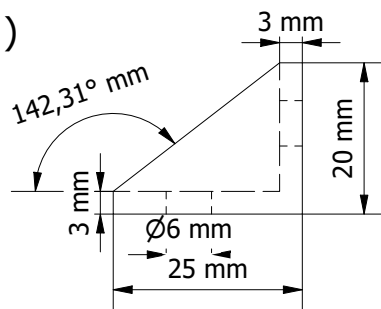
Isométrica (1:1)



Frontal (1:1)

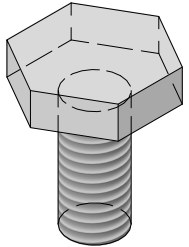


Lateral Iz. (1:1)

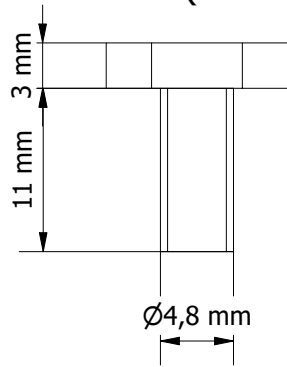


FECHA 09/07/25	 UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica		
CONTENIDO Acrilico lateral, acrilico frontal, acrilico unido a barra, soporte acrilico, placa acero		DIBUJADO POR Gonzalo Mella S.	
PROYECTO Memoria de Titulo		PLANO N° 9	ESC 1 : 5
			

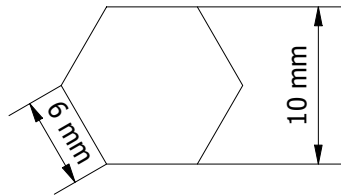
Isométrico perno (2 : 1)



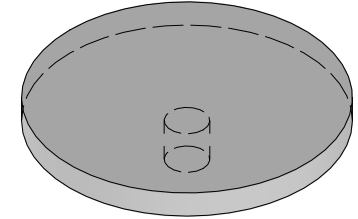
Frontal (2 : 1)



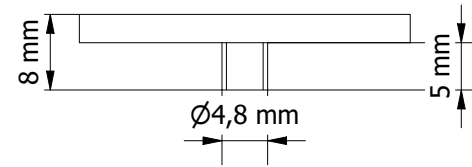
Planta (2 : 1)



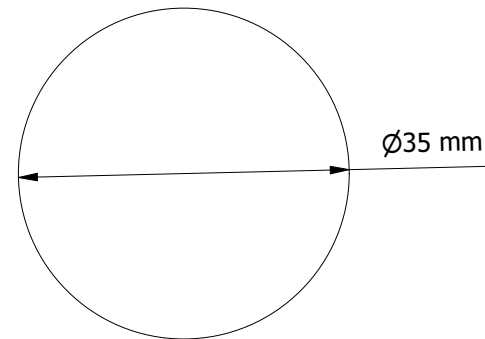
Isométrica placa (1 : 0.8)



Frontal (1:0.8)



Planta (1:0.8)



FECHA 09/07/25	 UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica		
CONTENIDO Uniones a sensor PCB C05	DIBUJADO POR Gonzalo Mella S.		REVISADO POR
	PROYECTO Memoria de Titulo	PLANO N° 10	ESC 1 : 0.8
			