



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



Diseño y fabricación de una celda de impacto para ensayos de fractura

Vicente Vega Vivero

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 Merino

Marzo 2026
Concepción (Chile)

© 2026 Vicente Vega Vivero

© 2026 Vicente Vega Vivero

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

Agradecimientos

A continuación, voy a dar agradecimientos a las personas que me ayudaron, guiaron y acompañaron durante mi formación profesional. Y también personas que me ayudaron durante el desarrollo de esta memoria de título.

Para comenzar le doy gracias al profesor Manuel Moncada. El cual, mediante su asignatura de simulación por elementos discretos cautivo mi interés en sus proyectos, y que como profesor guía me ayudo durante todo el proceso mediante reuniones de trabajo, aclarando dudas y aportando conocimiento sobre el tema. También a Carlos Medina por permitir la fabricación del banco de ensayos en el taller mecánico, donde ahí conocí a los maestros del taller Rodrigo Moreno y Mario Ramírez. En especial a don Rodrigo por su gran ayuda en la fabricación del banco de ensayos y sus enseñanzas sobre los procesos de fabricación.

A mis compañeros de universidad y compañeros que me ayudaron en la realización del proyecto. Gonzalo Mella y Emilio López. Quienes me ayudaron en la fabricación del banco de ensayos, probetas y ensayos. En especial a Gonzalo quien me ayudo y apporto con sus conocimientos de su memoria de título, y que seguirá utilizando y adaptando el banco de ensayos en el futuro. Y a Sebastián Fernández por la ayuda en las conexiones electrónicas de los strain gage. Gracias a ANID/FONDECYT por el financiamiento de este proyecto, por medio de los fondos de iniciación FONDECYT N°11251676.

Finalmente, y no menos importante a mi grupo de amigos cercanos que llevo desde el colegio, quienes algunos siguieron estudiando en la universidad de concepción y acompañándome durante todos estos años. Y a mi familia, especialmente mis padres quienes siempre se preocuparon desde que entre a la universidad y que me han acompañado durante mi formación profesional.

Resumen

La conminución de mineral en la industria minera conlleva una gran cantidad de consumos energético, por esto el propósito de esta investigación radica en la caracterización de la energía de fractura de minerales y parámetros de la fractura utilizando mediciones experimentales para optimizar la eficiencia energética de la maquinaria utilizada en los procesos de conminución.

Para caracterizar la fractura de minerales se realizó el diseño y fabricación de un banco de ensayos Ultra Fast Load Cell (UFLC). Esta celda de impacto combina el sistema de medición de la barra Hopkinson (SHPB), el cual utiliza strain gages para obtener los parámetros de fractura, mediante la medición de la onda de deformación propagada por el impacto de una partícula a través de la barra. Este impacto es generado por un banco de ensayos Drop Weight Test (DWT), el cual libera una bola de acero utilizando un electroimán a una altura determinada. Esta altura determina la velocidad del impacto, esta velocidad se puede configurar mediante el cambio de altura usando un perfil apernado.

Los ensayos experimentales se realizaron con solo el impacto de la bola, esto para realizar una calibración de las mediciones obtenidas por los strain gage y observar el error porcentual con el impacto teórico. También se prepararon probetas de concreto cilíndricas de un diámetro de 13 mm y se seleccionaron probetas de cuarzo en un rango de tamaño de (13,2 mm – 16 mm). Donde se realizaron ensayos de fractura para determinar la energía de fractura primaria de los minerales.

El desarrollo del banco de ensayos permite analizar el comportamiento de los minerales durante su fractura, contribuyendo significativamente a estudios de fractura de minerales y simulaciones numéricas. La celda de impacto también permite realizar análisis comparativos de los resultados obtenidos con distintos bancos de ensayos utilizados para caracterizar la fractura de tanto el cuarzo como distintos minerales.

Palabras clave: conminución, energía específica de fractura, ensayo de impacto, celda de carga.

Abstract

Comminution of mineral ore in the mining industry involves a significant amount of energy consumption. Therefore, the purpose of this research is to characterize the fracture energy of minerals and fracture parameters using experimental measurements to optimize the energy efficiency of machines used in comminution processes.

To characterize the fracture of minerals an Ultra Fast Load Cell (UFLC) test bench was designed and manufactured. This impact cell uses a Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) as a measurement system, using strain gages to obtain fracture characteristics, this from the measurement of the particle impact wave propagation through the bar. This impact is done by a Drop Weight Test (DWT), which drops a steel ball using an electromagnet from a specific height. This height determines the impact velocity; this velocity can be configured by changing the height of the drop weight using a bolted profile.

Experimental tests were carried out considering only the impact of the ball, with the aim of calibrating the measurements obtained from the strain gauges and evaluating the percentage error compared to the theoretical impact. Additionally, cylindrical concrete specimens with a diameter of 13 mm were prepared, and quartz samples within a size range of 13.2 mm to 16 mm were selected. Fracture tests were performed on these minerals to determine the primary fracture energy of the analyzed minerals.

The development of the test bench allows for the analysis of the behavior of minerals during fracture, contributing to the study of fracture mechanisms and the validation of numerical simulation. The impact load cell enables comparative analyses between the obtained results with those using other test benches designed to characterize the fracture of quartz and other minerals.

Keywords: comminution, specific fracture energy, impact test, load cell.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos	iv
Lista de Tablas	v
Lista de Figuras	vi
Nomenclatura	vii
1 . Introducción	1
1.1 Contextualización	1
1.2 Estado del arte	2
1.3 Objetivos.....	6
1.4 Condiciones de diseño	6
1.5 Metodología.....	7
2 . Marco teórico	8
3 . Metodología experimental.....	11
3.1 Diseño y fabricación del banco de ensayos de impacto	11
3.2 Instalación y montaje banco de ensayos.....	14
3.3 Calibración mediciones experimentales	20
3.4 Preparación probetas de ensayo.....	20
3.4.1 Probetas de concreto	21
3.4.2 Probetas de cuarzo	22
4 . Resultados	23
4.1 Calibración sistema de medición ensayos solo bola.....	23
4.2 Ensayos de fractura.....	26
4.2.1 Resultados fractura probetas de concreto	27
4.2.2 Resultados fractura probetas de cuarzo.....	29
5 . Conclusiones	33
Referencias	34
Anexo A. Probetas ensayadas	36
Anexo B. Planos de fabricación	38

Lista de Tablas

Tabla 1.1. Características barra Hopkinson de distintas instituciones [15]	3
Tabla 3.1. Lista de componentes banco de ensayos UFLC.....	13
Tabla 3.2. Propiedades mecánicas barra de acero AISI 4340 [28]	15
Tabla 3.3. Propiedades de medición strain gage	18
Tabla 4.1. Energía potencial experimental ensayos con solo la caída de la bola de acero	25

Lista de Figuras

Figura 1.1: Tipos de celdas de impacto para fractura de partículas	3
Figura 1.2: Diagrama de la metodología del proyecto de investigación	7
Figura 2.1: Diagrama ensayo de caída de bola (DWT) [25]	9
Figura 3.1: Diagrama de componentes banco de ensayos UFLC	11
Figura 3.2: Diseño banco de ensayos UFCL en Inventor	12
Figura 3.3: Estructura soporte con bujes de la barra	14
Figura 3.4: Banco de ensayos DWT.....	14
Figura 3.5: Banco de ensayos UFLC	16
Figura 3.6: Estructura soporte banco de ensayos	17
Figura 3.7: Conexiones electrónicas strain gage banco de ensayos UFLC.....	18
Figura 3.8: Diagrama electrónico componentes de medición	19
Figura 3.9: Moldes y fabricación probetas de concreto	21
Figura 3.10: Molde para fabricación de probetas de concreto [29]	22
Figura 3.11: Selección y muestras de probetas de cuarzo	22
Figura 4.1: Señal de voltaje ensayos de calibración con solo bola	23
Figura 4.2: Señal de voltaje medida y filtrada de ensayos de calibración con solo bola	24
Figura 4.3: Fuerza en el tiempo ensayos de impacto solo bola.....	25
Figura 4.4: Ensayos de fractura probetas de cuarzo	26
Figura 4.5: Ensayos de fractura probetas de concreto.....	26
Figura 4.6: Fuerza en el tiempo fractura primaria ensayos de concreto	27
Figura 4.7: Distribución de probabilidad acumulada energía de fractura primaria del concreto	28
Figura 4.8: Fuerza en el tiempo fractura completa ensayo de cuarzo Q20	29
Figura 4.9: Fuerza en el tiempo fractura primaria ensayos de cuarzo.....	30
Figura 4.10: Distribución de probabilidad acumulada energía de fractura primaria del cuarzo	31
Figura 4.11: Comparación distribución de probabilidad acumulada energía de fractura primaria del mineral de cuarzo y cobre [30].....	32

Nomenclatura

A_r	:	Área de la sección transversal de la barra (m^2)
C	:	Velocidad de propagación de la onda ($m s^{-1}$)
d_p	:	Diámetro de partícula (m)
E	:	Módulo de elasticidad (GPa)
E'	:	Energía de fractura de la partícula (J)
E_m	:	Energía específica de fractura de la partícula ($J kg^{-1}$)
F	:	Fuerza (N)
f	:	Frecuencia (Hz)
g	:	Aceleración de gravedad ($m s^{-2}$)
GF	:	Factor del strain gage (-)
h_o	:	Altura inicial de caída (m)
l	:	Largo de la barra (m)
m_b	:	Masa de la bola (kg)
m_p	:	Masa de partícula (g)
N	:	Numero de ensayos validos (-)
R	:	Resistencia (Ω)
t	:	Tiempo (s)
u	:	Desplazamiento (m)
V	:	Voltaje (V)
v_o	:	Velocidad inicial ($m s^{-1}$)
α	:	Deformación local de la fractura (m)
ρ	:	Densidad ($kg m^3$)
σ	:	Esfuerzo (MPa)
ε	:	Deformación unitaria (m)
Δ	:	Deformación de partícula (m)
DEM	:	Discrete Element Method
DWT	:	Drop Weight Test
PIB	:	Producto Interno Bruto
PFLC	:	Piezoelectric Fast Load Cell
PRC	:	Precision Rolls Crusher
RBT	:	Rotatory Breakage Test
SILC	:	Short Impact Load Cell
SHPB	:	Split Hopkinson Pressure Bar
UCS	:	Unconfined Compressive Strength
UFLC	:	Ultra Fast Load Cell

1. Introducción

1.1 Contextualización

Chile es un país que cuenta con una gran cantidad de recursos naturales utilizados para la distribución de materia prima, dentro de estos se encuentra el cobre, el cual es un mineral de alta importancia para los avances tecnológicos y la industria minera internacional. La industria chilena del cobre representa la mayor cantidad de exportaciones y el 90% de su producción nacional corresponde a este mineral [1]. A lo largo de los años esto conllevó impactos importantes en el crecimiento económico del país, donde a pesar de la economía fluctuante de la materia prima, desde los años 90 y la actualidad el cobre ha aportado significativamente a los ingresos fiscales del país y la económica nacional siendo responsable del 10% del producto interno bruto (PIB) en Chile durante estos años y más en la actualidad [2-6].

Dentro de los distintos procesos de la industria minera se encuentra la conminución, este proceso consiste en la disminución del tamaño mediante la trituración y molienda de los minerales utilizando chancadores y molinos. Estas máquinas tienen un alto consumo de energía utilizado para la fractura del material, donde se estima que para operaciones mineras el 39% de la energía se utiliza para el procesamiento del mineral, el cual 75% corresponde a los procesos de conminución. Debido a esto es necesario optimizar los procesos para disminuir la cantidad de energía utilizada considerando las propiedades de fractura primaria del mineral [7,8].

Para la caracterización de parámetros de la fractura se realizan ensayos tales como el Drop Weight Test (DWT), Rotary Breakage Tester (RBT), Unconfined Compressive Strength (UCS), entre otros. Estos ensayos, evalúan la energía mínima de fractura mediante la medición de la resistencia y deformación del material y se determinan parámetros de entrada para distintos modelos, como los requeridos en los modelos de fractura utilizados en simulaciones de partículas con el método de elementos discretos (DEM). Distintos estudios han desarrollado modelos de fractura orientados a máquinas específicas, esto caracterizando procesos de conminución de chancadores, molinos, rodillos entre otros. Esto requiriendo de un gran costo económico y experimental para la caracterización de máquinas individuales, lo cual se puede optimizar utilizando los bancos de ensayos de fractura de partículas individuales mencionados anteriormente. Esto reduciendo el costo significativamente de la caracterización de la conminución de distintos procesos. Por esto la importancia de este trabajo, donde se realiza el estudio de un banco de ensayo de fractura y una comparación experimental de los resultados obtenidos para distintas configuraciones de impacto, mediciones y minerales, de esta forma aportando a la investigación de la fractura y procesos de conminución de la industria minera [9].

1.2 Estado del arte

La implementación de ensayos experimentales de fractura de mineral se ha utilizado para obtener parámetros característicos requeridos en el uso de modelos de conminución para simulaciones numéricas. Los ensayos experimentales se han realizado principalmente usando una partícula, esto debido a que el comportamiento de la fractura en distintas condiciones se puede relacionar a los ensayos individuales, a pesar de las diferencias que presentan los ensayos de múltiples partículas [10,11].

Dentro de los bancos de ensayos experimentales se encuentra el ensayo Drop Weight Test, el cual consiste en la caída de una bola de acero con masa y altura específica para lograr la fractura de una probeta de cierto material con el fin de obtener su energía de fractura, las masas utilizadas varían entre 2,8 kg hasta 49,8 kg y permiten obtener energías de fractura de valores entre 0,1 kWh/t hasta 2,2 kWh/t y la velocidad de impacto del ensayo se obtiene a través de la velocidad potencial relacionando la altura de caída de la bola. El ensayo RBT utiliza máquinas rotatorias de impacto vertical, trituradoras y pulverizadores para la caracterización de la fractura. Este ensayo utiliza la energía cinética mediante el accionamiento de un rotor el cual dispara rocas a una estructura circunferencial que genera un impacto perpendicular en las partículas, esto a diferencia del ensayo DWT necesita de una menor cantidad de energía para la fractura, debido a la teoría de contacto de Hertz donde en el ensayo DWT se distribuye la energía en dos puntos de contacto y en el RBT en solo un punto de contacto. En el ensayo de compresión uniaxial (UCS) el mineral se posiciona entre dos placas planas y es presionado hasta que ocurra la primera fractura del material, donde se obtiene la energía absorbida a través de la curva esfuerzo-deformación, este ensayo a diferencia de los otros tiene una velocidad controlada y menor para la fractura del material lo cual genera que el mecanismo de la fractura sea por la deformación más que por el impacto, por esto se concluye que este método predomina para la obtención de propiedades elásticas del material [9].

Para el diseño y fabricación del banco de ensayos se utilizará la fractura mediante el ensayo DWT, el cual utiliza una celda de impacto para la obtención de resultados, dentro de la literatura existen de distintos tipos, las cuales se diferencian principalmente por los componentes utilizados para la fractura, dimensionamiento de la estructura y las diferentes formas en la medición de los parámetros de fractura. Estas mediciones son realizadas mediante la combinación del ensayo de impacto DWT con barras Split-Hopkinson, las cuales han permitido el aumento de la investigación de la fractura, debido a su capacidad en la medición de fuerzas dinámicas de altas frecuencias para la obtención de parámetros de fractura de partículas. Ejemplos de celdas de impacto utilizadas se pueden observar en la Figura 1.1, las cuales se diferencian principalmente en su tamaño, sistema de mediciones y mecanismo de impacto. Estos bancos de ensayos pueden utilizar strain gages, sensores piezoeléctricos para el registro de las fuerzas durante el impacto, riel guía y caída de bola como percutores para la fractura del mineral. [12-14].

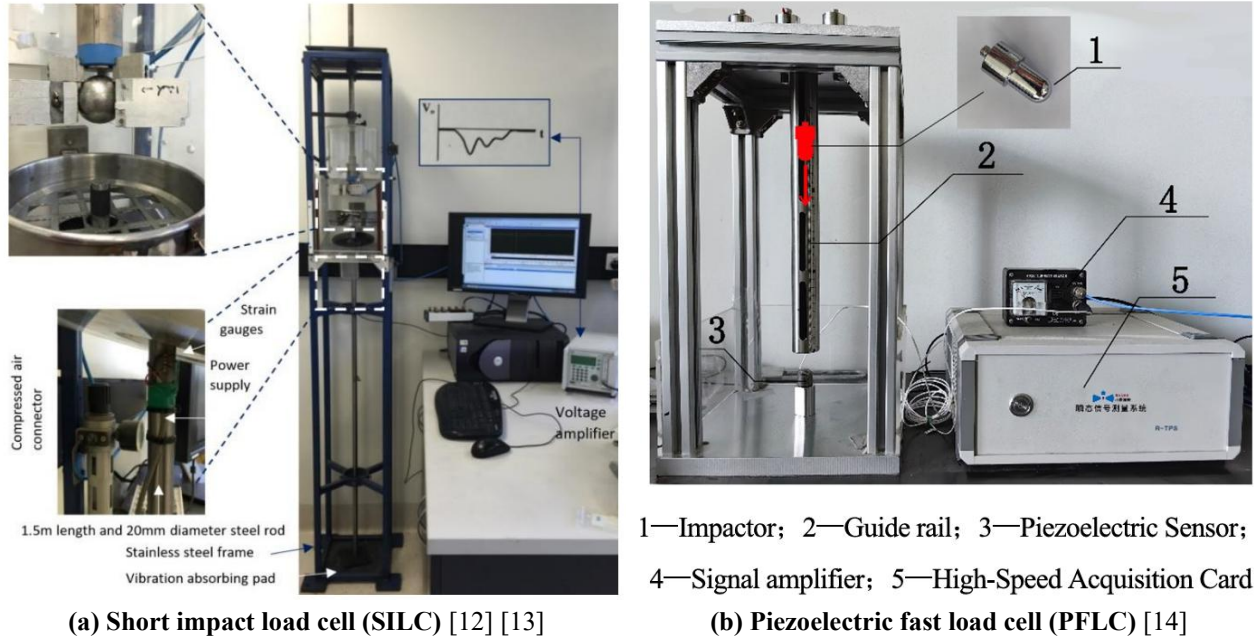


Figura 1.1: Tipos de celdas de impacto para fractura de partículas

En la Tabla 1.1 se muestran las características utilizadas en distintas versiones de la barra Hopkinson en ensayos de celda de impacto, dentro de estas se encuentran diferentes configuraciones para el largo de la barra, su diámetro y su orientación utilizada en el ensayo de fractura. Las cuales se utilizarán como referencia para el dimensionamiento del banco de ensayos [15-17].

Tabla 1.1. Características barra Hopkinson de distintas instituciones [15]

Institución	Largo [m]	Diámetro [mm]	Modelo	Resistencia [Ω]	Factor de galga [-]	Orientación SHPB
University of Utah, USA	4,9	19, 51	-	-	-	Vertical
CSIRO-DM, Australia	5,7	20, 60, 100	-	-	-	Vertical
	6,3	25,4				Horizontal
JKMRC, Australia	1.5	20	Kulite S/UGP- 1000-090	1000	155	Vertical
COPPE - UFRJ, Brazil	40	19, 63, 100	ESU-025 1000	1000	155	Vertical
	1,0	9.5				
ITR Roorke, India	3,0	65	HBM 1- LU11K1.6/350_E	350	1,98	Horizontal
Universidad de Santiago, Chile	1,2	20	TCAM BF350- 3AA	350	2,0 – 2,20	Horizontal

El primer diseño de la celda de impacto para ensayos de fractura se acredita a Weichert, el cual consideró el diseño teniendo como base la barra de presión Split-Hopkinson para la medición de propiedades de material y energía de fractura mediante los ensayos, la celda de impacto a diferencia de este mecanismo cambia la barra de impacto por un ensayo DWT y mantiene la barra Hopkinson para las mediciones, esta celda dependiendo de su tamaño puede ser mencionada como Ultra Fast Load Cell (UFLC) realizada por Tavares o como Short Impact Load Cell (SILC) siendo su versión de menor tamaño realizada por Bourgeois y Banini [12]. El principio de funcionamiento de este banco de ensayos consiste en la caída de una bola de acero en el material de estudio para su fractura, este mineral se encuentra posicionado en la parte superior de una barra de acero Hopkinson, la cual permite la medición de la deformación de la barra generada en el ensayo de impacto obtenida por strain gages. Esta señal se obtiene mediante la propagación de la onda de deformación a través del largo de la barra durante la fractura del mineral, la respuesta se captura por un osciloscopio y la frecuencia de la señal depende de la altura por donde se propaga la onda. Debido a esto se utilizan celdas de gran tamaño tipo UFLC, las cuales permiten registrar la señal con una mayor frecuencia de muestreo y reducir significativamente el retraso en el tiempo de la señal medida en comparación a la fractura real [14,15].

Desde entonces se han realizado cambios mediante nuevas tecnologías para la medición y calibración de componentes con el fin de obtener mejoras en el banco de ensayos, este es el caso de la celda Piezoelectric Fast Load Cell (PFLC). Esta tiene como objetivo principal encontrar un sustituto de la celda UFLC con menores costos de fabricación y facilidades prácticas en su traslado. Para su medición, usa un sensor piezoeléctrico y una guía lineal como objeto de impacto. Esto permitiendo una disminución considerable en el dimensionamiento del banco de ensayos y obteniendo resultados similares para la energía de la fractura, a pesar de esto los modelos de barra Hopkinson predominan en la investigación y calibración de estos parámetros debido a su alta resolución para ensayos con partículas finas [14].

Brown utilizó los datos de energía de impacto obtenidos en ensayos de celda UFLC para obtener el fractal de fragmentación de los minerales, esto mediante la fabricación de un banco de ensayos de fractura por doble impacto. Para los ensayos se utiliza un péndulo de impacto al material y un péndulo receptor montado en una placa que permite su movimiento, de esta forma se puede obtener el fractal de distintas rocas con análisis de imagen. Estos tipos de ensayos se utilizaron en el pasado para determinar características de conminución, pero quedaron obsoletos debido a su reemplazo por las nuevas tecnologías y el uso de celdas de fractura [20].

Dentro de la conminución se han investigado métodos que permitan reducir significativamente el tiempo de obtención de resultados para el comportamiento de fractura, esto debido a la gran cantidad de ensayos que se tienen que realizar dentro de una celda de fractura. Entre estos métodos se encuentran los Precision Rolls Crusher (PRC), los cual consisten en un molino de rodillos que monitorea y controla el torque aplicado durante la fractura de los minerales, estudios recientes indican que este método obtendría resultados similares a los de una celda SILC, permitiendo el uso de probetas de un peso de hasta 500 gramos y aumentando la cantidad de ensayos [7,13].

Tuczu realizó el diseño de una celda UFLC basándose en trabajos previos, donde utilizó una barra Hopkinson de un diámetro de 50 mm y una altura total de 5 metros, estas dimensiones de la barra

permiten una resolución de las mediciones de 2 microsegundos y una fuerza de 20 N, esto es de gran importancia debido a que el fenómeno de fractura ocurre en una duración total de 150 microsegundos. Estas mediciones provienen de la teoría de contacto de Hertz, donde se calcula la deformación de la barra mediante la propagación uniaxial de la onda por los esfuerzos generados en los puntos cercanos al contacto, la amplitud de esta onda depende de la presión ejercida por la bola y se mide mediante la señal de strain gages en la barra de acero, posicionándolos alrededor de la barra creando un puente de Wheatstone, donde estas señales medidas son transmitidas y amplificadas en un osciloscopio para luego conservar el set de datos en un computador para el postproceso de resultados [21-23].

Tavares y King realizaron estudios utilizando modificaciones de la barra Hopkinson en una celda UFLC, donde inicialmente observaron la fractura de distintos minerales utilizando un ensayo de caída de bola DWT y luego se realizaron cambios en el percutor del ensayo, donde a diferencia de una bola de acero se utilizó la caída libre una de barra de acero como objeto de impacto. Durante estos ensayos se realizaron las mediciones de la energía de fractura, rigidez y resistencia de las partículas, esto mediante el uso de strain gages en ambas barras y de un acelerómetro piezoeléctrico en la parte superior de la barra incidente, esto permitiendo una medición más precisa de la velocidad de impacto en el ensayo. Ensayos de distintos tamaños y minerales indicaron los efectos que tiene el tamaño de partícula con respecto a la resistencia y energía de fractura del mineral y explicado en el modelo de Griffith de fractura frágil. [24-26]

El estudio experimental de la fractura de partículas utilizando celdas de impacto tiene una gran relevancia en aplicaciones industriales donde existen procesos de conminución, donde los resultados obtenidos han sido aplicados directamente al diseño y eficiencia de chancadores. Dentro de los parámetros de fractura se han encontrado la energía específica de fractura, resistencia y rigidez de partículas de distintos materiales dentro de la industria minera, estos estudios han permitido evaluar la influencia de distintas variables en las características de la fractura tales como los tipos de esfuerzos generados por el contacto, intensidad de esfuerzos, tamaño y forma de partícula. A pesar de la gran relevancia de estos estudios existen una baja cantidad de bancos de ensayos documentados como se puede observar en la Tabla 1.1, lo cual limita la comparación experimental entre los distintos tipos de celdas de impacto y poder observar otras variables que afectan en las mediciones experimentales. También se tiene que una de las problemáticas principales de la celda de impacto es la necesidad de barras Hopkinson de gran tamaño para poder obtener mediciones de alta precisión, por esto la necesidad de encontrar alternativas en la forma de medición del fenómeno de fractura para facilitar el uso del banco de ensayos [15].

1.3 Objetivos

El siguiente trabajo tiene como objetivo general el diseño y fabricación de un banco de ensayos para la fractura por impacto del mineral de cuarzo, donde se tiene los siguientes objetivos específicos (OE):

- i. Diseñar un banco de ensayos para la fractura del mineral de cuarzo mediante una celda de carga de impacto.
- ii. Determinar la energía de fractura primaria, energía de conminución para la fractura del mineral de cuarzo.
- iii. Comparar los resultados experimentales con los obtenidos mediante otros bancos de ensayos en la literatura.

1.4 Condiciones de diseño

La celda de carga de impacto será diseñada considerando las limitaciones, mejoras y adaptaciones en base a los bancos de ensayos existentes, donde para la implementación del banco de ensayos se tienen las siguientes condiciones de diseño:

- i. Permitir el movimiento de la barra de acero solo en la dirección vertical mediante el uso de bujes en las uniones del eje con la estructura.
- ii. Medición de la deformación y fuerzas de impacto en la barra mediante strain gages utilizando un puente de Wheatstone, amplificador de señales y osciloscopio.
- iii. Limitaciones en el espacio físico de montaje de la estructura, donde se define una altura de 3 metros para la barra de acero y una altura máxima de 3,5 metros para el alto de la estructura completa.
- iv. Condiciones de seguridad, donde se utiliza una barrera de acrílico para prevenir accidentes mediante la caída de la bola de acero.
- v. Uso de un electroimán para el accionamiento del ensayo por caída de la bola y un perfil de acero cuadrado apernado para la configuración de la velocidad de impacto, esto mediante el cambio de la altura de caída del electroimán.
- vi. Uniones por soldadura para los perfiles de acero de la estructura principal, placa superior e inferior de la estructura, uniones apernadas para los perfiles soporte del eje y placas del ensayo DWT.

1.5 Metodología

Para la correcta implementación del banco de ensayos se realiza un previo análisis de los distintos bancos de ensayos, esto para observar las mejoras y limitaciones consideradas en el diseño en la literatura. Con esto se puede comenzar el diseño del banco de ensayos, donde se realizan planos de fabricación utilizando software AutoCAD Inventor, diagrama de instalación de los sensores y sus componentes para la medición de resultados. Teniendo el diseño completado se comienza la fabricación del banco de ensayos, donde se realiza la construcción en el laboratorio de procesos mecánicos y se ensambla la estructura dentro del laboratorio de vibraciones mecánicas. Donde para la estructura se realizan cortes de perfiles, uniones por soldaduras. Y para las mediciones se instalan strain gages soldados a la estructura, estos conectados a un puente de Wheatstone que entregan señales a un amplificador de señales para la obtención de deformaciones en la barra de acero. Teniendo el banco de ensayos terminado se pueden realizar los ensayos de fractura con el mineral de cuarzo, donde previo a esto se realiza una calibración de los componentes para verificar su precisión en las mediciones. También se realiza la preparación de las muestras, donde se seleccionan probetas de cuarzo y se fabrican muestras de concreto utilizando moldes de impresión 3D. Con esto se pueden realizar los ensayos de fractura mediante el accionamiento de un electroimán, y se puede regular la velocidad y altura de caída de la bola de impacto utilizando un perfil apernado. Finalmente se realiza un post procesamiento de los resultados experimentales, donde se obtienen los parámetros característicos de la fractura primaria del cuarzo. Esta metodología se puede observar en el diagrama de la Figura 1.2

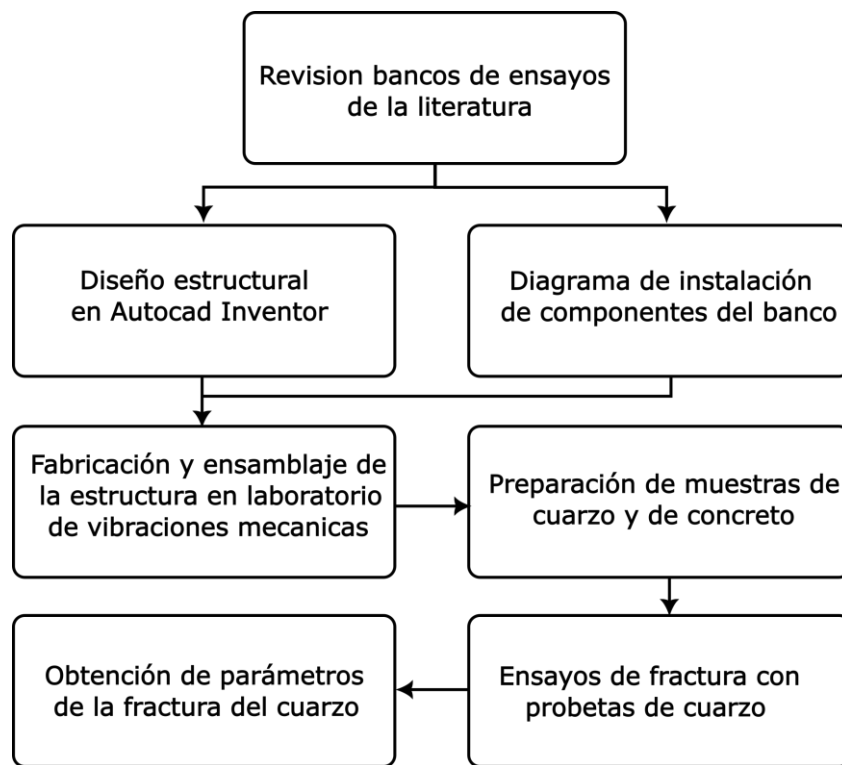


Figura 1.2: Diagrama de la metodología del proyecto de investigación

2. Marco teórico

Considerando una deformación unidimensional se puede relacionar la deformación de la barra (ε), con su módulo de elasticidad (E) y esfuerzos (σ) sometidos durante el impacto [15].

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (2.1)$$

Con esto podemos relacionar la fuerza ejercida (F) en el ensayo con su área de impacto (A).

$$F = AE\varepsilon \quad (2.2)$$

La deformación axial de la barra ($\partial u/\partial x$) se puede representar como (ε).

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u/\partial t}{\partial x/\partial t} \quad (2.3)$$

Donde (C) corresponde a la velocidad de propagación de la onda a través de la barra de densidad (ρ).

$$C = \frac{\partial x}{\partial t} = \sqrt{E/\rho} \quad (2.4)$$

Reemplazando la Ecuación (2.3) en la Ecuación (2.2) se obtiene una expresión de la fuerza de impacto (F) con relación al desplazamiento de la barra.

$$F = \rho AC \frac{du_r}{dt} \quad (2.5)$$

Con esto se obtiene una expresión para el movimiento de la barra en función del tiempo asumiendo una propagación unidireccional de la onda a través de la barra.

$$\frac{du_r}{dt} = \frac{F}{\rho_r A_r C_r} \quad (2.6)$$

Integrando la Ecuación (2.6) se obtiene una expresión para el desplazamiento de la barra (u_r) durante el ensayo de fractura.

$$u_r(t) = \frac{1}{\rho_r A_r C_r} \int_0^T F(\tau) dt \quad (2.7)$$

Mediante el diagrama de la Figura 2.1 se obtiene la ecuación del movimiento de la bola durante el impacto, considerando la posición de la bola (u_b), su masa (m_b) y la carga aplicada (F_b).

$$m_b \frac{d^2 u_b}{dt^2} + F_b - m_b g = 0 \quad (2.8)$$

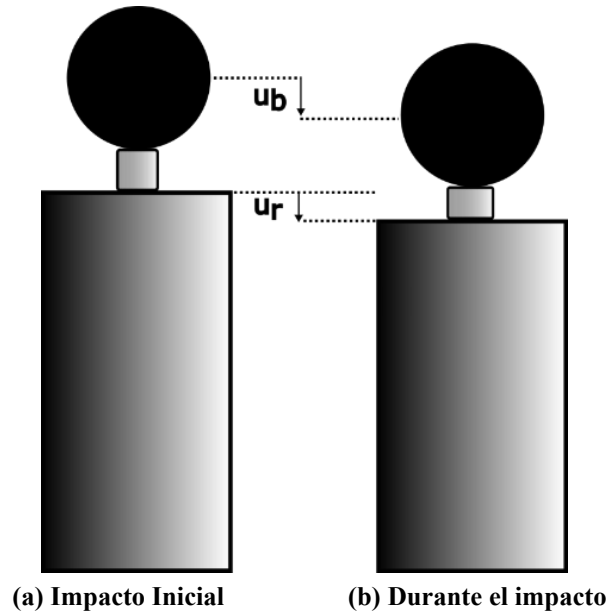


Figura 2.1: Diagrama ensayo de caída de bola (DWT) [25]

Integrando la Ecuación (2.8) y sometiendo la bola a condiciones iniciales de velocidad (v_o) y fuerza ($F_b = 0$) se obtiene.

$$\frac{du_b}{dt} = v_o + gt - \frac{1}{m_b} \int_0^t F_b(t) dt \quad (2.9)$$

Donde se obtiene la velocidad inicial de la bola considerando condiciones de caída libre con una altura inicial (h_o) que se mide con respecto a la base de la bola y la parte superior de la partícula.

$$v_o = \sqrt{2gh_o} \quad (2.10)$$

Integrando la Ecuación (2.9) se obtiene una expresión para el desplazamiento de la bola (u_b) durante el ensayo de impacto.

$$u_b(t) = v_o t + \frac{gt^2}{2} - \frac{1}{m_b} \int_0^t \int_0^T F(\hat{t}) d\hat{t} d\tau \quad (2.11)$$

Relacionando el desplazamiento de la barra y de la bola respectivamente mediante la Ecuación (2.7) y la Ecuación (2.11) se obtiene (α), expresión que representa la deformación total generada por el ensayo de fractura, considerando la compresión de la partícula y deformaciones de tanto la barra como la bola debido al impacto.

$$\alpha(t) = [u_b(t) - u_r(t)] = v_o t + \frac{gt^2}{2} - \frac{1}{m_b} \int_0^t \int_0^T F(\hat{t}) d\hat{t} d\tau - \frac{1}{\rho_r A_r C_r} \int_0^T F(\tau) d\tau \quad (2.12)$$

Integrando la curva fuerza-deformación se obtiene la energía de fractura (E') que almacena la partícula en el ensayo hasta el momento que comienza la fractura de la partícula.

$$E' = \int_0^{\Delta_c} F d\Delta \quad (2.13)$$

$$E' = v_o \int_0^{t_c} F(\tau) d\tau + g \int_0^{t_c} F(\tau) \tau d\tau - \frac{1}{2m_b} \left(\int_0^{t_c} F(\tau) d\tau \right)^2 - \frac{1}{\rho_r A_r C_r} \int_0^{t_c} F^2(\tau) d\tau$$

Dividiendo la energía de fractura (E') con la masa de partícula (m_p) se obtiene la energía específica de fractura (E_m).

$$E_m = E'/m_p \quad (2.14)$$

Para observar las características de fractura de las muestras se utiliza una distribución acumulativa de probabilidad para la energía de fractura específica de las partículas (E_m), donde se describe la variabilidad en la distribución de grietas en los ensayos y en las probetas de formas irregulares, esto realizando un ranking de las probetas ensayadas (i) de manera correcta en un orden ascendente $i = 1, 2, \dots, N$ hasta el número total de ensayos (N) realizados para un tamaño de partícula y altura de caída de bola determinado.

$$P(E_m) = \frac{i - 0.5}{N} \quad (2.15)$$

Esta distribución de probabilidad se puede ajustar a un modelo de distribución normal – logarítmica para describir la fractura de minerales de formas irregulares, esto utilizando la media ($E_{m_{50}}$) y desviación estándar (σ_E) de los datos obtenidos para la energía de fractura.

$$P(E_m) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln E_m - \ln E_{m_{50}}}{\sqrt{2\sigma_E}} \right) \right] \quad (2.16)$$

3. Metodología experimental

3.1 Diseño y fabricación del banco de ensayos de impacto

Para el diseño del banco de ensayos de fractura se tienen como consideraciones principales el tamaño de la estructura, la precisión de las mediciones experimentales y la seguridad durante los ensayos. Este diseño se puede observar en la Figura 3.1, donde se muestra un diagrama de los distintos componentes utilizados en la medición del ensayo de fractura. Dentro de este se observa una estructura que permite la configuración de la posición tanto vertical como horizontal del percutor, de esta manera obteniendo distintas combinaciones de velocidades de impacto del percutor en los ensayos. El percutor utilizado es una bola de acero que se sostiene por el campo magnético de un electroimán y que mediante su desactivación permite la caída de la bola para su impacto en la probeta posicionada en la barra Hopkinson mediante caída libre. Este impacto es propagado por una barra de acero AISI 4340 y la onda de deformación es medida por strain gages mediante un puente de Wheatstone, estas mediciones se digitalizan con un amplificador de señales y se adquieren los datos mediante un osciloscopio (PicoScope 5442D) el cual entrega los resultados a una computadora para el postproceso. Este banco de ensayos a diferencia de los bancos utilizando otros sensores permite obtener una caracterización mas completa y con una mayor precisión de la fractura del mineral, desde el contacto inicial hasta la fractura final. Esto al utilizar un osciloscopio con una frecuencia de muestreo de hasta 60 MHz, el cual es necesario debido al corto tiempo del fenómeno de fractura, donde al utilizar instrumentos con una baja frecuencia se perderían datos y sería una caracterización incompleta de la fractura. También el uso de strain gage semiconductores para poder obtener deformaciones mínimas de la barra que ocurren durante los ensayos de fractura.

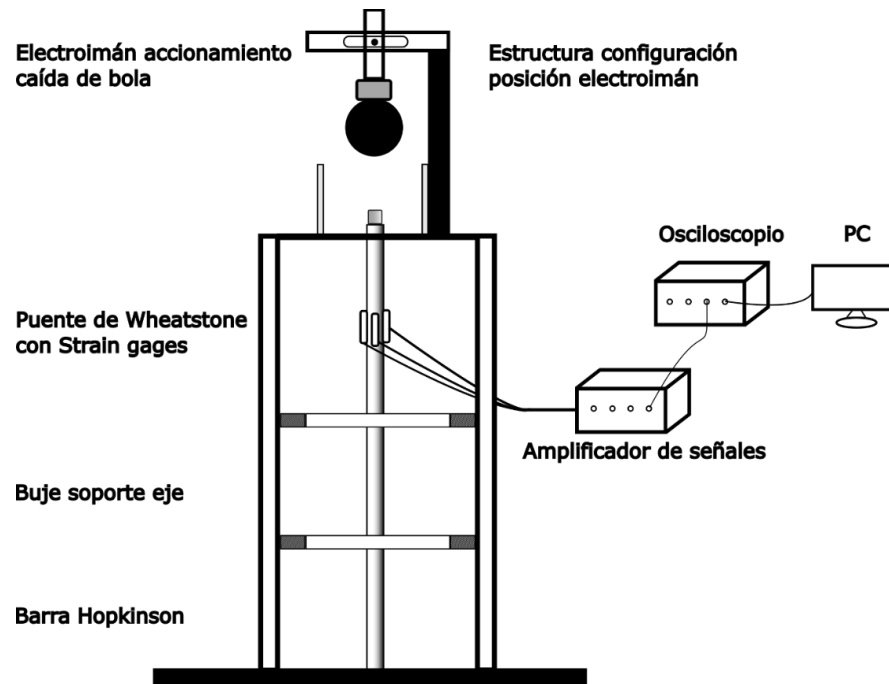


Figura 3.1: Diagrama de componentes banco de ensayos UFLC

En la Figura 3.2 se muestra el modelo 3D en Inventor del banco de ensayos UFLC y DWT con sus distintos componentes. Dentro de los parámetros de diseño se consideraron como referencia las dimensiones de los bancos de ensayos ya fabricados y las limitaciones físicas de la estructura. Para el espacio físico se tiene como limitación una altura máxima de 3,5 metros del alto del laboratorio, por esto se utiliza una barra de acero AISI 4340 de una altura de 3 metros. Para el diámetro de la barra se debe tener una relación de $(L/D > 20)$ para garantizar la propagación unidireccional elástica de la onda de deformación, y también esta no puede ser una estructura esbelta para que no sufra deformaciones por flexión o pandeo, por esto se utiliza un diámetro de 1 pulgada [27]. Para la estructura se utilizan perfiles de aceros estructurales en L y se incorporan diagonales para aumentar la estabilidad estructural, se utilizan bujes con soportes en la estructura para que la barra experimente solo movimientos verticales para no interferir en las mediciones de los strain gages, se utiliza un banco de ensayos DWT apernado a la estructura y un perfil estructural cuadrado con un riel apernado para configurar la posición del electroimán tanto horizontal como verticalmente.

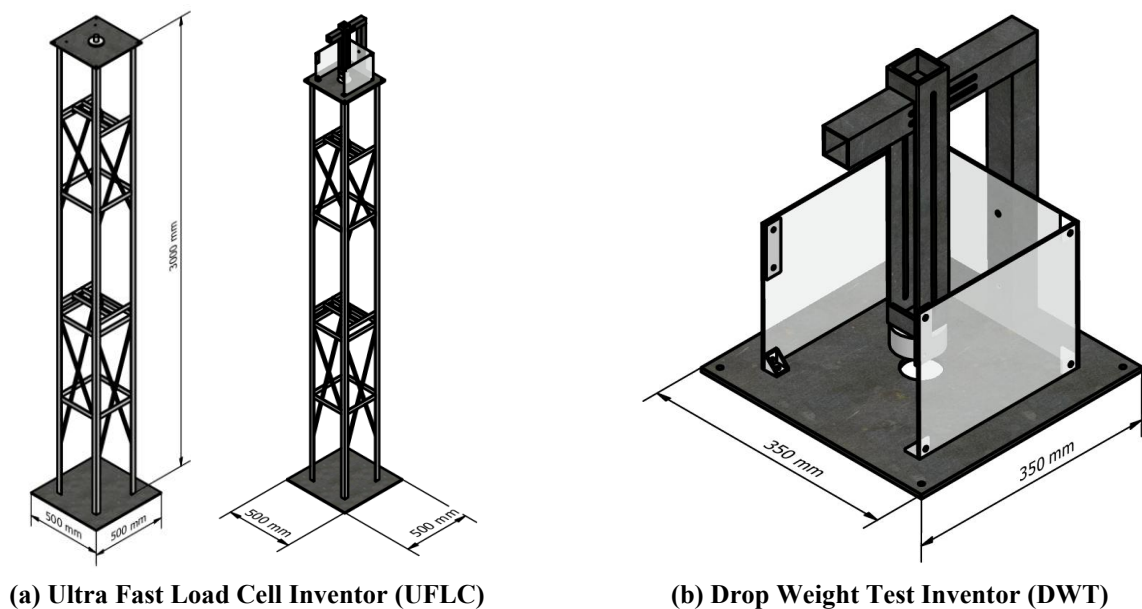


Figura 3.2: Diseño banco de ensayos UFCL en Inventor

En la Tabla 3.1 se muestra la lista de componentes utilizados para la fabricación y ensamblaje del banco de ensayos UFLC. Donde se compran perfiles estructurales y placas de acero de tamaños comerciales, para luego realizar sus cortes y perforaciones necesarios para obtener las dimensiones deseadas y con un menor costo al no pedir las dimensionadas. También se realiza la fabricación de componentes de PLA utilizando impresión 3D, lo que permite diseñar piezas con una alta tolerancia y bajos costos, como es el caso de los bujes utilizados para soportar la barra y los ángulos soporte. Considerando los materiales y componentes fabricados se llega a un costo de fabricación total de aproximadamente \$300.000 CLP, esto despreciando los gastos de envío, impuestos y mano de obra necesaria para los distintos cortes y soldaduras realizados en la estructura.

Tabla 3.1. Lista de componentes banco de ensayos UFLC

Componentes estructura UFLC	Dimensiones [mm]	Cantidad	Costo [CLP]
Barra de acero laminada (AISI 4340)	3050 largo y 25,4 diámetro	1	\$43.310
Placa base de acero	500 x 500 x 6	1	\$88.000
Perfil ángulo de acero estructura	30 x 30 x 5, 3000 largo	4	\$47.800
Perfil ángulo de acero soporte buje	30 x 30 x 2, 290 largo	4	\$3.661
Perfil ángulo de acero soporte buje	30 x 30 x 2, 286 largo	4	-
Buje soporte barra de acero impresión 3D	70 diámetro externo y 25,4 diámetro interno	2	-
Diagonales estructura inferior	10 x 10 x 700	4	\$8.053
Diagonales estructura superior	10 x 10 x 900	4	-
Placa de acero superior	350 x 350 x 4	1	\$54.420
Perfil tubular redondo de acero soporte buje	60 diámetro externo y 52 diámetro interno	2	-
Placa de acero cuadratura estructura	240 x 10 x 5	12	-
Componentes DWT	Dimensiones [mm]	Cantidad	Costo [CLP]
Placa de acero superior	350 x 350 x 4	1	-
Placa de acrílico	250 x 150 x 3	4	\$10.000
Ángulos de 90° unión acrílicos	25 x 20 x 3	6	-
Ángulos soporte acrílicos	31 x 20 x 3	2	-
Electroimán P65/30 (24V, 80 kg)	30 largo, 65 diámetro	1	\$12.100
Perfil de acero cuadrado base electroimán	40 x 40 x 2, 350 largo	1	\$11.748
Perfil de acero cuadrado largo electroimán	40 x 40 x 2, 300 largo	1	-
Perfil de acero cuadrado configuración electroimán	50 x 50 x 3, 300 largo	1	-
Cerrojos 90° apertura acrílico frontal	23 x 75	2	\$2.000
Total:			\$294.982

3.2 Instalación y montaje banco de ensayos

La barra de acero es soportada mediante bujes unidos a la estructura utilizando perfiles de acero apernados para facilitar la configuración y montaje de la barra. Los soportes se pueden observar en la Figura 3.3 y permiten el movimiento de la barra solo en la dirección vertical, los cuales garantizan estabilidad de la barra durante los ensayos, para que los strain gage midan solo la deformación uniaxial obtenida por la fractura del material ensayado.

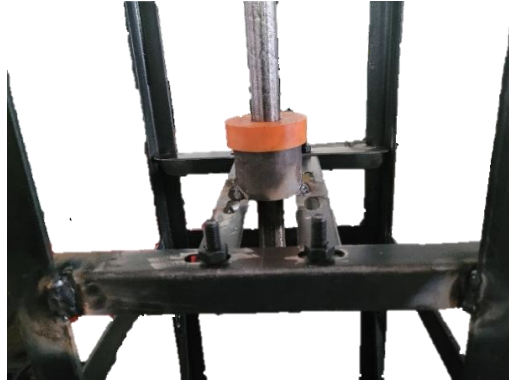


Figura 3.3: Estructura soporte con bujes de la barra

En la Figura 3.4 se muestra el banco de ensayos DWT, el cual cuenta con un perfil cuadrado apernado a la estructura soporte, lo que permite la configuración de la posición del electroimán para la caída de la bola durante los ensayos, esta corredera apernada permite la configuración de la posición horizontal con un recorrido de 100 mm para ajustar el centro del electroimán y un ajuste total de la altura de caída de la bola en un rango $h = [0 - 300 \text{ mm}]$. El banco también cuenta con una pared de acrílico desmontable con cerrojos que permite ver los ensayos de fractura y soportar el impacto de la bola durante los ensayos, esto en caso de que la bola salga disparada y no cause accidentes al caer desde 3 metros de altura.

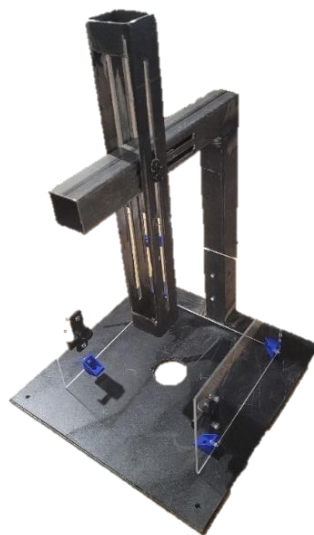


Figura 3.4: Banco de ensayos DWT

Para la selección del material de la barra se escoge un acero AISI 4340, esto debido sus propiedades mecánicas que se pueden ver en la Tabla 3.2, donde este material se caracteriza por su alta dureza y esfuerzo de fluencia, lo que permite que la barra no sufra deformaciones permanentes al momento de ser impactada por la bola de acero durante los ensayos experimentales.

Tabla 3.2. Propiedades mecánicas barra de acero AISI 4340 [28]

Esfuerzo de fluencia	Esfuerzo último	Módulo de Young	Densidad	Coefficiente Poisson
$\sigma_f [MPa]$	$\sigma_{ut} [MPa]$	$E [GPa]$	$\rho [kg\ m^{-3}]$	$\nu [-]$
545	775	210	7850	0,30

En la Figura 3.5 se muestra el ensamblaje completo del banco de ensayos UFLC, para su fabricación se comenzó realizando la estructura principal la cual soporta el banco DWT, donde realizan las uniones mediante soldaduras de los perfiles principales de la estructura junto con las cuadraturas rectangulares. Estas cuadraturas se sueldan a las distancias de (625 mm, 1170 mm, 2000 mm, 2500 mm) desde la base de los perfiles, permitiendo el ajuste de la distancia y el ángulo a la cual se encuentran los perfiles en L para formar un cuadrado de (300 x 300 mm) entre ellos. Teniendo los perfiles unidos se facilita la unión del resto de los componentes, donde se sueldan perfiles diagonales para aportar estabilidad estructural a una distancia de (750 mm, 2200 mm) y se sueldan la placa superior e inferior del banco para completar la estructura principal.

Una vez se tiene el ensamble de la estructura terminada se unen los bujes junto al eje y se monta la estructura de forma horizontal para poder alinear el centro de la barra con la estructura soporte del electroimán, teniendo esto se ubican los bujes a una distancia de (1250 mm, 2500 mm) y se sueldan los perfiles soporte de los bujes a la estructura. La instalación de los strain gages se realiza a una distancia de al menos 10 veces mayor del diámetro de la barra (254 mm) para considerar una propagación unidireccional de la onda, donde para esto se selecciona una distancia de 320 mm desde la base de la barra.



Figura 3.5: Banco de ensayos UFLC

Para el montaje final del banco de ensayos se realiza el diseño y fabricación de una estructura soporte, la cual cuenta con una plataforma que permite realizar el flujo de trabajo necesario para los ensayos de fractura en altura. Entre estos se encuentra la configuración de la altura y longitud de enfoque de una cámara de 960 fotogramas por segundo para la captura del impacto de las probetas, la configuración de la altura de caída de la bola, posicionamiento de las probetas y la manipulación del electroimán. En la Figura 3.6 se observa la estructura soporte en el Laboratorio de Vibraciones Mecánicas, donde se posiciona el banco de ensayos al interior de esta con la placa acrílica mirando hacia la plataforma de trabajo. Una vez seleccionada la ubicación se fijan ambas estructuras al suelo de concreto utilizando pernos de anclaje en sus esquinas para reducir las vibraciones del banco y obtener una mayor seguridad durante los ensayos. Dentro de las consideraciones y elementos de protección personal (EPP) necesarios para los ensayos se tienen:

- Para trabajos en altura de 1,5 metros por encima del suelo se utilizan arnés de seguridad con doble argolla para la prevención y protección en caso de caídas. Además del uso de una estructura soporte con una plataforma de 2 metros de altura, las cual permite mantener la seguridad de las operaciones realizadas durante los ensayos.
- Para la fractura del material se utilizan lentes de protección visual para los operarios en contacto directo y mascarilla para la persona operando el banco de ensayos, debido a la posible caída de polvos provocados por la fractura de los materiales ensayados.
- Para el ensayo de caída de bola se tiene el uso de una compuerta de material acrílico, la cual retiene la bola dentro de la celda para evitar su caída a personas operando el banco desde abajo, también se tiene el uso de una goma que retiene la bola luego del impacto y que reduce el impacto contra las barreras acrílicas.
- Para todas las personas que se encuentran al nivel de suelo durante los ensayos de fractura se recomienda el uso de casco de seguridad en caso de que ocurra cualquier inconveniente o falla en los sistemas de seguridad.



Figura 3.6: Estructura soporte banco de ensayos

Para la instalación y montaje de los componentes de medición se determina la disposición del cableado y la instrumentación necesaria para el funcionamiento de las mediciones. En la Figura 3.7 se muestran los componentes principales utilizados en las mediciones. Donde se decidió colocar el conjunto de la protoboard junto a sus conexiones eléctricas en la baranda de la estructura soporte, para disminuir el cableado entre las fuentes de alimentación y la salida de voltaje del strain gage. Se utilizaron 3 distintas fuentes de alimentación de un voltaje $V = 15\text{ V}$ posicionadas en la mesa cercana a la estructura. También se instaló una cámara en la barra de la estructura y un monitor en la mesa para observar las grabaciones, osciloscopio y pc en una mesa a 1 metro del banco de ensayos para observar los resultados y accionar el electroimán de caída de bola.

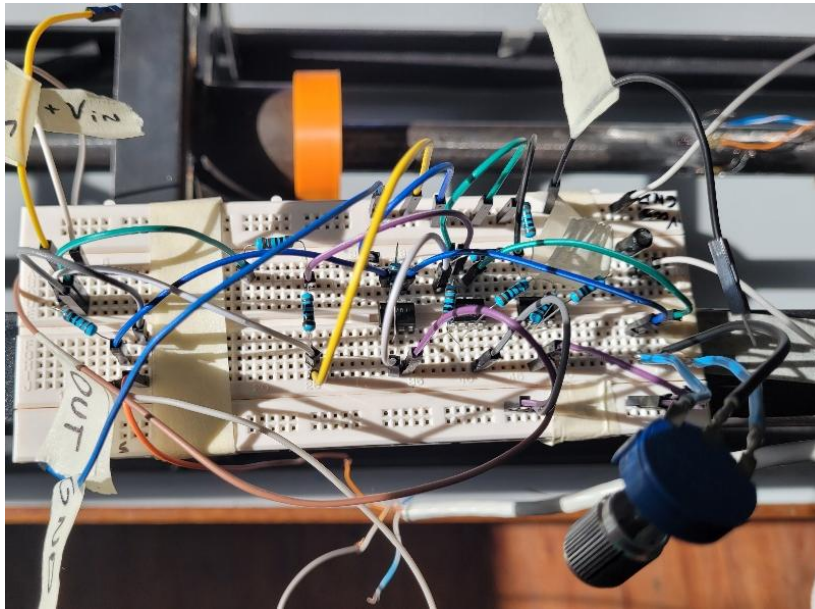


Figura 3.7: Conexiones electrónicas strain gage banco de ensayos UFLC

Para las mediciones de las deformaciones en la barra se utilizaron strain gage en un cuarto de puente de Wheatstone. En la Tabla 3.3 se muestran las propiedades que afectan directamente en las mediciones y componentes electrónicos del strain gage. Donde se utilizan strain gage semiconductores con un factor de galga relativamente alto, debido a la baja magnitud de las deformaciones que experimenta la barra.

Tabla 3.3. Propiedades de medición strain gage

Modelo	Distancia de Instalación [mm]	Proporcionalidad del puente $\lambda[-]$	Factor de galga $GF[-]$	Resistencia Nominal strain gage $R[ohm]$
HT-TP-3.8-1000	320	4	100	1040

En la Figura 3.8 se muestra el diagrama electrónico de los componentes necesarios para las mediciones en los strain gage, esto mediante el procesamiento de la señal de voltaje obtenida por el cambio en la resistencia del strain gage por el efecto de la deformación en la barra. Esta señal de voltaje es transmitida por un cuarto de puente de Wheatstone compuesto por resistencias de $R = 1000 \Omega$ alimentada por un voltaje de excitación $V_{ex} = 15,6 V$ a través de una fuente de alimentación. Luego se transmite la señal a un amplificador operacional para filtrar la señal y aumentar su ganancia, este componente se alimenta por una entrada inversora negativa de $V = -15 V$ y una entrada no inversora positiva de $V = 15 V$. Finalmente, se le aplica un filtro de altas frecuencias a la señal, esto permite disminuir el ruido en las mediciones utilizando un capacitor de $C = 1 \mu F$ y una resistencia variable a través de un potenciómetro que regula la frecuencia de paso del filtro.

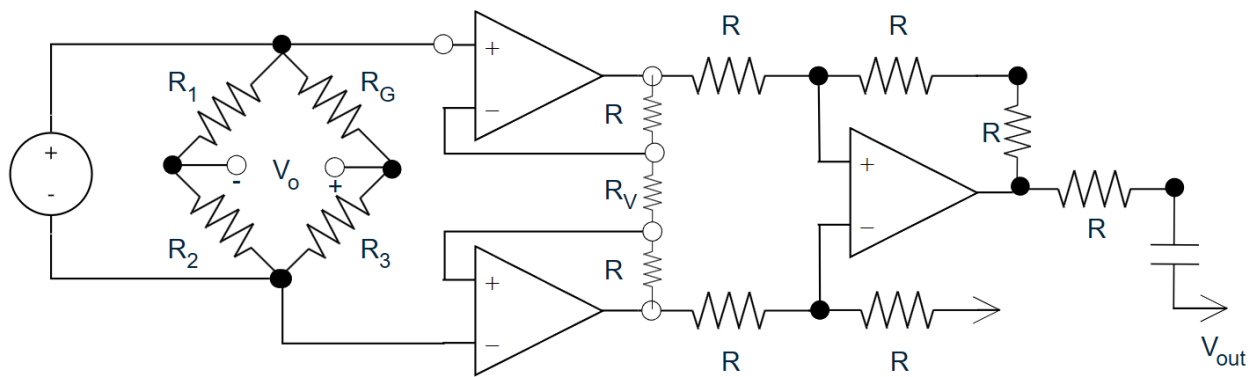


Figura 3.8: Diagrama electrónico componentes de medición

La frecuencia de paso f_c depende de la capacitancia (C) del capacitor utilizado, y de la resistencia (R) ajustable mediante un potenciómetro.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.1)$$

Para el cuarto de puente de Wheatstone se tiene que la respuesta es variable y dependiente del factor del strain gage (GF).

$$\left(\frac{V}{V_{in}}\right) = \frac{GF * \varepsilon}{4} \left(\frac{1}{1 + GF * \varepsilon / 2}\right) \quad (3.2)$$

3.3 Calibración mediciones experimentales

Utilizando la ley de Hooke y proporcionalidad de los strain gage se mide la carga aplicada (F_r) en la parte superior de la barra considerando su sección transversal (A_r), módulo de elasticidad (Y) y deformación (ε) generada mediante el impacto. [15]

$$F_r = A_r Y \varepsilon \quad (3.3)$$

Esta deformación se puede representar con la respuesta del puente de Wheatstone, donde se tiene la constante de proporcionalidad del puente (λ) obtenida de la Ecuación (3.2), el factor del strain gage (GF) obtenido en su fabricación, el voltaje de excitación (V_{in}) y voltaje de salida (V) medidos durante los ensayos.

$$\left(\frac{V}{V_{in}}\right) = GF \lambda \varepsilon \quad (3.4)$$

Igualando la deformación (ε) de la Ecuaciones (3.3) y (3.4) se obtiene la expresión de la carga aplicada (F_r) en la barra

$$F_r = \frac{A_r Y}{GF \lambda} \left(\frac{V}{V_{in}}\right) \quad (3.5)$$

La fuerza en el tiempo de los ensayos se obtiene utilizando el voltaje medido del puente de Wheatstone, estos valores se miden a una distancia (d_r) desde el punto de contacto y la posición de los strain gages equivalente al diámetro de la barra, esto genera que los valores medidos sean señales retardadas en el tiempo, por esto se realizan deconvoluciones de las señales para obtener la señal en el tiempo correspondiente utilizando el largo de la barra (l), su diámetro (d_r), el número de deconvoluciones (i), tiempo total del ensayo (t) y la velocidad de propagación de la onda a través de la barra (C).

$$V(t) = V_m(t) + \sum_i V - \left(t - \frac{2il - 2d_r}{C}\right) \sum_i V \left(t - \frac{2il}{C}\right) \quad (3.6)$$

3.4 Preparación probetas de ensayo

Para la preparación de las probetas de ensayos se utilizaron muestras de concreto para los ensayos de prueba y calibración de los elementos de medición, esto debido a que están cuentan con formas regulares cilíndricas y no varían de gran manera su resistencia de compresión y flexión, a diferencia de minerales con formas irregulares y con composiciones distintas. También se elaboran muestras de cuarzo con formas irregulares para evaluar la energía de fractura primaria considerando la variabilidad de las muestras de los minerales en un mismo rango de tamaño.

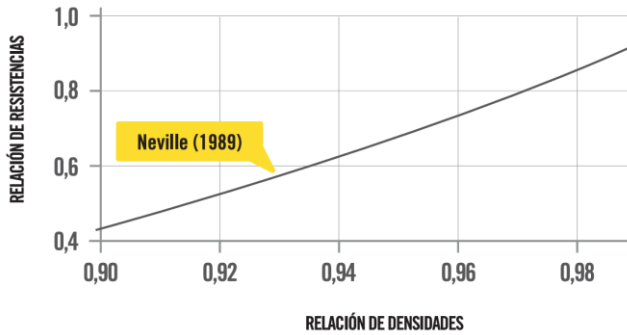
3.4.1 Probetas de concreto

Para la elaboración de las probetas de concreto se utilizaron los moldes que se muestran en la Figura 3.9, los cuales fueron fabricados con impresión 3D y se unen con pernos para poder facilitar el ensamble y desacople de las probetas. El procedimiento comienza con la mezcla del concreto homogénea utilizando una relación agua - cemento ($A/C = 0,5$), luego se usan aceites desmoldantes en los moldes y se rellenan con la mezcla de concreto. Para compactar la mezcla en los moldes y mantener las probetas homogéneas se utiliza una varilla para mezclar el concreto dentro de los moldes, se realizan golpes para eliminar las burbujas de aire y se nivela la superficie para mantener las probetas lisas y con la misma altura.

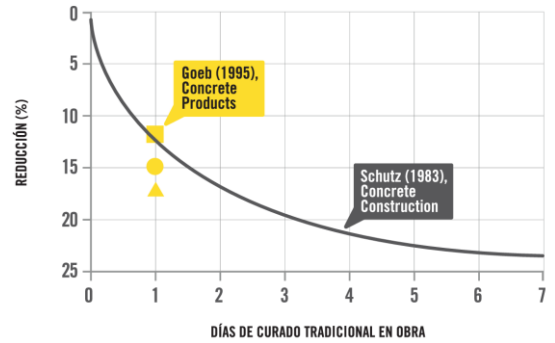


Figura 3.9: Moldes y fabricación probetas de concreto

Para que las probetas de concreto mantengan su resistencia y durabilidad se mantienen a temperatura ambiente y alta humedad para el proceso de secado, donde se desmoldan las muestras y se mantienen las probetas en intervalos de 7, 14 y 28 días previos a retirarlos para realizar los ensayos de fractura. Para mantener la resistencia a la compresión homogénea de las probetas es que se realiza el curado y compactación uniforme de los moldes, esta diferencia se puede observar en la Figura 3.10, donde el porcentaje mínimo de reducción de resistencia se alcanza al pasar 7 días de curado de las muestras, y también se puede observar la reducción en la resistencia obtenida por una mala compactación de las probetas dentro de los moldes, lo que generan burbujas de aire al interior del concreto y que pueden disminuir su resistencia hasta un 50%. Finalizado el proceso de secado se emparejan las muestras para que estas alcancen una relación de aspecto de (1:1), esto con relación al diámetro y altura de las probetas de 13 mm intentando dejar las muestras lo más parejas posibles para que no influyan estos parámetros en los ensayos.



(a) Relación resistencia/densidades probetas



(b) Reducción de la resistencia a compresión a 28 días de curado

Figura 3.10: Molde para fabricación de probetas de concreto [29]

3.4.2 Probetas de cuarzo

Para facilitar la elección de las probetas de cuarzo se distribuye la granulometría de los minerales de distintos tamaños utilizando tamices, donde se utiliza un tamiz vibratorio con tamaños de separación ($1, \frac{3}{4}, \frac{1}{2}, \frac{3}{8}, \frac{1}{4}$) pulgadas. Para la selección de las muestras se decidió utilizar minerales de cuarzo en un rango de tamaño ($13,2 \text{ mm} - 16 \text{ mm}$), donde este valor considera la mediana de las secciones transversales de las muestras en el eje x, y, z. Para esto se escoge una muestra de cuarzo retenida en los tamices de tamaño ($\frac{3}{8}$ "') y se posiciona en una superficie plana hasta que se mantenga estática, luego se mide su ancho, largo y altura de la muestra, si la mediana de las secciones transversales se encuentra en el rango de tamaño propuesto se mide la masa de la muestra, se registran sus datos de las mediciones y se guardan considerándolas como muestras válidas para utilizarlas en las mediciones experimentales.

(a) Muestras de cuarzo tamiz ($\frac{3}{8}$ "')

(b) Medición probetas de cuarzo

Figura 3.11: Selección y muestras de probetas de cuarzo

4. Resultados

4.1 Calibración sistema de medición ensayos solo bola

Previamente a realizar los ensayos de fractura con las probetas preparadas se realizan ensayos de calibración de los componentes de medición, esto mediante ensayos sin probeta para observar las variaciones en las mediciones de los strain gage utilizando solamente la bola de acero como objeto de impacto en la barra. En la Figura 4.1 se puede observar la señal medida mediante el osciloscopio de uno de los ensayos realizados con solo la bola, la señal medida corresponde a una onda sinusoidal decreciente con un *peak* de voltaje de $V_{max} = \pm 0,2 V$. Esta respuesta se atribuye al amplificador de señales el cual se alimenta con una fuente de alimentación dual con un voltaje de entrada de $V_{in} = \pm 15,6 V$, lo cual permite la salida de la señal de salida una onda que oscile alrededor de un voltaje estacionario $V = 0$ que facilita la visualización del ruido en las mediciones. Este ruido se puede observar cuando la señal está detenida y genera fluctuaciones dentro de, por esto se utilizan filtros en la señal para disminuir el ruido generado por las conexiones eléctricas y para suavizar la onda para representar con mayor precisión el fenómeno de fractura.

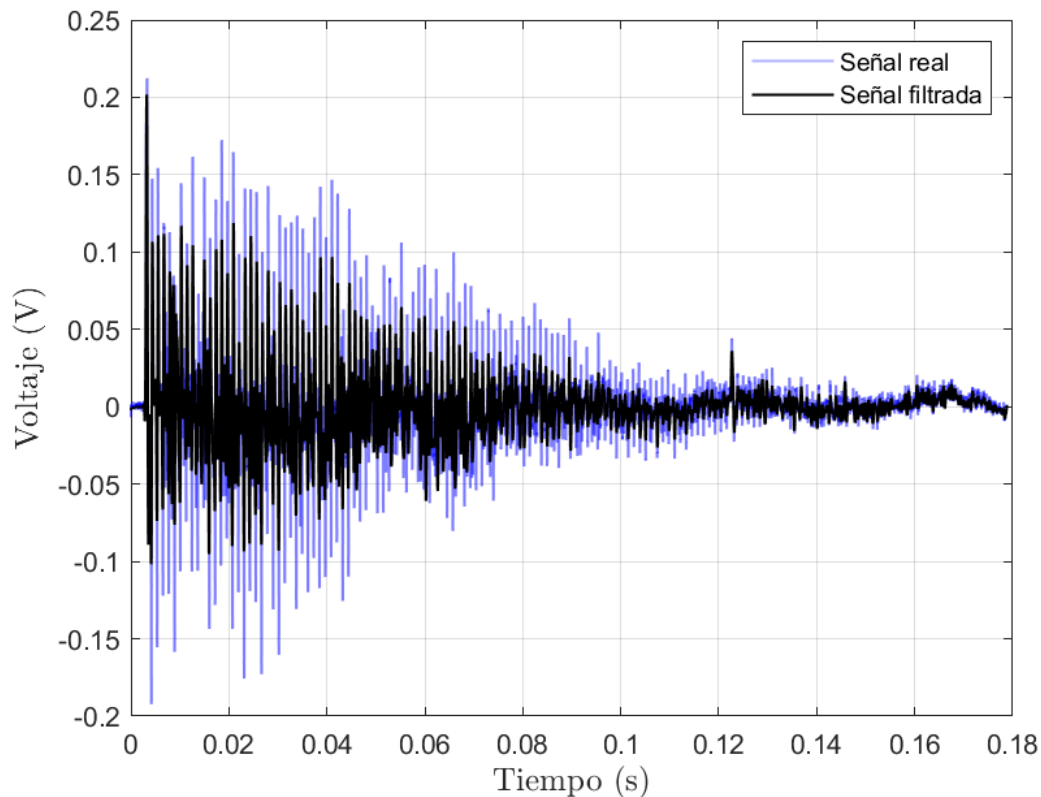


Figura 4.1: Señal de voltaje ensayos de calibración con solo bola

En la Figura 4.2 se muestra una ampliación de la señal obtenida mediante el osciloscopio sin procesamiento y la señal filtrada, donde se puede observar una cantidad significativa de ruido en las mediciones, lo cual afecta en las mediciones de la energía de fractura y la obtención del tiempo donde ocurre la fractura primaria. Para disminuir esto se utilizan distintos filtros electrónicos para, primero se aplica un filtro de Savitzky- Golay para suavizar la señal y eliminar las fluctuaciones provocadas por el ruido en las mediciones, luego se aplica un filtro de Butterworth para eliminar en gran medida el ruido de alta frecuencia obteniendo una respuesta plana en la señal.

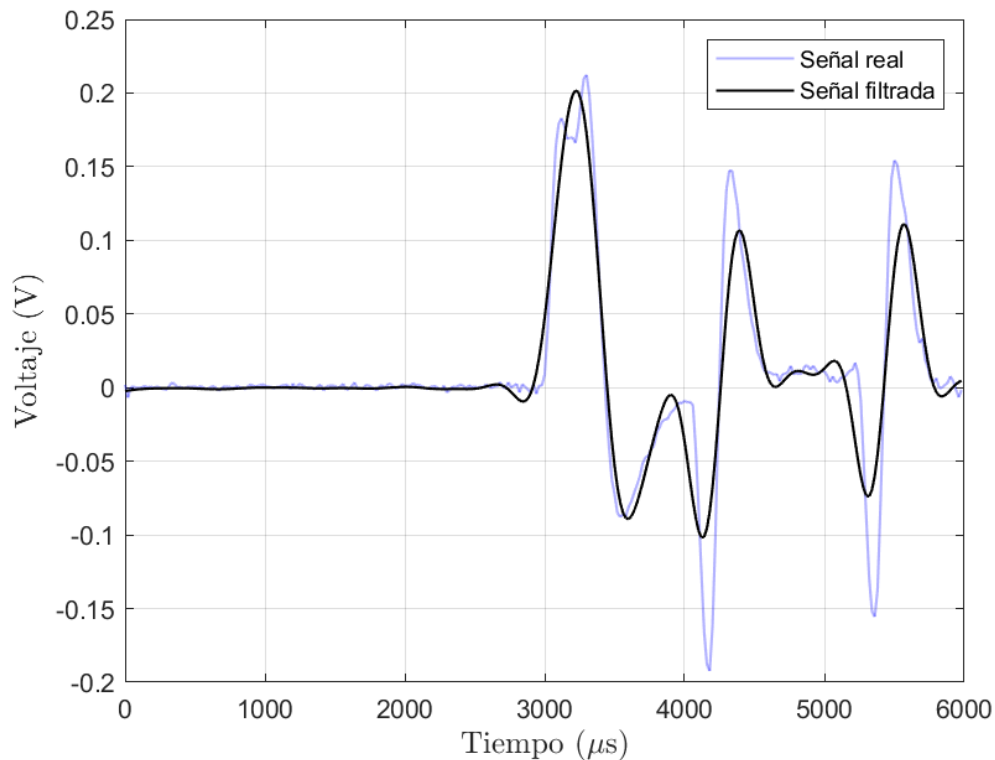


Figura 4.2: Señal de voltaje medida y filtrada de ensayos de calibración con solo bola

Para determinar la energía cinética y realizar la calibración de los datos experimentales se obtiene la gráfica de la fuerza de impacto en el tiempo a través de la señal de voltaje filtrada, esto se puede observar en la Figura 4.3 donde utilizando la Ecuación (3.5) se transforma la señal medida de voltaje en los strain gage a la fuerza de impacto en el ensayo utilizando solo la bola. Estos ensayos se realizaron con una bola con una masa de $m_b = 1,5 \text{ kg}$ y una altura de caída de la bola de $h = 111 \text{ mm}$.

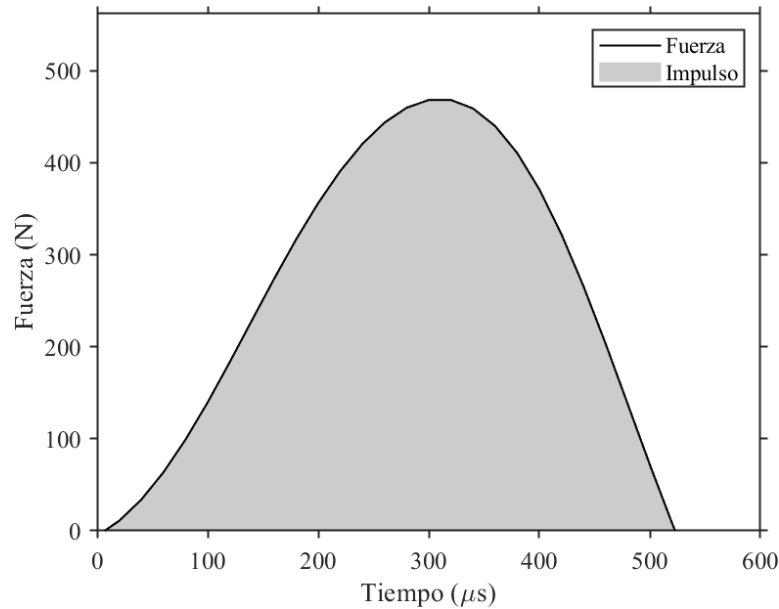


Figura 4.3: Fuerza en el tiempo ensayos de impacto solo bola

En la Tabla 4.1 se muestra un total de 10 ensayos realizados con su respectiva energía cinética obtenida mediante la Ecuación (2.13) utilizando el impulso obtenido integrando el área bajo la curva de la fuerza en el tiempo, esta energía potencial experimental se compara con la energía potencial teórica $E_p = mgh = 1,6317 J$ y se obtiene el error porcentual de los ensayos experimentales. Estos ensayos presentan un error porcentual promedio de 5,68%, lo cual indica que a pesar de la precisión de los componentes de medición existen errores asociados a pérdidas energéticas o distintos factores que varían los resultados experimentales en comparación a los teóricos, errores que hay que tener en cuenta en los ensayos de fractura y posteriores resultados de energía.

Tabla 4.1. Energía potencial experimental ensayos con solo la caída de la bola de acero

N ° Ensayo	Energía potencial experimental $E_c (J)$	Error de medición (J)	Error porcentual (%)
1	1,5413	0,090	5,5
2	1,5334	0,098	6,0
3	1,4908	0,141	8,6
4	1,5860	0,046	2,8
5	1,5073	0,124	7,6
6	1,5244	0,107	6,6
7	1,6413	0,010	0,6
8	1,5241	0,108	6,6
9	1,5360	0,096	5,9
10	1,5236	0,108	6,6

4.2 Ensayos de fractura

Luego de la calibración de los componentes de medición se realizan los ensayos de fractura, estos se realizan a una altura fija que considera la altura de la probeta y la altura de la bola de $m_b = 1,5 \text{ kg}$ para que el contacto entre el objeto de impacto y el percutor sea de $h = 111 \text{ mm}$. En la Figura 4.4 y la Figura 4.5 se muestran de las probetas de cuarzo y de concreto respectivamente, donde se muestran las probetas en reposo previo al impacto, la fractura durante el impacto de la bola y la distribución de partículas luego del impacto. Entre estos minerales se puede observar las diferencias en su comportamiento durante el proceso de fractura, donde se tiene que las probetas de cuarzo tienden a liberar una mayor cantidad de energía con partículas de distintos tamaños, a diferencia de las probetas de concreto las cuales tienen una distribución más homogénea y una fractura más controlada. Estas diferencias en el comportamiento de fractura de los materiales se pueden asociar directamente a su composición química, donde el concreto al ser fabricado con una mezcla homogénea de agua y concreto tiende a tener uniones más débiles y con una menor energía en su interior. Esto a diferencia del cuarzo, al ser un mineral extraído directamente con una composición química con uniones más fuertes que el concreto, donde es necesario de una mayor energía para lograr su fractura.

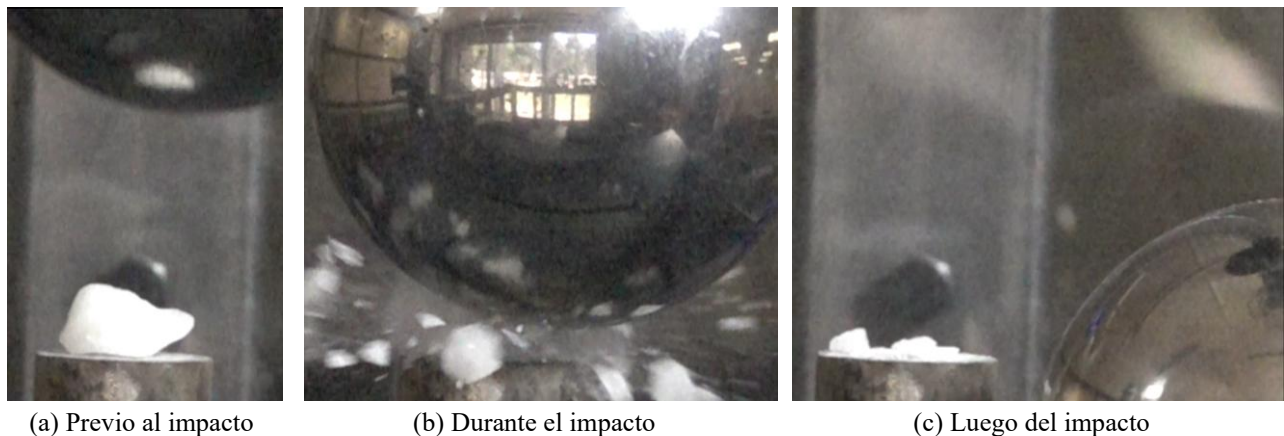


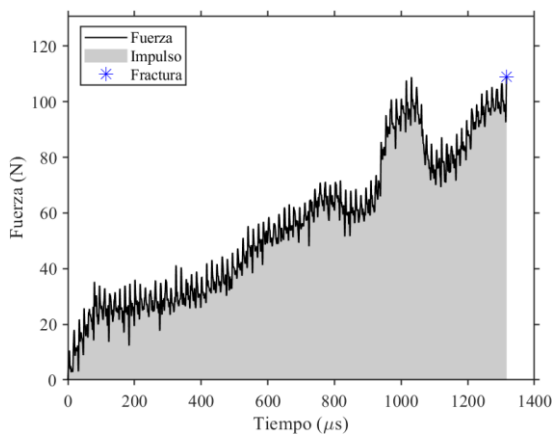
Figura 4.4: Ensayos de fractura probetas de cuarzo



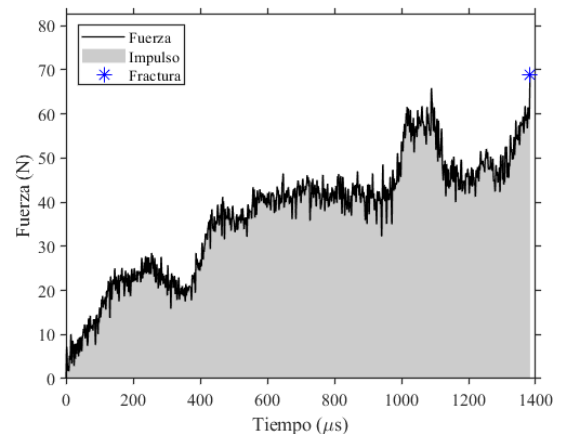
Figura 4.5: Ensayos de fractura probetas de concreto

4.2.1 Resultados fractura probetas de concreto

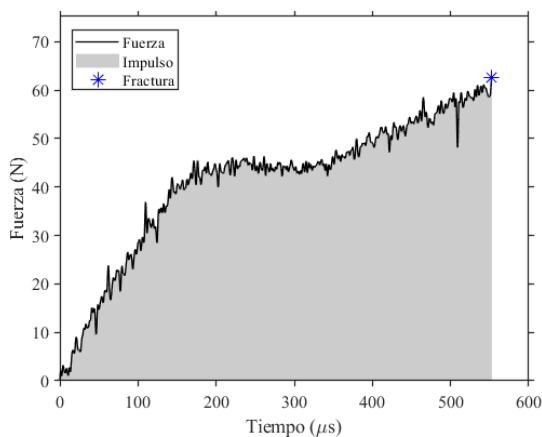
En la Figura 4.6 se muestran los gráficos de fuerza en el tiempo de la fractura de algunas de las probetas de concreto ensayadas, donde se puede observar un comportamiento lineal de la fuerza en el tiempo hasta el momento de la fractura, con algunas desviaciones de la fuerza cuando se va acercando al momento de la fractura. Esta curva representa la fractura dinámica de la partícula sometida a la carga de impacto de la bola, donde se observa como el concreto tiende a una fractura mas limpia con una baja cantidad de propagación de grietas y llegando a la fluencia a través de la propagación de una grieta inicial. De los ejemplos mostrados se pueden ver algunas diferencias en el tiempo total registrado del impacto y también la magnitud de la fuerza, dentro de los ensayos la mayoría de las probetas registraron valores parecidos a los ensayos C22 y C25, teniendo un tiempo total en un rango de $t = [1200 - 1400] \mu s$ y una fuerza máxima de $F = [80 - 120] N$. Pero también existen anomalías en los resultados debido a la diferencia en el comportamiento durante la fractura, donde se tiene que el ensayo C27 disminuyó considerablemente su magnitud, debido a que la bola no alcanzo a fracturar completamente la probeta durante el primer contacto. También el ensayo C29, el cual muestra resultados más elevados, debido a una fractura con una mayor cantidad de partículas finas.



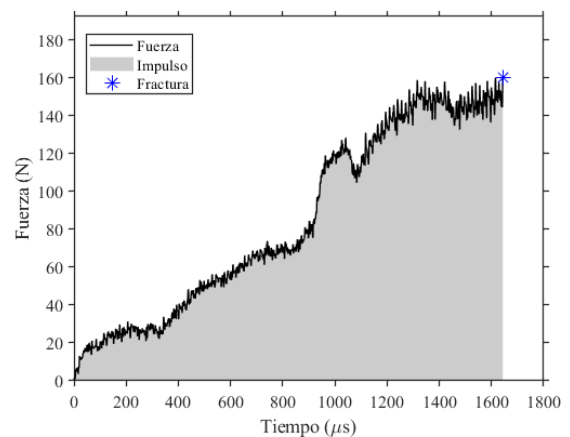
(a) Ensayo concreto C22



(b) Ensayo concreto C25



(c) Ensayo concreto C27



(d) Ensayo concreto C29

Figura 4.6: Fuerza en el tiempo fractura primaria ensayos de concreto

En la Figura 4.7 se muestra la distribución de probabilidad acumulativa de la fractura del concreto, esta grafica característica describe la probabilidad de que una partícula de un respectivo material y diámetro presente características de fractura, esto se obtiene mediante el ensayo de 10 probetas distintas de concreto y determinando su energía de fractura primaria en un gráfico normal - logarítmico. Estos ensayos fueron realizados con probetas de concreto de un diámetro de $d = 13 \text{ mm}$, una relación de aspecto de 1:1 y con un proceso de secado de 7 días. Las probetas fueron posicionadas horizontalmente y se utilizó una altura de $h = 111 \text{ mm}$ y una bola de $m_b = 1,5 \text{ kg}$ como objeto de impacto.

Dentro de los resultados se puede observar cómo existen mínimas variaciones de la energía de fractura primaria con una energía media de la distribución de $E_{50} = 306,43 \text{ (J/kg)}$, esto debido a que el comportamiento del concreto no es como el de un mineral irregular como el cuarzo. A pesar de esto igual se generan desviaciones dentro de las mediciones, esto debido a que la energía de fractura se considera como una variable aleatoria, por esto es necesario realizar una gran cantidad de ensayos para probetas en las mismas condiciones para disminuir estos factores. Entre las variables que afectarían a la resistencia a la compresión del concreto y sus resultados de la energía se tienen diferencias en la composición de la mezcla concreto / agua, llenado en los moldes incompleto generando vacíos en el interior de las probetas y cambios durante el proceso de secado.

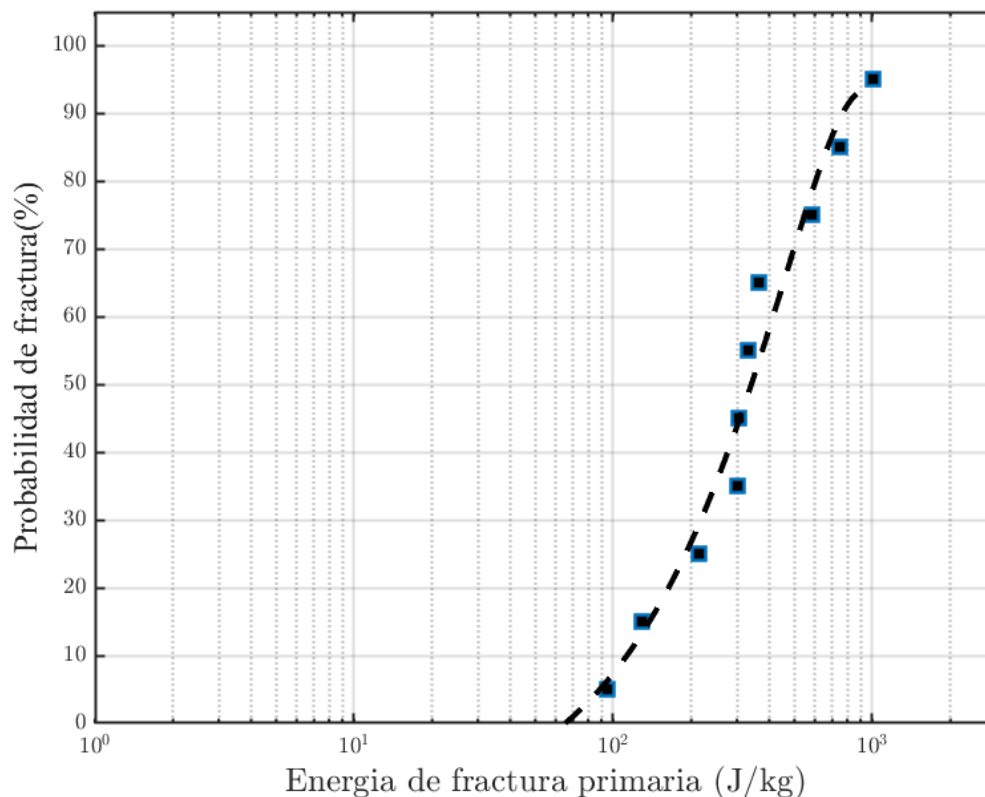


Figura 4.7: Distribución de probabilidad acumulada energía de fractura primaria del concreto

4.2.2 Resultados fractura probetas de cuarzo

En la Figura 4.8 se muestra el comportamiento de una partícula de cuarzo (Q20) durante el fenómeno de fractura completo, esto se observa como una gráfica de la fuerza en el tiempo de un ensayo realizado a una altura de $h = 111 \text{ mm}$ y con una bola de acero de masa $m_b = 1,5 \text{ kg}$. Esta grafica nos permite caracterizar las propiedades de fractura de minerales irregulares como el cuarzo, las cuales se pueden dividir en mediciones hasta y posterior a la de la partícula. Donde las mediciones hasta la fractura se realizan desde el instante de inicio del contacto hasta la fractura primaria, la cual ocurre en el *peak* de la gráfica, obteniendo la energía de fractura primaria de la partícula. Y las mediciones que se enfocan en el comportamiento luego de la fractura, donde se observan distintos *peaks* de la fuerza luego del instante de la fractura provocados por fracturas secundarias y terciarias de la partícula, las cuales nos proporcionan información sobre la energía de conminución de las partículas. Para efectos de este trabajo se va a dar como enfoque principal las características que ocurren hasta la fractura primaria, obteniendo como resultados la energía de fractura primaria de las probetas ensayadas.

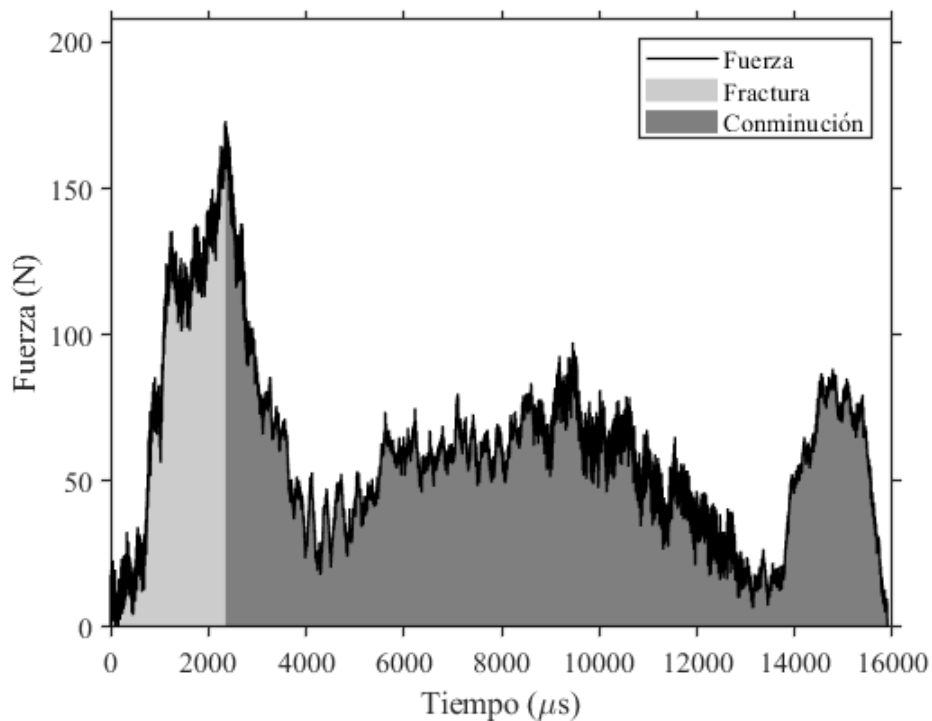
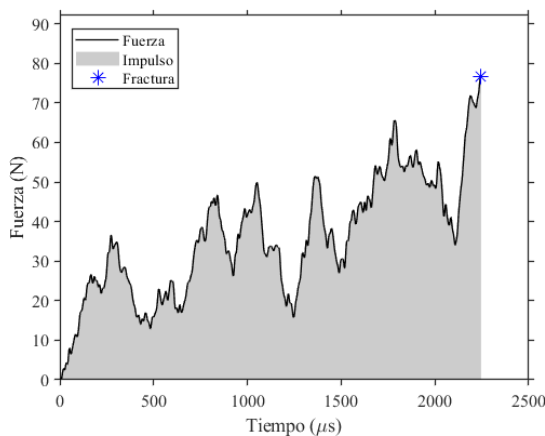
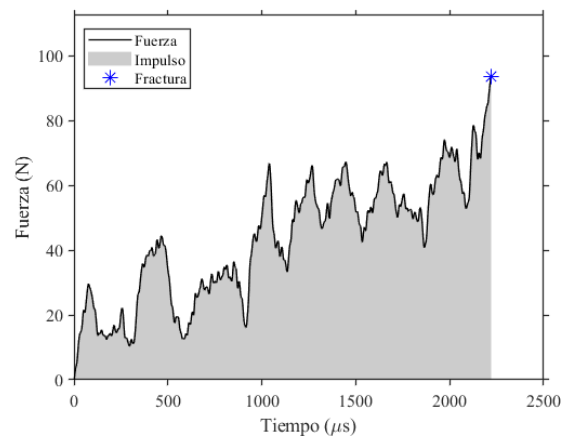


Figura 4.8: Fuerza en el tiempo fractura completa ensayo de cuarzo Q20

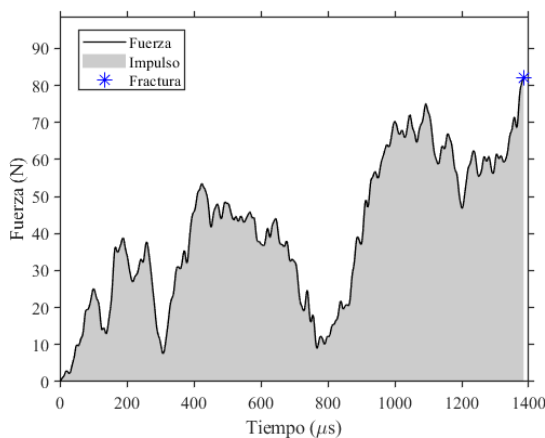
En la Figura 4.9 se muestran los resultados los gráficos de fuerza en el tiempo de la fractura de las probetas de cuarzo, estos resultados a diferencia de las probetas de concreto presentan una respuesta con una mayor variabilidad y fluctuaciones desde el inicio del contacto hasta la fractura total. Esto es debido a las diferencias entre los ensayos con probetas regulares (concreto) y probetas irregulares (cuarzo), donde se tienen geometrías, masa y diámetro equivalente variable. A pesar de ser probetas irregulares se encuentran patrones similares en el comportamiento en la mayoría de las probetas como los ensayos Q11 y Q13, que cuentan con tiempos y fuerzas durante fractura dentro del mismo rango. Al igual que las probetas de concreto las variaciones entre ensayos radican en el comportamiento de fractura y la distribución de partículas durante el ensayo, donde se tienen dificultades en las mediciones en ensayos tales como Q1, Q2 y Q16, debido a una fractura explosiva con una gran cantidad de partículas finas. También se tienen ensayos como Q20, donde se genera la fractura completa de la probeta, pero esta se distribuye en partículas de mayores tamaños, generando un impulso de mayor magnitud.



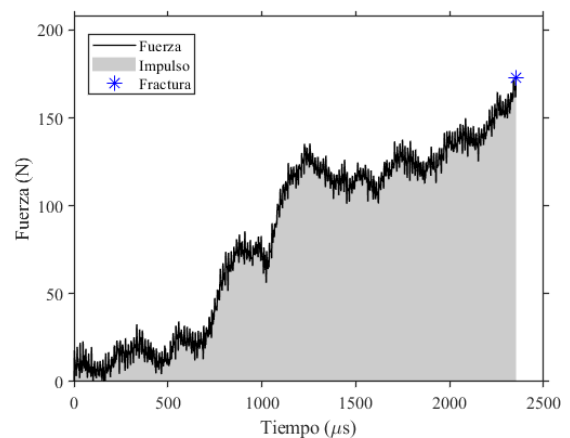
(a) Ensayo cuarzo Q11



(b) Ensayo cuarzo Q13



(c) Ensayo cuarzo Q16



(d) Ensayo cuarzo Q20

Figura 4.9: Fuerza en el tiempo fractura primaria ensayos de cuarzo

En la Figura 4.10 se muestra la distribución de probabilidad acumulativa de la fractura del mineral de cuarzo, donde se realizaron un total de 26 ensayos utilizando probetas de cuarzo irregulares en un rango de tamaño $d = [13,2 - 16] \text{ mm}$, al igual que las probetas de concreto los ensayos se realizaron a una altura de $h = 111 \text{ mm}$ y una bola de $m_b = 1,5 \text{ kg}$ como objeto de impacto. A diferencia de las probetas de concreto se puede observar una distribución con valores que se alejan de la energía media de distribución de $E_{50} = 360,87 \text{ (J/kg)}$. Debido al comportamiento irregular de las probetas de cuarzo se tiene que la curva característica tiende a una forma de 'S', concentrando la mayoría de los datos cercanos a la energía de fractura media.

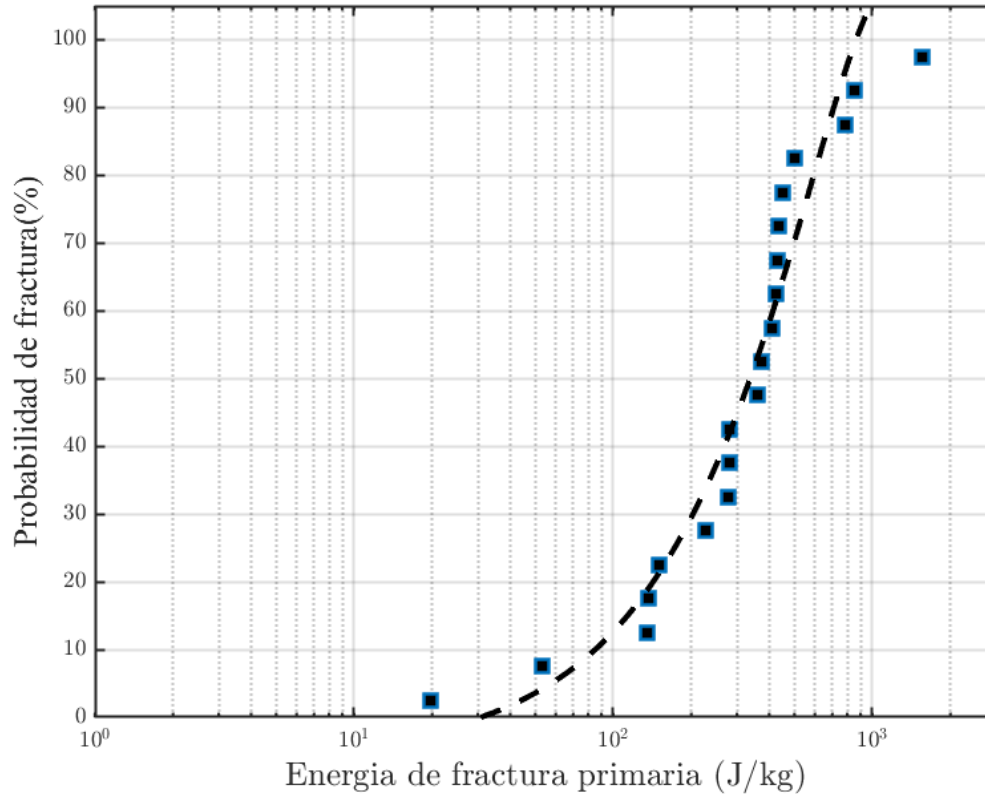


Figura 4.10: Distribución de probabilidad acumulada energía de fractura primaria del cuarzo

Los resultados obtenidos con la barra Hopkinson se pueden comparar con otros bancos de ensayos de la literatura. Como la celda de impacto PFLC, la cual utiliza un sensor piezoeléctrico para obtener la magnitud del impacto en el tiempo. Uno de estos estudios utilizó este banco de ensayos con probetas de cobre para observar la influencia de la velocidad de impacto en la fractura. Donde se utilizaron probetas cilíndricas con un diámetro de 13 mm, una velocidad de impacto $v_o = 1.46 \text{ m/s}$ usando una bola de masa $m_b = 1,5 \text{ kg}$. Las cuales son las mismas condiciones de impacto realizadas en este trabajo, a diferencia del diámetro que no es constante [30]. Dentro de sus resultados se observó que la energía de fractura primaria del mineral de cobre tiende al mismo comportamiento del cuarzo, y que las diferencias principales es la preparación de probetas de cobre con una geometría cilíndrica y diámetro constante. También se observa que la energía de fractura primaria para un diámetro de 13 mm y la energía media de la distribución E_{50} llegan a valores dentro del mismo rango que los ensayos de cuarzo, con una energía de fractura en un intervalo de $[300 - 500 \text{ J/kg}]$.

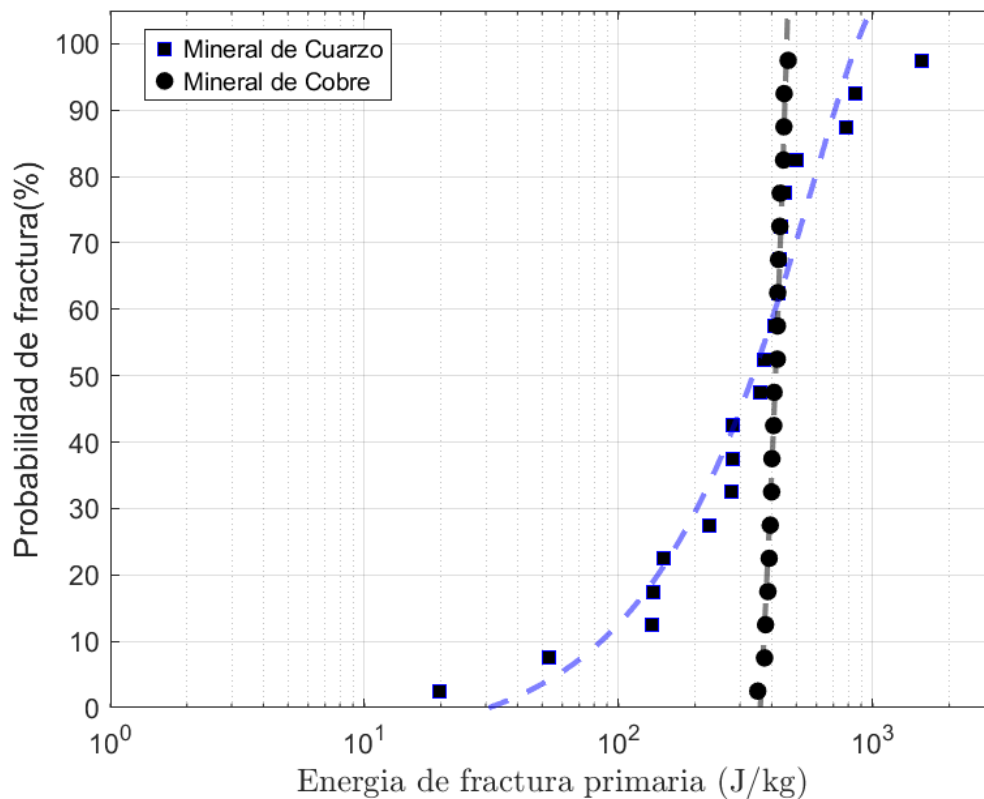


Figura 4.11: Comparación distribución de probabilidad acumulada energía de fractura primaria del mineral de cuarzo y cobre [30]

5. Conclusiones

En este proyecto se diseñó y fabricó un banco de ensayos utilizando una barra Hopkinson en conjunto a un ensayo de caída de bola, el cual permite caracterizar la fractura primaria de minerales. Este banco de ensayos al someterse a variaciones mínimas en la deformación de los strain gage necesita componentes de medición con una alta precisión, al igual de una alta calibración de sus parámetros y un postproceso detallado, esto para que los resultados concuerden con la fractura real capturada por cámara y no tener pérdidas de probetas durante los ensayos.

Dentro de los ensayos realizados se pudo observar que las probetas irregulares presentan una mayor dispersión de la energía de fractura primaria, lo cual indica que es necesario de una mayor cantidad de ensayos para poder obtener una caracterización representativa del comportamiento de fractura de estos minerales. También se observó que las probetas irregulares con superficies lisas encontraban dificultades en el registro la señal, donde estos ensayos no presentaban variaciones o el cambio era tan bajo que se observaba como ruido en las mediciones.

Las probetas irregulares de cuarzo experimentaban con señales con menor ruido en las mediciones que las probetas regulares de concreto. Donde se encontró que la respuesta se veía más limpia y con una mayor distinción de la fractura primaria cuando las probetas de cuarzo presentaban fracturas explosivas, esto cuando se generaba una mayor dispersión del material particulado. Y que cuando las probetas se fracturaban y sus restos permanecían en la superficie de la barra, aumentaba el ruido considerablemente.

Para trabajos o investigaciones futuras se proponen los siguientes cambios necesarios y continuaciones del proyecto utilizando el banco de ensayos fabricado:

- Para el banco de ensayos se proponen cambios en sus componentes y mejoras que facilitarían su uso. Donde se tiene el cambio de la barra Hopkinson existente por una barra de acero trefilada, la cual tenga una geometría cilíndrica con mínimos cambios de secciones en la barra para mejorar la propagación de la onda por la barra. También se tienen cambios en los componentes de medición, instalando nuevos strain gage con una configuración de puente de Wheatstone completo, reemplazar el potenciómetro variable por una resistencia. Todo esto para disminuir el ruido de las mediciones y obtener resultados con una mayor precisión.
- Para las mediciones y ensayos experimentales se propone realizar ensayos de fractura con distintos materiales tales como el cuarzo, concreto o mineral de cobre. También realizar ensayos utilizando probetas de distintos diámetros con geometrías cilíndricas, esto para observar la influencia del diámetro de partícula en la fractura primaria y para eliminar variables que afecten en los resultados. Otra variable que se puede investigar es la velocidad de impacto del percutor, donde cambiando la altura de caída de la bola se puede observar la influencia de la velocidad de impacto en la fractura primaria. Los resultados obtenidos se pueden comparar con ensayos experimentales realizados con distintos sistemas de mediciones tales como el sensor piezoeléctrico y la celda de carga. Y también se pueden obtener otros parámetros de fractura relevantes tales como la energía de conminución, resistencia de la partícula, coeficiente de restitución y energía de fractura secundaria y terciaria.

Referencias

- [1] C. M. Fernando, F. G. Verónica, and F. Francisca, “Chilean mining industry: an approach to the paradoxes of sustainability,” *Revista Venezolana de Gerencia*, vol. 27, no. 99, pp. 1078–1094, Jun. 2022, doi: 10.52080/rvgluz.27.99.14.
- [2] “Impactos socioeconómicos de la minería en Chile.” [Online]. Available: <https://consejominero.cl/chile-pais-minero/aprende-de-mineria/mineria-en-chile/>
- [3] J. De Gregorio, “EL CRECIMIENTO EN CHILE Y EL COBRE.”
- [4] “InvestChile Insights-eBook Series Minería Proyección y Oportunidades en Chile I N F O R M E.” [Online]. Available: www.investchile.gob.cl
- [5] C.-M. Horta-Gaviria and C. Margarita-Marcela García-Rodríguez, “La industria minera en Latinoamérica”, doi: 10.30854/anf.
- [6] J. Rodríguez, A. Vega, J. Chamorro, and M. Acevedo, *Evolución, administración e impacto fiscal de los ingresos del cobre en Chile*. 2015. [Online]. Available: www.dipres.cl
- [7] P. L. Morales, K. Barbosa, M. Yahyaei, P. Lois -Morales, and C. Evans, “A Geometallurgical Approach to Comminution Using Primary Breakage Properties of Ores.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/346234084>
- [8] D. Tromans, “Mineral comminution: Energy efficiency considerations,” *Miner. Eng.*, vol. 21, no. 8, pp. 613–620, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.mineng.2007.12.003.
- [9] M. Yahyaei, F. Saeidi, M. S. Powell, and M. S. Powell, “New Insights into Comparison of Breakage Testing Techniques.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/267694885>
- [10] L. M. Tavares, “Breakage of single particles: Quasi-static,” *Handbook of powder technology*, 2007.
- [11] L. M. Tavares, “Review and Further Validation of a Practical Single-Particle Breakage Model †,” *KONA Powder and Particle Journal*, vol. 39, pp. 62–83, 2022, doi: 10.14356/kona.2022012.
- [12] F. S. Bourgeois and G. A. Banini, “A portable load cell for in-situ ore impact breakage testing.”
- [13] K. Barbosa, H. Miceli, and P. L. Morales, “Characteristics of single-particle breakage from Short Impact Load Cell guiding Precision Rolls Crusher tester.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/355653237>
- [14] 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 Technol.*, vol. 445, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.powtec.2024.120142.
- [15] Agba D. Salman, *HANDBOOK OF POWDER TECHNOLOGY - Particle Breakage*, 1st ed., vol. 12. Elsevier, 2007.
- [16] “Diseño-construcción-y-evaluación-de-barras-de-compresión-de-Hopkinson-Kolsky”.
- [17] M. M. Khan and M. A. Iqbal, “Design, development, and calibration of split Hopkinson pressure bar system for Dynamic material characterization of concrete,” *International Journal of Protective Structures*, vol. 15, no. 2, pp. 195–223, Jun. 2024, doi: 10.1177/20414196231155947.

- [18] L. M. Tavares, “ENERGY ABSORBED IN BREAKAGE OF SINGLE PARTICLES IN DROP WEIGHT TESTING,” 1999.
- [19] 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,” Dec. 01, 2019, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.jngse.2019.103018.
- [20] G. J. Brown, “A FRACTAL DESCRIPTION OF THE PROGENY OF DOUBLE IMPACT SINGLE PARTICLE BREAKAGE,” 1997.
- [21] E. T. Tuzcu, N. Dhawan, and R. K. Rajamani, “Coarse particle fracture with the ultrafast load cell,” 2011.
- [22] E. T. Tuzcu and R. K. Rajamani, “Modeling breakage rates in mills with impact energy spectra and ultra fast load cell data,” *Miner. Eng.*, vol. 24, no. 3–4, pp. 252–260, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.mineng.2010.08.017.
- [23] E. T. TUZCU, “Particle Internal Fracture Energy Measurement by Ultrafast Load Cell,” *SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 20, no. 3, p. 428, Oct. 2016, doi: 10.19113/sdufbed.65312.
- [24] Y. Qing *et al.*, “Effects of the Particle Shape and Size on the Single-Particle Breakage Strength,” *Advances in Civil Engineering*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/3386025.
- [25] L. M. Tavares and R. P. King, “Single-particle fracture under impact loading,” *Int. J. Miner. Process.*, vol. 54, no. 1, pp. 1–28, 1998, doi: 10.1016/s0301-7516(98)00005-2.
- [26] L. M. Tavares and R. P. King, “Measurement of the load-deformation response from impact-breakage of particles,” in *International Journal of Mineral Processing*, Dec. 2004. doi: 10.1016/j.minpro.2004.07.017.
- [27] B. Song, K. Connelly, J. Korellis, W. Y. Lu, and B. R. Antoun, “Improved Kolsky-bar design for mechanical characterization of materials at high strain rates,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 11, 2009, doi: 10.1088/0957-0233/20/11/115701.
- [28] M. M. Khan and M. A. Iqbal, “Design, development, and calibration of split Hopkinson pressure bar system for Dynamic material characterization of concrete,” *International Journal of Protective Structures*, vol. 15, no. 2, pp. 195–223, Jun. 2024, doi: 10.1177/20414196231155947.
- [29] Ministerio de Vivienda y Urbanismo (Minvu) and Comisión de Construcción del Hormigón del Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile (ICH), “MANUAL DE BUENAS PRACTICAS DE ENSAYOS DE HORMIGÓN,” 2025.
- [30] G. M. Sánchez, “Influencia de la velocidad de impacto en la fractura primaria del mineral de cobre, mediante la fabricación de un banco de ensayos.”

Anexo A. Probetas ensayadas

Tabla A.1: Características probetas de cuarzo ensayadas en el banco UFLC

ID	S1 (mm)	S2 (mm)	S3 (mm)	Masa (g)	Mediana (mm)	Media (mm)
Q1	4,85	15,23	19,61	1,882	15,23	13,23
Q2	6,19	15,01	16,95	1,751	15,01	12,72
Q3	8,26	15,34	18,40	2,500	15,34	14,00
Q4	13,03	15,42	18,49	3,712	15,42	15,65
Q5	5,87	15,06	18,39	1,969	15,06	13,11
Q6	13,36	15,85	19,76	3,945	15,85	16,32
Q7	14,57	14,48	18,52	3,767	14,57	15,86
Q8	7,21	14,97	18,41	2,900	14,97	13,53
Q9	9,09	15,23	23,02	2,788	15,23	15,78
Q10	6,86	14,61	18,29	2,788	14,61	13,25
Q11	10,43	14,78	21,57	3,220	14,78	15,59
Q12	7,50	15,05	22,24	3,248	15,05	14,93
Q13	8,46	15,21	17,33	2,171	15,21	13,67
Q14	11,15	14,42	21,82	3,160	14,42	15,80
Q15	11,80	15,29	23,66	4,110	15,29	16,92
Q16	9,13	14,13	23,08	4,209	14,13	15,45
Q17	10,49	15,27	20,82	3,611	15,27	15,53
Q18	12,06	14,42	23,35	5,128	14,42	16,61
Q19	6,47	14,25	16,08	1,771	14,25	12,27
Q20	8,99	13,65	17,87	2,819	13,65	13,50
Q21	8,74	14,55	19,36	2,970	14,55	14,22
Q22	9,60	15,96	18,96	2,614	15,96	14,84
Q23	13,16	13,72	16,96	3,103	13,72	14,61
Q24	7,90	13,90	19,45	2,613	13,9	13,75
Q25	12,12	14,24	17,55	2,731	14,24	14,64
Q26	12,95	15,02	17,90	2,626	15,02	15,29
Q27	13,02	15,21	17,79	3,779	15,21	15,34
Q28	12,05	14,77	16,22	2,671	14,77	14,35
Q29	11,52	14,42	16,96	1,939	14,42	14,30
Q30	10,46	15,24	19,19	2,671	15,24	14,96
Q31	11,40	14,73	18,01	2,700	14,73	14,71
Q32	10,04	13,53	18,08	3,071	13,53	13,88
Q33	11,65	15,85	22,58	3,770	15,85	16,69
Q34	7,14	15,42	20,14	2,292	15,42	14,23
Q35	8,04	15,12	22,10	3,646	15,12	15,09

ID	S1 (mm)	S2 (mm)	S3 (mm)	Masa (g)	Mediana (mm)	Media (mm)
36	13,58	14,96	18,13	3,009	14,96	15,56
37	10,63	13,07	20,35	3,013	13,07	14,68
38	8,34	15,34	23,09	2,925	15,34	15,59
39	12,83	15,51	18,07	3,601	15,51	15,47
40	6,98	14,88	20,73	2,736	14,88	14,20
41	7,25	15,07	21,15	2,767	15,07	14,49
42	11,20	15,77	20,66	3,634	15,77	15,88
43	7,44	14,17	19,20	2,404	14,17	13,60
44	7,57	15,68	17,48	2,521	15,68	13,58
45	8,99	14,46	19,47	2,550	14,46	14,31
46	12,26	13,81	21,86	4,259	13,81	15,98
47	8,50	14,87	21,35	3,050	14,87	14,91
48	9,68	15,25	18,40	3,238	15,25	14,44
49	8,24	13,46	17,48	2,841	13,46	13,06
50	13,52	14,99	22,62	2,080	14,99	17,04
61	9,15	17,16	20,11	3,550	17,16	15,47
62	6,88	15,46	21,27	3,674	15,46	14,54
63	11,18	15,85	20,42	4,628	15,85	15,82
64	7,95	14,97	20,77	3,085	14,97	14,56
65	14,04	13,83	18,80	3,466	14,04	15,56
66	7,74	15,46	17,70	3,534	15,46	13,63
67	11,90	13,77	22,30	4,601	13,77	15,99
68	10,71	13,23	21,72	4,880	13,23	15,22
69	7,40	14,23	18,88	3,109	14,23	13,50
70	8,40	13,38	20,57	2,791	13,38	14,12
71	12,88	13,13	18,86	3,530	13,13	14,96
72	9,81	14,68	21,40	3,632	14,68	15,30
73	8,05	14,29	17,13	2,225	14,29	13,16
74	7,69	14,55	21,10	2,724	14,55	14,45
75	12,73	13,11	20,71	3,847	13,11	15,52
76	11,90	14,27	16,28	3,169	14,27	14,15
77	10,38	15,34	16,08	2,488	15,34	13,93
78	10,25	14,01	17,92	3,218	14,01	14,06
79	9,54	13,35	17,24	3,255	13,35	13,38
80	10,94	16,98	19,37	3,662	16,98	15,76

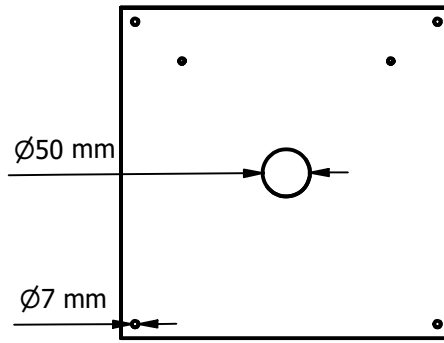
Tabla A.2: Características probetas de cuarzo ensayadas en el banco DWT con piezoeléctrico

ID	S1 (mm)	S2 (mm)	S3 (mm)	Masa (g)	Mediana (mm)	Media (mm)
Q51	10,45	14,95	22,16	4,235	14,95	15,85
Q52	9,41	14,99	21,60	3,759	14,99	15,33
Q53	10,99	14,04	21,12	3,608	14,04	15,38
Q54	9,79	15,71	20,00	3,566	15,71	15,17
Q55	8,55	15,23	21,10	3,704	15,23	14,96
Q56	8,55	15,23	21,10	3,314	15,23	14,96
Q57	10,40	13,73	19,26	3,270	13,73	14,46
Q58	10,21	14,99	16,10	2,813	14,99	13,77
Q59	10,73	14,64	17,96	2,783	14,64	14,44
Q60	12,33	13,37	16,82	3,394	13,37	14,17

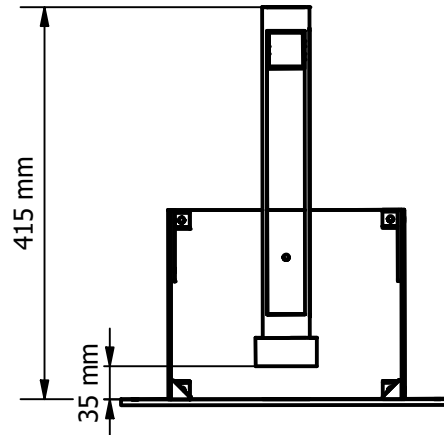
Tabla A.3: Características probetas de concreto ensayadas en el banco UFLC

ID	Curado (Días)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Relación aspecto	Masa (g)
C21	7	12,95	12,81	1,011	2,588
C22	7	13,02	13,57	0,959	2,725
C23	7	12,92	13,38	0,966	2,732
C24	7	12,88	13,50	0,954	2,722
C25	7	12,97	14,00	0,926	2,702
C26	7	12,91	13,05	0,989	2,673
C27	7	12,85	13,55	0,948	2,687
C28	7	12,80	11,88	1,077	2,367
C29	7	13,11	12,98	1,010	2,658
C30	7	13,01	13,52	0,962	2,820

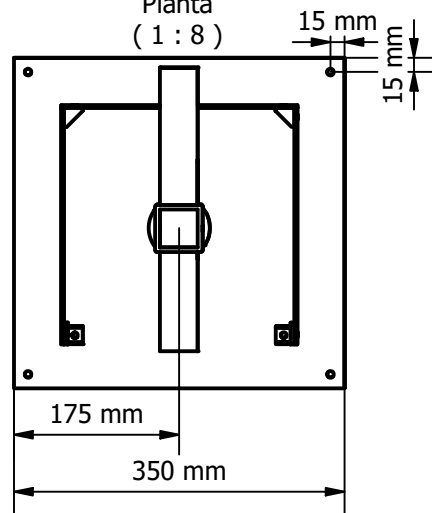
Inferior
(1 : 8)



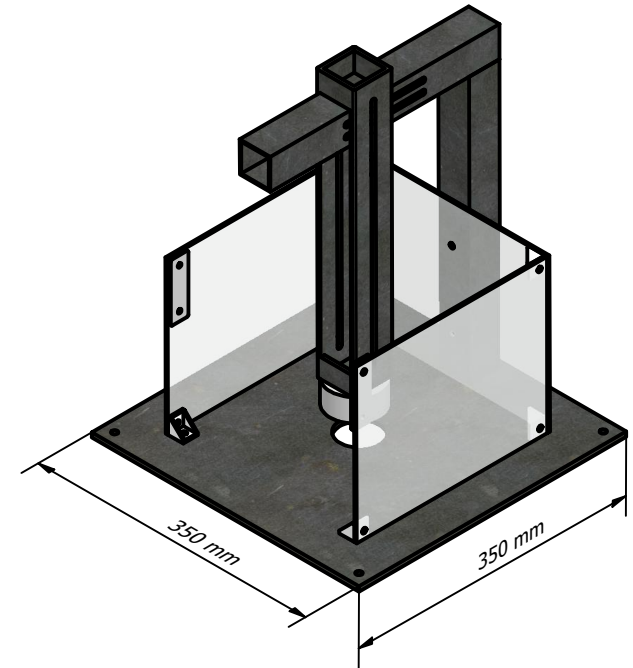
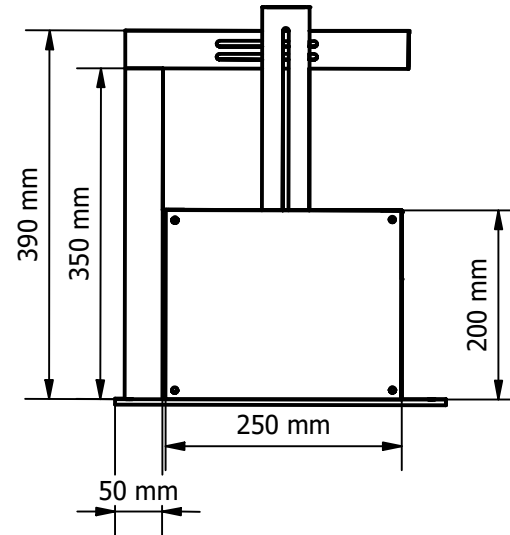
Frontal
(1 : 8)



Planta
(1 : 8)



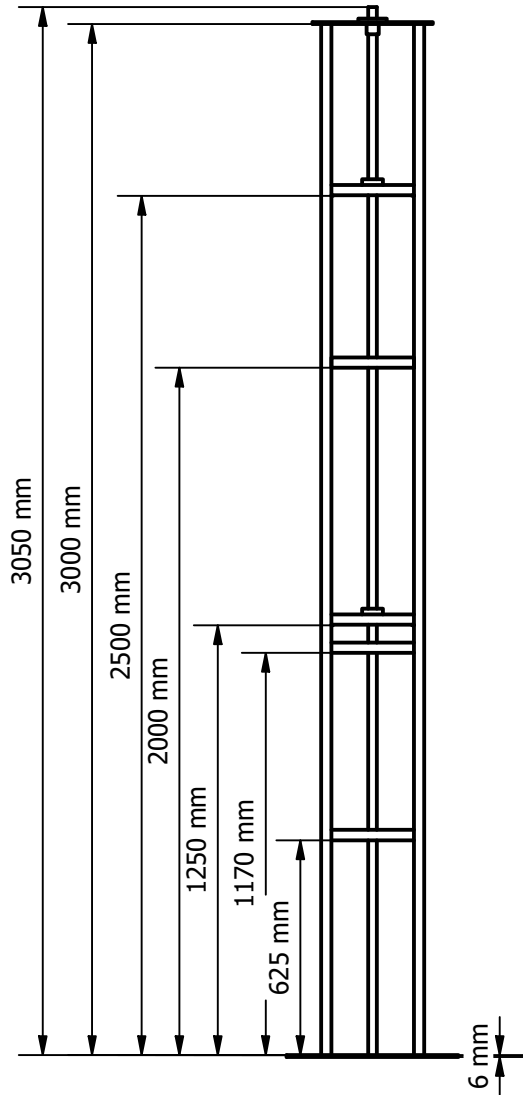
Perfil izquierdo
(1 : 8)



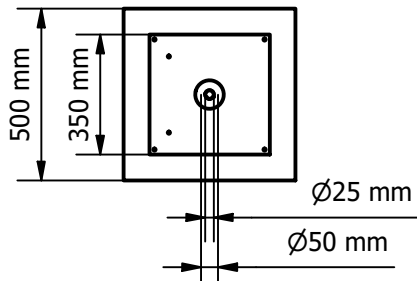
Isométrico
(1 : 7)

FECHA 09/07/25	 UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica		
CONTENIDO Banco de ensayos DWT	DIBUJADO POR Vicente Vega V.		REVISADO POR
	PROYECTO Memoria de Título	PLANO N° 1	
			

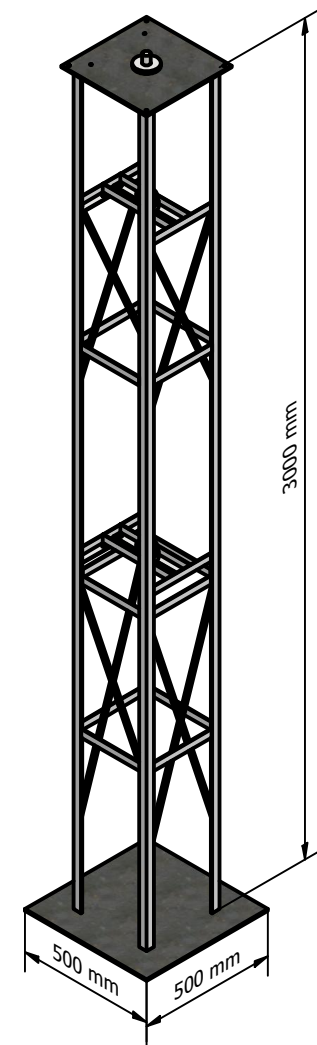
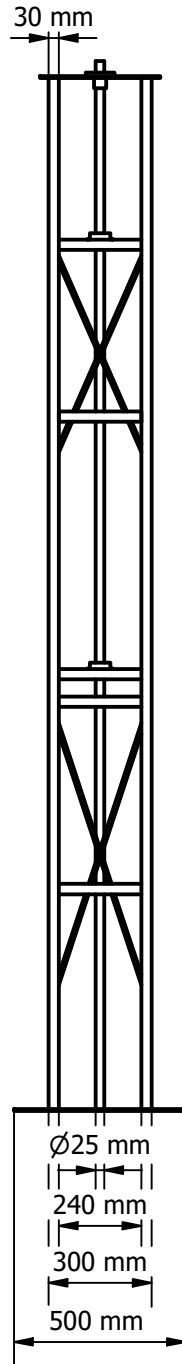
Frontal
(1 : 22)





Planta
(1 : 22)



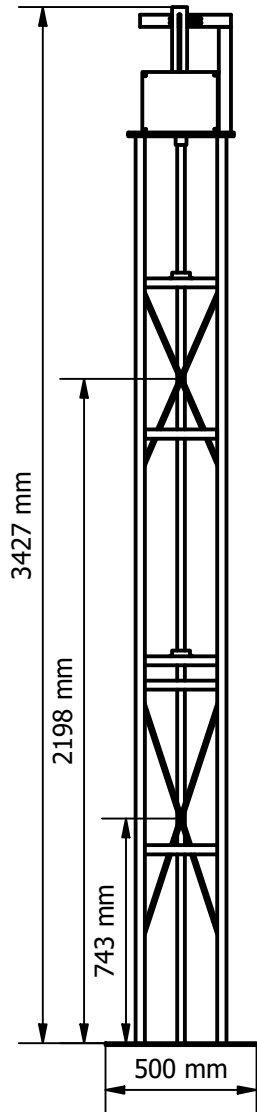
Perfil izquierdo
(1 : 22)



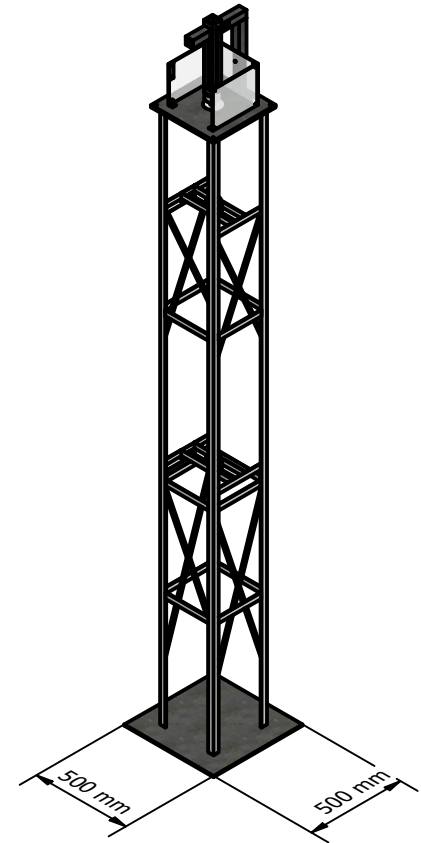
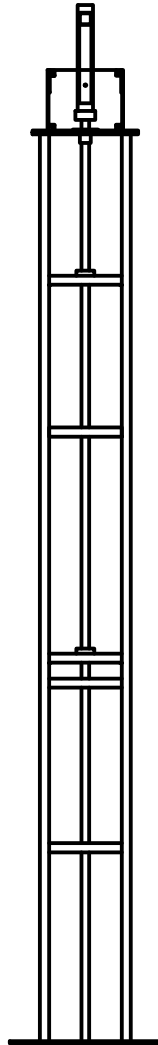
Isometrico
(1 : 22)

FECHA 09/07/25	 UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica		
CONTENIDO Estructura Ultra Fast Load Cell	DIBUJADO POR Vicente Vega V.		REVISADO POR
	PROYECTO Memoria de Título	PLANO N° 2	
			

Perfil derecho
(1 : 25)



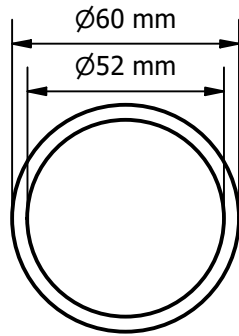
Frontal
(1 : 25)



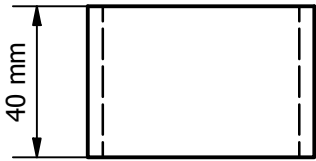
Isometrico
(1 : 30)

FECHA 09/07/25	 UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica			
CONTENIDO Banco de ensayos UFLC		DIBUJADO POR Vicente Vega V.		
		REVISADO POR		
PROYECTO Memoria de título	PLANO N° 3	ESC 1 : 25		

Inferior
(1 : 2)



Perfil derecho
(1 : 2)



Frontal
(1 : 2)

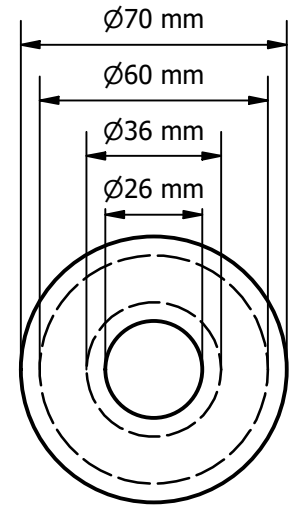


Union buje y perfil
cilindrico

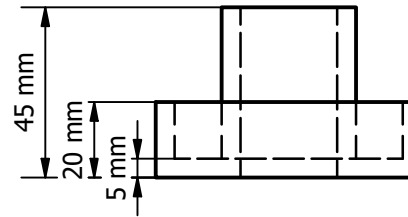
Isometrico
(1 : 2)



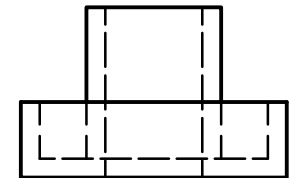
Inferior
(1 : 2)



Perfil derecho
(1 : 2)

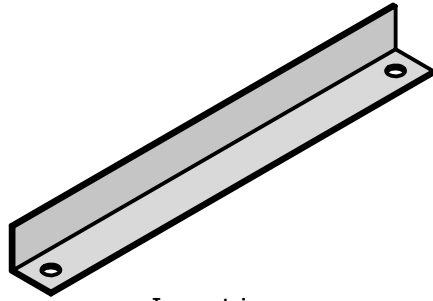


Frontal
(1 : 2)

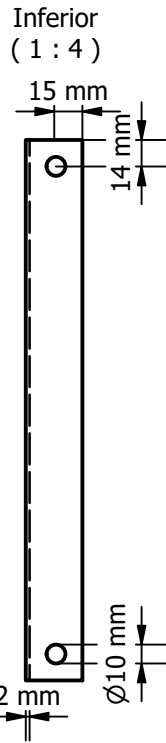


FECHA 09/07/25	 UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica		
CONTENIDO Buje soporte eje y perfil cilindrico	DIBUJADO POR Vicente Vega V.		REVISADO POR
	PROYECTO Memoria de Título	PLANO Nº 4	
			

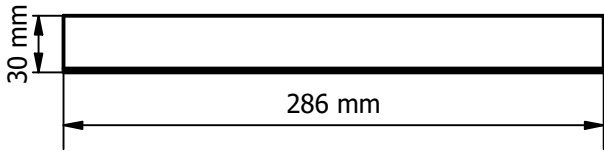
Perfil rodamiento



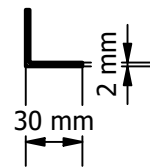
Isometrico
(1 : 4)



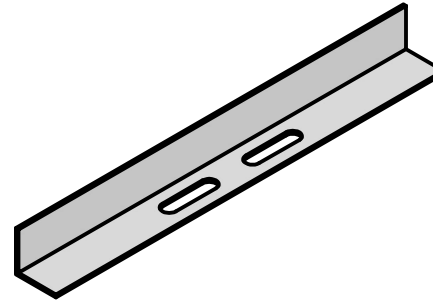
Frontal
(1 : 4)



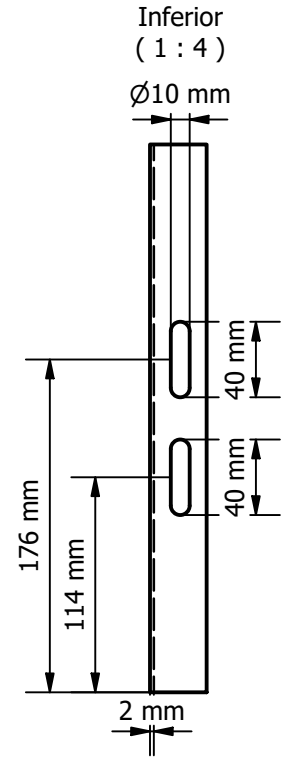
Perfil derecho
(1 : 4)



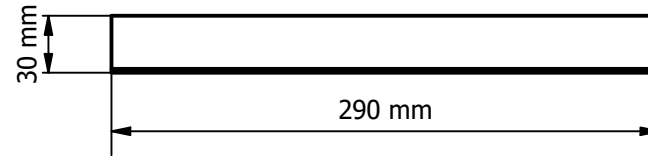
Perfil soporte



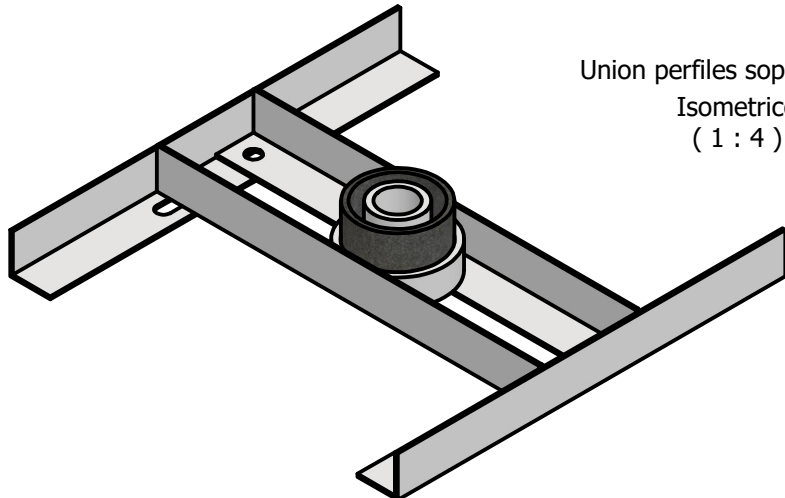
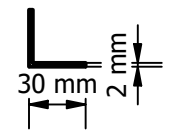
Isometrico
(1 : 4)




Frontal
(1 : 4)



Perfil derecho
(1 : 4)



Union perfiles soporte y buje
Isometrico
(1 : 4)

FECHA 09/07/25	 UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica		
CONTENIDO Perfiles soporte buje	DIBUJADO POR Vicente Vega V.		REVISADO POR
	PROYECTO Memoria de Título	PLANO N° 5	

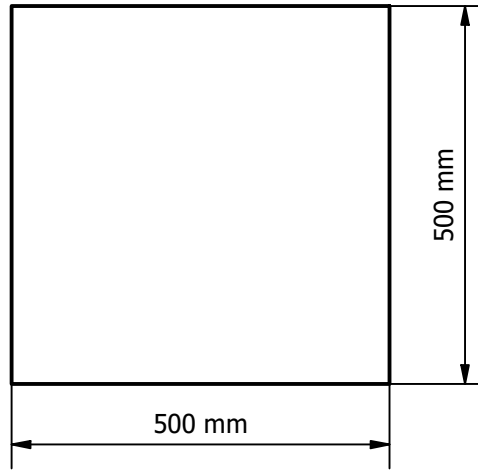


Placa inferior

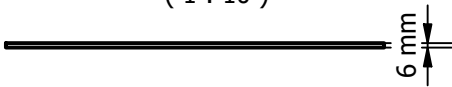


Isometrico
(1 : 10)

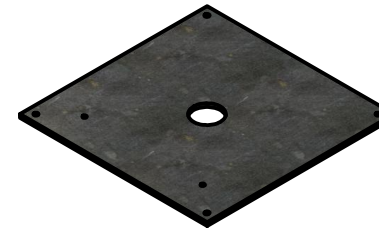
Inferior
(1 : 10)



Perfil derecho
(1 : 10)

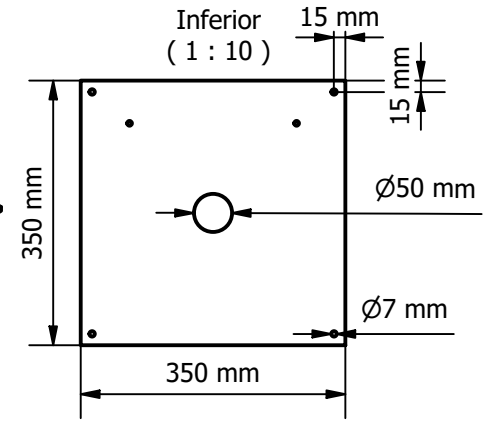


Placa superior



Isometrico
(1 : 10)

Inferior
(1 : 10)



Frontal
(1 : 10)



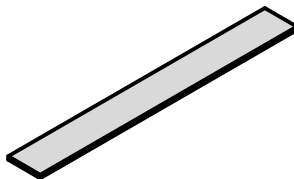
Perfil derecho
(1 : 10)



Frontal
(1 : 10)



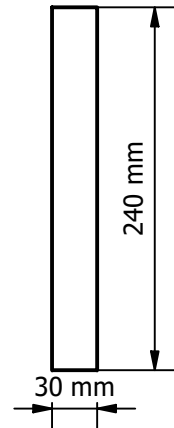
Cuadraturas



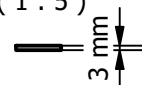
Perfil derecho
(1 : 5)




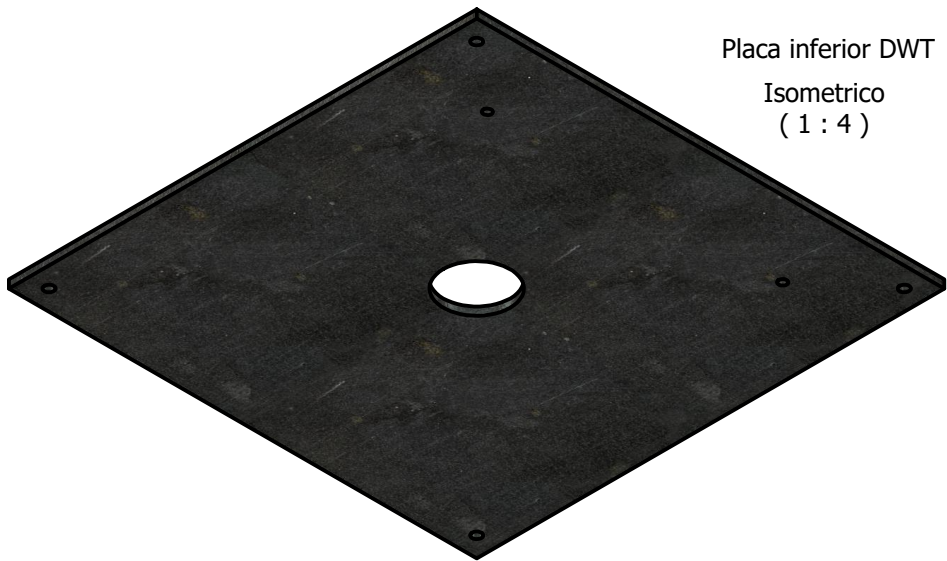
Inferior
(1 : 5)



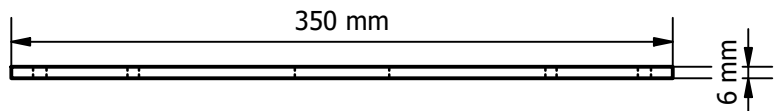
Frontal
(1 : 5)



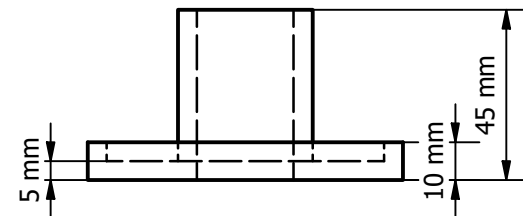
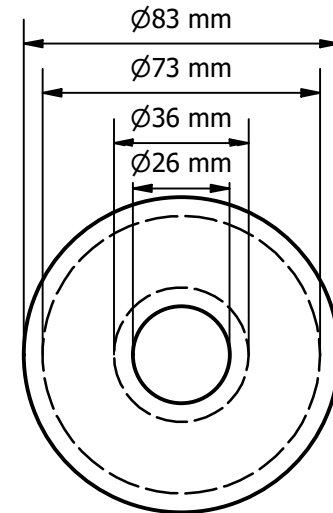
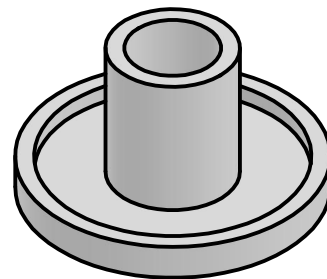
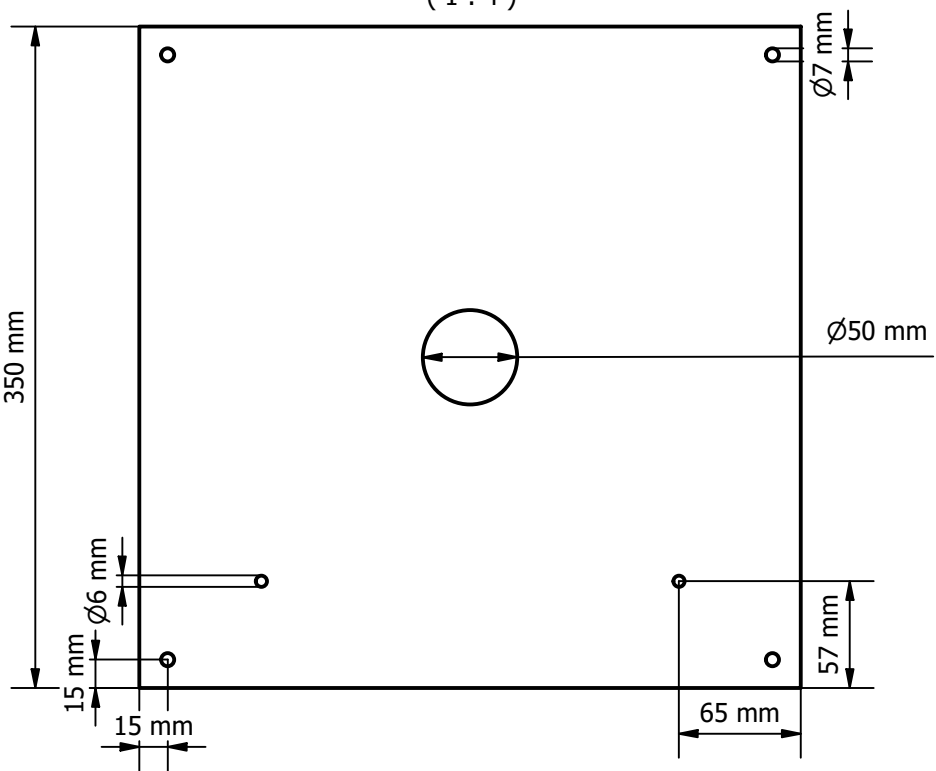
FECHA 09/07/25	 UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica		
CONTENIDO Placas estructura y cuadraturas	DIBUJADO POR Vicente Vega V.		REVISADO POR
	PROYECTO Memoria de Título	PLANO N° 6	
			





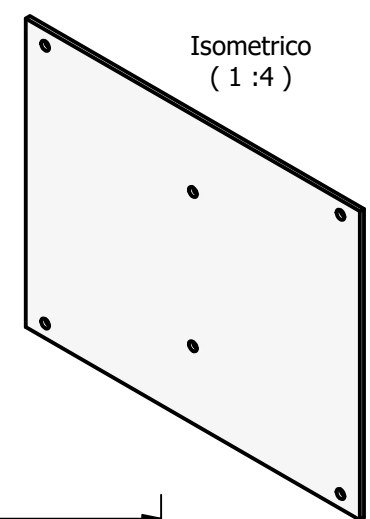
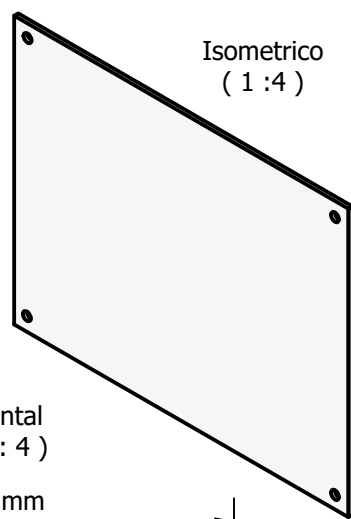
Inferior
(1 : 4)



Frontal
(1 : 4)

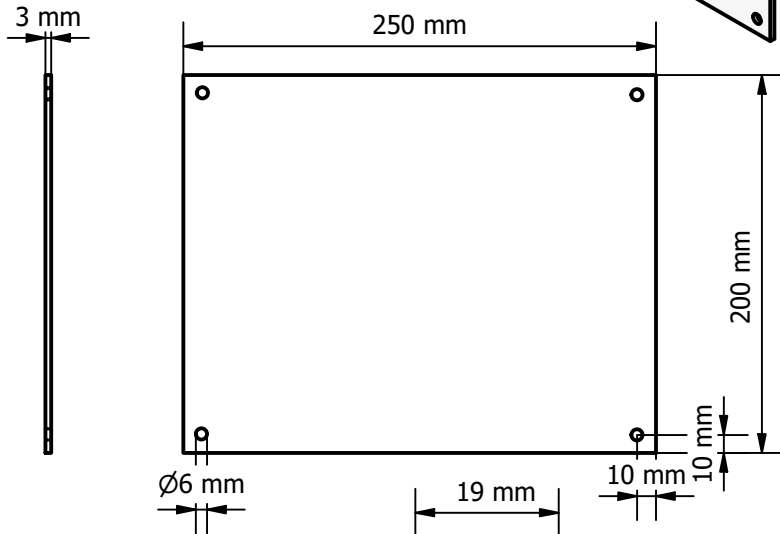


FECHA 09/07/25	 UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica		
CONTENIDO Placa DWT y buje soporte	DIBUJADO POR Vicente Vega V.		REVISADO POR
	PROYECTO Memoria de Título	PLANO N° 7	ESC 1 : 4
			



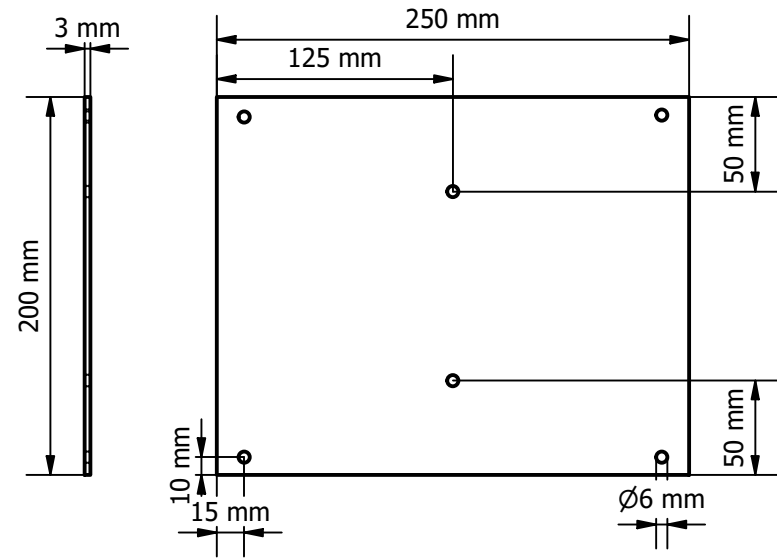
Perfil derecho
(1:4)

Frontal
(1:4)



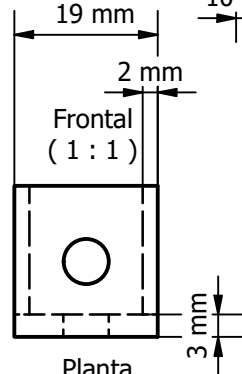
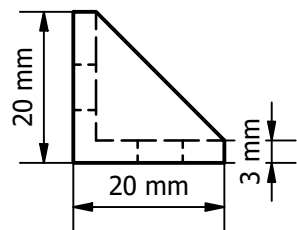
Perfil derecho
(1:4)

Frontal
(1:4)

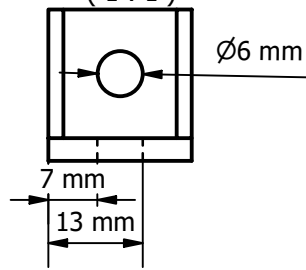



Perfil derecho
(1:1)

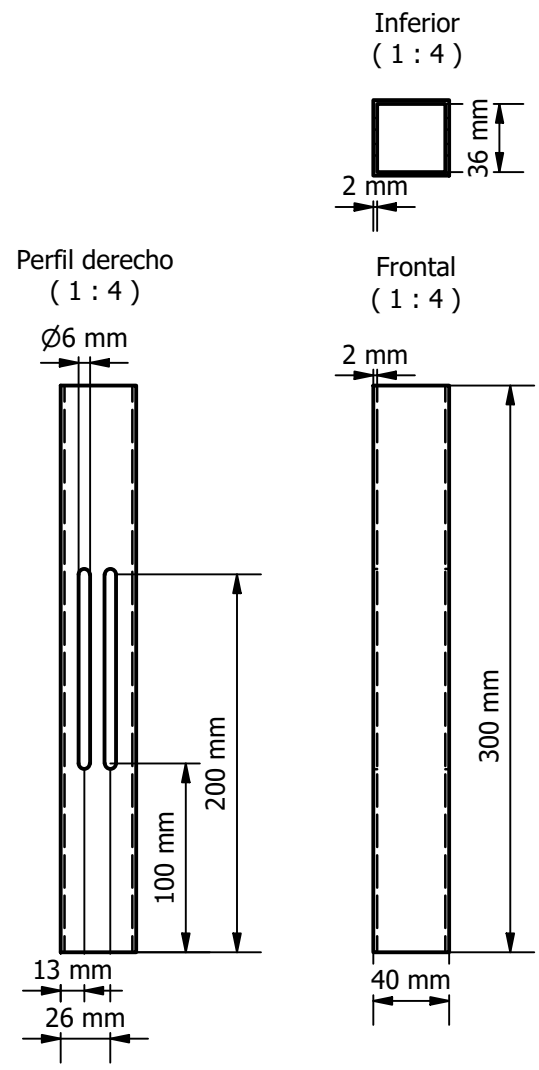
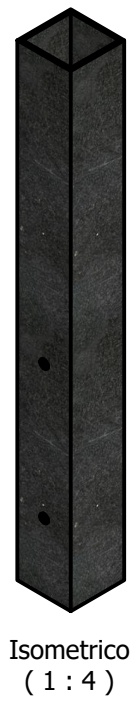
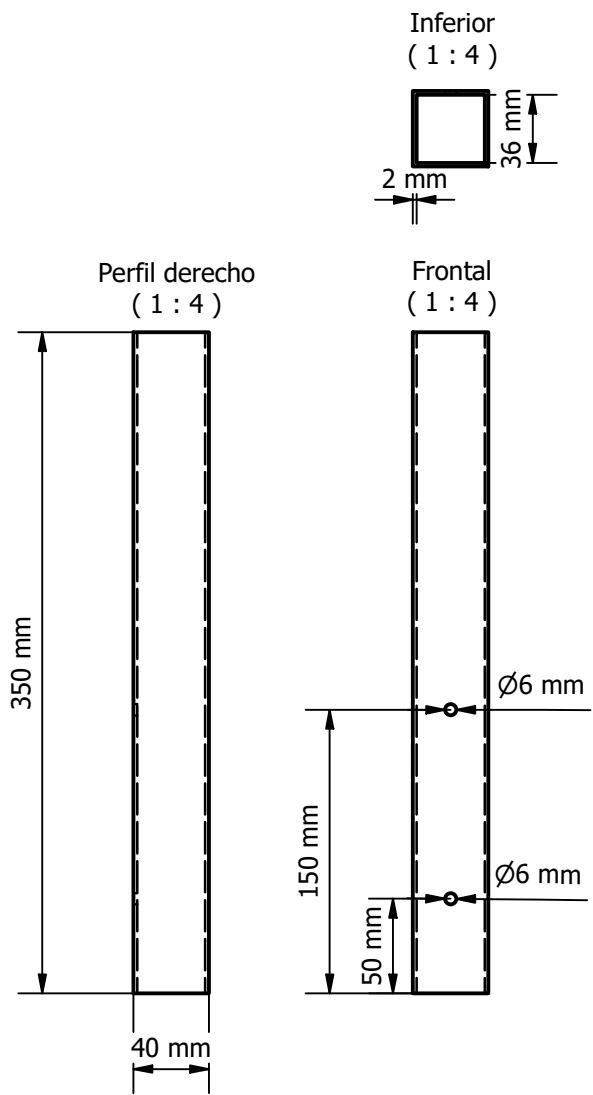
Frontal
(1:1)





Planta
(1:1)

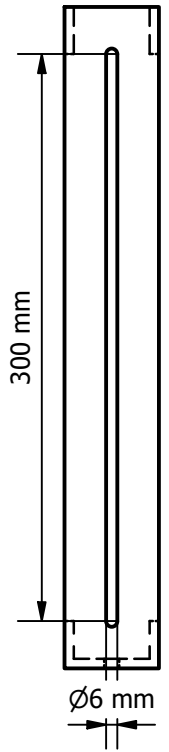


FECHA 09/07/25	 UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica		
CONTENIDO Acrylicos y angulos 90°	DIBUJADO POR Vicente Vega V.		REVISADO POR
	PROYECTO Memoria de Título	PLANO N° 8	

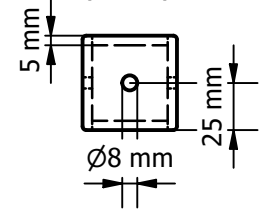


FECHA 09/07/25	 UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica		
CONTENIDO Estructura soporte electroiman	DIBUJADO POR Vicente Vega V.		REVISADO POR
	PROYECTO Memoria de Título		
PLANO N° 9	ESC 1:4		

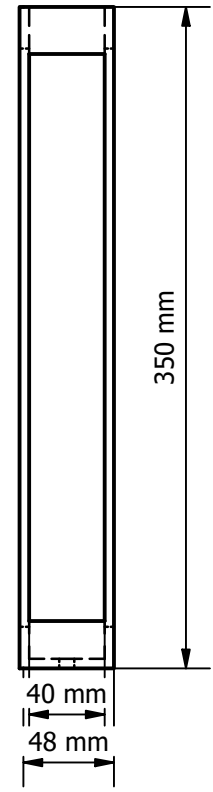
Perfil derecho
(1 : 4)



Inferior
(1 : 4)

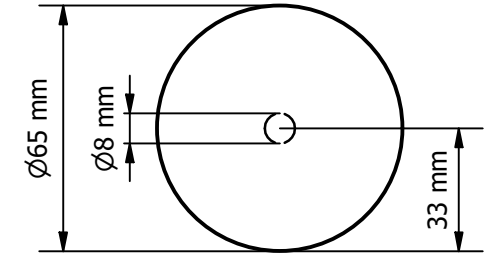


Frontal
(1 : 4)

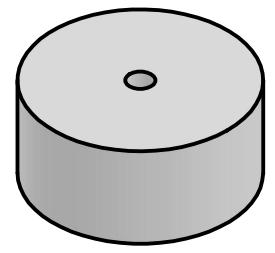
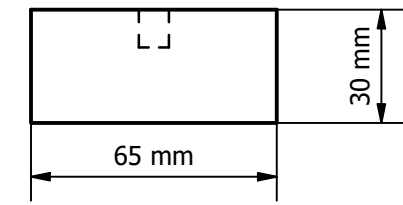


Isometrico
(1 : 4)

Inferior
(1 : 2)



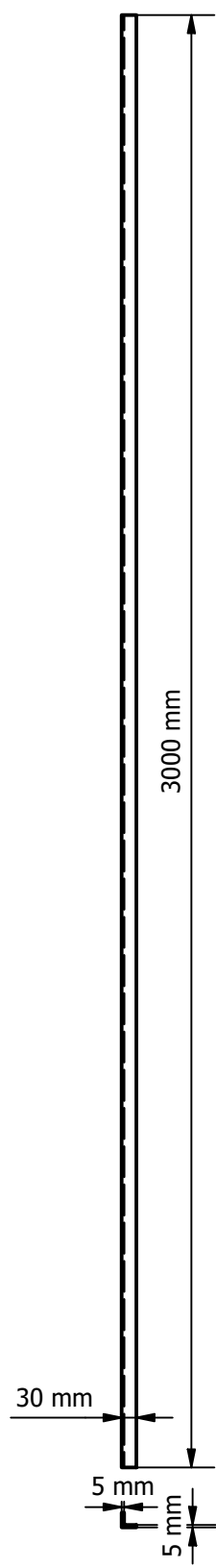
Frontal
(1 : 2)



Isometrico
(1 : 2)

FECHA 09/07/25	 UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica		
CONTENIDO Perfil configuracion altura de bola y electroiman	DIBUJADO POR Vicente Vega V.		REVISADO POR
	PROYECTO Memoria de Título	PLANO N° 10	
			

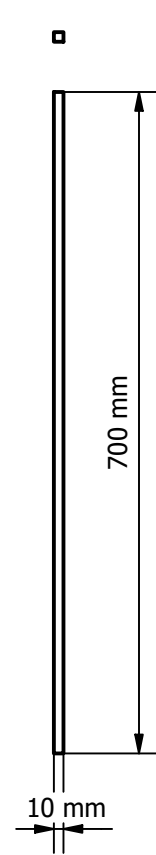
Inferior
(1 : 15)



Frontal
(1 : 15)

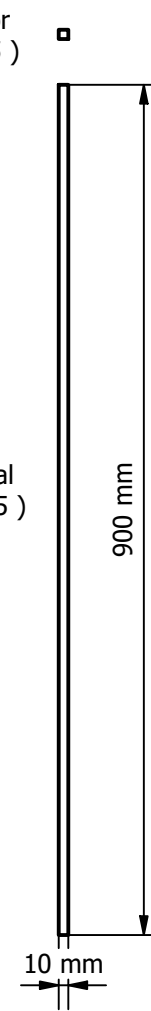
Inferior
(1 : 15)

Frontal
(1 : 15)



Inferior
(1 : 15)

Frontal
(1 : 15)



FECHA 09/07/25	 UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica		
CONTENIDO Perfiles estructura y diagonales	DIBUJADO POR Vicente Vega V.		
	REVISADO POR		
PROYECTO Memoria de Título	PLANO N° 11	ESC 1:15	