



Departamento de
Ingeniería Mecánica
Universidad de Concepción

Diseño y fabricación de un banco de ensayos para ensayos de impacto mediante una celda de carga

Emilio Francisco N. López Flores

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. Manuel Moncada M.

Agosto 2026
Concepción, Chile

©2026 Emilio Francisco Neftalí López Flores

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

Agradecimientos

Quiero aprovechar esta oportunidad para agradecer a mis padres Doris y Leopoldo por darme la crianza y las herramientas que me trajeron a este momento de mi vida, a mis hermanos Emmanuel, Katalina, Francisca y Diogo que siempre me han apoyado y acompañado, a León por siempre estar a mi lado mientras escribía esta memoria de título, a mi abuelita Quela y mi a toda mi familia, sin ellos no sería la persona que soy. A quienes ya no están pero su recuerdo y sus enseñanzas quedan.

También quiero agradecer al profesor Manuel Moncada, con quién conocí el mundo del DEM y que me motivó hasta el último día, a Gonzalo Mella por su amistad y todo su apoyo a lo largo de la carrera, con quién siento que hemos crecido tanto en lo profesional como en lo personal y no puedo esperar el día en que seamos colegas.

A Rodrigo Moreno y todos los trabajadores del Taller Mecánico, sin ellos no podría haber fabricado todos los componentes necesarios para realizar esta investigación y que siempre están dispuestos a ayudar, a Carlos Bustos de Civil por la guía y permitirme usar la cámara de curado. Y en general a todos los profesores que he tenido a lo largo de mi vida, gracias a quienes aprendí todo lo que sé y no estaría aquí de no ser por ellos. A los profesores de Informática con quienes compartí los primeros años de mi vida universitaria y de quienes aprendí cosas que aplico hasta el día de hoy y me ayudaron a estar seguro que mi vocación estaba en la mecánica.

A mis amigos de toda la vida, Bastián, Felipe, Fernando, Luciano, Valentina y muchos más, con quienes he crecido y hemos vivido innumerables aventuras, y espero que así sea para toda la vida. A mis compadres, Francisca y Felipe, y a mi ahijada Violeta por recibirme siempre que voy a Santiago. A mis amigos que conocí en la universidad, con quienes compartí estos últimos años, donde aprendí que los problemas nunca son más grandes que la solución a ellos y que no hay nada de malo en tomarse su tiempo para lograr las metas.

Gracias a la vida, porque es la única que tenemos y hay que aprovecharla al cien por ciento.

Además quiero agradecer Fondecyt de Iniciación, Folio 11251676, el cual fue indispensable para la realización de esta investigación. Asimismo, a la Facultad de Ingeniería por el Fondo de Movilidad Académica Estudiantil, gracias al cual pude conocer el Laboratório de Tecnologia Mineral en la Universidad Federal de Rio de Janeiro y trabajar con el Profesor Marcelo Tavares y todo su equipo, Vivian, Lipe, Anderson y Tulio, a quienes agradezco la bienvenida y la ayuda que me brindaron en mi estadía en su laboratorio, que me abrieron la mente a lo que se puede aspirar en términos profesionales y por poder conocer su cultura. A la Universidad de Concepción por sus interminables talleres y charlas y actividades que hacen que la experiencia universitaria sea única y que tiene el campus mas bonito que he conocido.

Resumen

La conminución representa una de las operaciones de mayor consumo energético en la industria minera, llegando a concentrar una parte significativa de la energía utilizada en una mina. Debido a que solo una pequeña parte de esta energía es empleada efectivamente en la generación de nuevas superficies de fractura, resulta fundamental desarrollar metodologías experimentales que permitan caracterizar la respuesta materiales sometidos a impacto y estimar la energía asociada a la fractura primaria.

En este trabajo se diseñó, construyó y validó un banco de ensayos tipo Drop Weight Test (DWT) mediante una celda de carga, con el objetivo de evaluar su capacidad para caracterizar eventos de fractura por impacto utilizando una alternativa de menor costo respecto a sistemas especializados. Para ello, se implementó una metodología de calibración basada en ensayos de compresión realizados en una máquina universal Zwick Roell Z005, determinándose una rigidez equivalente del sistema de 5206 N/mm y una sensibilidad de 2.34 mV/V para la celda de carga utilizada.

Posteriormente se desarrolló un procedimiento de fabricación y manejo de probetas cilíndricas de cemento de 13 mm de diámetro, las cuales fueron utilizadas para validar el sistema experimental. Se realizaron en total 113 ensayos de impacto sobre muestras de cemento y partículas de cuarzo bajo distintas condiciones de velocidad, empleando tanto la celda de carga como un sensor piezoeléctrico PCB Piezotronics 208C05 para comparar el desempeño de ambas técnicas de medición.

Los resultados mostraron que la celda de carga es capaz de identificar adecuadamente el instante de impacto, la fractura primaria y la energía específica de fractura asociada, obteniendo valores comparables a los registrados mediante el sensor piezoeléctrico. Para las probetas de cemento, las diferencias observadas en el parámetro e_{50} fueron inferiores a 10 J/kg para una velocidad de impacto de 1,1 m/s y del orden de 60 J/kg para 1,5 m/s. En el caso del cuarzo, se observó una mayor dispersión experimental atribuida a la heterogeneidad inherente del material. Adicionalmente, los resultados fueron contrastados con ensayos realizados mediante un equipo Ultra Fast Load Cell (UFLC) en el Laboratorio de Tecnología Mineral de la Universidad Federal de Río de Janeiro, obteniéndose tendencias consistentes respecto al comportamiento de fractura primaria de los materiales estudiados.

Se concluye que una celda de carga convencional, adecuadamente calibrada, es una alternativa viable para la realización de ensayos de impacto destinados a la determinación de energía específica de fractura primaria, por otro lado, no proporciona una respuesta adecuada para el análisis de la energía de conminución debido a la naturaleza de la celda. La metodología desarrollada proporciona una herramienta experimental reproducible y de bajo costo para estudios de conminución, contribuyendo a la comprensión de los mecanismos de fractura y al desarrollo de estrategias orientadas a mejorar la eficiencia energética de los procesos mineros.

Palabras clave: Drop Weight Test, fractura primaria, conminución, energía específica de fractura, celda de carga, impacto, cuarzo, cemento.

Abstract

Mining is one of the main pillars of the Chilean economy; however, comminution processes, including crushing and grinding, account for a significant fraction of the energy consumed in mining operations. Improving the understanding of particle breakage mechanisms is therefore essential for increasing energy efficiency in mineral processing. This study presents the design and validation of a low-cost instrumented Drop Weight Test (DWT) bench equipped with a load cell for the characterization of primary fracture energy under impact loading conditions.

The experimental setup was designed based on Hertzian contact theory and instrumented with a 2-ton DYMH-102 load cell. A calibration procedure was developed using quasi-static compression tests performed on a Zwick Roell Z005 testing machine, allowing the determination of the load cell stiffness and calibration parameters. In addition, a specimen preparation methodology was established to produce cylindrical cement samples with controlled geometry, ensuring experimental repeatability.

A total of 113 impact tests were conducted on cement specimens and quartz particles at impact velocities of 1.1 and 1.5 m/s. The force-time response recorded by the load cell was used to estimate the specific primary fracture energy, which was subsequently compared with measurements obtained using a piezoelectric sensor specifically designed for impact applications. The results showed that the piezoelectric sensor provides a more accurate representation of the impact event due to its superior dynamic response. Nevertheless, after calibration, the load cell produced consistent estimates of primary fracture energy, with differences ranging from approximately 1% to 11% depending on the material and testing conditions.

Additional comparisons were performed using data obtained from an Ultra-Fast Load Cell (UFLC) system at the Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) at Universidade Federal do Rio de Janeiro, demonstrating that the proposed methodology is capable of capturing trends consistent with established impact characterization techniques. The results indicate that load-cell-based DWT systems represent a technically viable and economically attractive alternative for primary fracture characterization of brittle materials, contributing to the development of more accessible experimental tools for comminution research and energy-efficient mining.

Keywords: Drop Weight Test, primary fracture energy, comminution, load cell, piezoelectric sensor, impact breakage, mineral processing, quartz, cement

Contenidos

Lista de Figuras	1
Lista de Tablas	3
Nomenclatura	4
1 Introducción	5
1.1 Contexto	5
1.2 Estado del arte	5
1.3 Criterios de diseño	8
1.4 Objetivos	8
2 Metodología	9
2.1 Cálculos previos	9
2.1.1 Dimensionamiento celda de carga	10
2.1.2 Cálculo de Energía de fractura	11
2.2 Diseño banco de ensayos	13
2.3 Calibración celda de carga	13
2.4 Fabricación probetas de cemento	15
2.5 Selección mineral de cuarzo y jaspolita	17
2.6 Ensayos de impacto	18
2.7 Ensayos de impacto con UFLC en Laboratorio de Tecnología Mineral	19
3 Resultados	22
3.1 Ensayos de impacto sobre muestras de cemento	22
3.1.1 Ensayos sobre cemento a 1.5 m/s	22
3.1.2 Ensayos sobre cemento a 1,1 m/s	23
3.2 Ensayos de impacto sobre muestras de cuarzo	24
3.3 Ensayos con banco UFLC	24
3.4 Comparación entre celda de carga y sensor piezoeléctrico	25
3.5 Comparación celda de carga y Ultra Fast Load Cell (UFLC)	28
4 Algoritmo para la modelación de fractura en DEM	31
4.1 Introducción	31
4.2 Formulación de DEM	31
4.3 Bonded Particle Method	32
4.4 Particle Replacement Method	33
5 Conclusiones	36
Anexo A Planos de fabricación	39
Anexo B Código en Python	43
B.1 Calibración celda de carga	43
B.2 Impulso absorbido por Celda de carga	45

Lista de Figuras

Figura 1.1	Máquina Drop Weight Test (derecha) y esfera de acero y placa magnética.	5
Figura 1.2	Configuración del equipo SILC.	6
Figura 2.1	Diagrama de flujo de la investigación.	9
Figura 2.2	Celda de carga modelo DYM-102 de 2 toneladas.	10
Figura 2.3	Gráfico fuerza-tiempo ensayo sin probeta.	11
Figura 2.4	Ensayo de impacto sin probeta.	12
Figura 2.5	Impacto y fractura de probeta.	12
Figura 2.6	Banco de ensayos y sus dimensiones generales en [mm].	13
Figura 2.7	Celda de carga montada en Máquina de compresión Zwick Roell modelo Z005.	14
Figura 2.8	Gráficos obtenidos para calibración.	14
Figura 2.9	Molde probetas de cemento y sus dimensiones en [mm].	15
Figura 2.10	Procedimiento de preparación probetas de cemento.	16
Figura 2.11	Probetas de cemento: Buena (izq.), descartada por una muesca (medio) y con burbujas (der.)	16
Figura 2.12	Partículas de cuarzo y jaspilita con sus medidas correspondientes.	17
Figura 2.13	Distribución de masas de partículas de cuarzo.	17
Figura 2.14	Esquema de conexión de instrumentos.	18
Figura 2.15	Esquema de conexión de instrumentos en LTM.	19
Figura 2.16	Ejemplo gráfico distribución de energía específica de fractura primaria con curva desplazada y compacta.	20
Figura 2.17	Ejemplo gráfico distribución de energía específica de fractura primaria con curva desplazada.	21
Figura 3.1	Ensayos DWT con celda de carga sobre probetas de cemento a 1,5 m/s.	22
Figura 3.2	Ensayo de impacto sobre probetas de cemento con SPE a 1,5 m/s.	23
Figura 3.3	Ensayos de impacto con celda de carga sobre probetas de cemento a 1,1 m/s.	23
Figura 3.4	Ensayo de impacto sobre probetas de cemento con SPE a 1,1 m/s.	23
Figura 3.5	Ensayos de impacto con celda de carga sobre mineral de cuarzo a 1,1 m/s.	24
Figura 3.6	Ensayos de impacto con piezoeléctrico sobre mineral de cuarzo a 1,1 m/s.	24
Figura 3.7	Ensayos realizados en LTM sobre: (a) Cemento. (b) Cuarzo. (c) Jaspilita.	25
Figura 3.8	Energía específica de fractura primaria del cemento versus su probabilidad de fractura primaria utilizando ambos sensores a 1,5 m/s.	26
Figura 3.9	Energía de fractura primaria específica del cuarzo versus su probabilidad de fractura primaria utilizando ambos sensores a 1,1 m/s.	27

Figura 3.10 Energía específica de fractura primaria del cemento versus su probabilidad de fractura primaria utilizando ambos sensores a 1,1 m/s.	27
Figura 3.11 Distribución de energía específica de fractura primaria de probetas de cemento, mineral de cuarzo y jaspolita.	28
Figura 3.12 Probeta de cemento montada en Máquina de compresión Zwick Roell modelo Z005.	29
Figura 3.13 Distribución de energía específica de fractura primaria de probetas de cemento, mineral de cuarzo y jaspolita, con UFLC y celda de carga.	30

Lista de Tablas

Tabla 2.1	Propiedades esferas de acero.	9
Tabla 2.2	Propiedades de celda de carga seleccionada.	10
Tabla 2.3	Ensayos de calibración	12
Tabla 2.4	Propiedades probetas cemento.	15
Tabla 2.5	Dimensiones de algunas probetas de cemento válidas.	16
Tabla 2.6	Configuración del osciloscopio para las mediciones.	18
Tabla 3.1	Ensayos realizados en Laboratorio de Vibraciones Mecánicas (LVM). . . .	22
Tabla 3.2	Ensayos realizados en Laboratorio de Tecnología Mineral (LTM)	25
Tabla 3.3	Ensayos realizados a velocidad 1,5 m/s.	26
Tabla 3.4	Ensayos realizados a velocidad 1,1 m/s.	26
Tabla 3.5	Comparación UFLC y celda de carga.	30

Nomenclatura

C	Factor de calibración
C_c	Capacidad celda de carga, kN
E_c	Energía absorbida por la celda, J
E_e	Energía error medición, J
E_i	Energía de impacto, J
E_m	Energía de fractura primaria , J
E_{50}	Energía específica de fractura, J/kg
$E_{k,i}$	Energía cinética impacto, J
$E_{k,r}$	Energía cinética rebote, J
F_c	Fuerza medida por la celda, N
P	Probabilidad de fractura, %
S_c	Sensibilidad celda de carga, mV/V
h	Altura de caída esfera de acero, m
m_e	Masa esfera de acero , kg
t_c	Tiempo de contacto, s
v_i	Velocidad de impacto, m/s
v_r	Velocidad de rebote, m/s
CLP	Peso Chileno
DWT	Drop Weight Test
LTM	Laboratorio de Tecnología Mineral
LVM	Laboratorio de Vibraciones Mecánicas
PFLC	Piezoelectric Fast Load Cell
Q	Cuarzo
SILC	Short Impact Load Cell
SPE	Sensor Piezoeléctrico
UFLC	Ultra Fast Load Cell

1 Introducción

1.1 Contexto

En Chile, la minería es uno de los pilares fundamentales de la economía, constituyendo más del 10% del producto interno bruto nacional y una de las principales fuentes de inversión extranjera en el país [1]. En la minería, distintos estudios han señalado que los procesos de conminución, que incluyen trituración y molienda, significan uno de los mayores consumos energéticos en la industria minera, llegando a representar hasta un 50% del consumo energético total en una mina [2, 3]. A pesar del elevado costo energético de la conminución, solo un 9% de la energía aplicada se utiliza efectivamente en la fractura de las partículas [4], mientras que el resto se disipa en forma de calor, vibraciones, entre otros fenómenos. Por lo que encontrar soluciones que permitan reducir dichos costos son esenciales para lograr una minería más eficiente, ya que la minería representa aproximadamente un 6.2% del consumo global de energía [5]. Además, sin avances tecnológicos, mantener las operaciones actuales y satisfacer la creciente demanda llevarán a un aumento en el consumo de energía significativo para 2060 [6].

Para ello se debe comprender la energía necesaria para lograr fracturar partículas es fundamental para mejorar la eficiencia energética de los procesos de reducción de tamaño en la industria minera [7]. Por lo que para este trabajo de investigación se realizarán ensayos experimentales tanto de calibración como de impacto para encontrar la energía específica de fractura primaria sobre probetas de cemento y cuarzo. Además se validará la metodología experimental utilizando un sistema de referencia instalado en el Laboratorio de Tecnología Mineral (LTM) de la Universidad Federal de Río de Janeiro, a cargo del profesor Marcelo Tavares.

1.2 Estado del arte

El ensayo Drop Weight Test (DWT) consiste en un ensayo en el que se deja caer un cuerpo de masa conocida desde una altura específica sobre una muestra, con el objetivo de analizar su resistencia a la fractura bajo condiciones de impacto. Este método se emplea comúnmente para investigar la transición dúctil-frágil de los materiales. En el trabajo desarrollado por [8] se utilizó un DWT (Fig. 1.1) para determinar la energía mínima requerida para fracturar partículas individuales de mineral de cobre provenientes del yacimiento Sarcheshmeh, Irán.



Figura 1.1 Máquina Drop Weight Test (derecha) y esfera de acero y placa magnética [8].

Para ello, se elaboraron muestras con tamaños comprendidos entre 15 mm y 120 mm, las

cuales fueron acondicionadas con superficies planas, de modo que el impacto de la esfera se produjera directamente sobre una de estas caras. Las muestras fueron sometidas a impactos controlados mediante la caída libre de una esfera de acero desde alturas predeterminadas. Los resultados indicaron la existencia de una energía umbral de fractura (E_{Bt}), que presenta una relación inversa con la masa de la partícula y que puede describirse mediante la expresión $E_{Bt} = 6,27m_r^{-0,7}$, donde m_r representa la masa de la muestra de cobre.

Barbosa et al. [9] utilizan una prueba de Short Impact Load Cell (SILC), cuyo objetivo es romper una muestra con un impacto controlado, medir fuerza y energía en función del tiempo, para derivar propiedades mecánicas del material. En este caso utilizaron probetas cilíndricas de diámetro 11,7 mm y muestras irregulares de entre 3,35 y 9 mm, a las cuales se les realizan ensayos de impacto utilizando una bola de acero sobre rieles, como se muestra en la Fig. 1.2 y, mediante strain-gauges, registrar una curva fuerza-tiempo, con lo que se obtiene la fuerza de fractura, energía absorbida hasta la fractura y la deformación elástica previa a la fractura. En conclusión, se encontró que la prueba SILC funciona con muestras pequeñas o irregulares y se encontró que la energía específica y la resistencia a la tracción no dependen fuertemente de la velocidad de impacto en materiales frágiles.

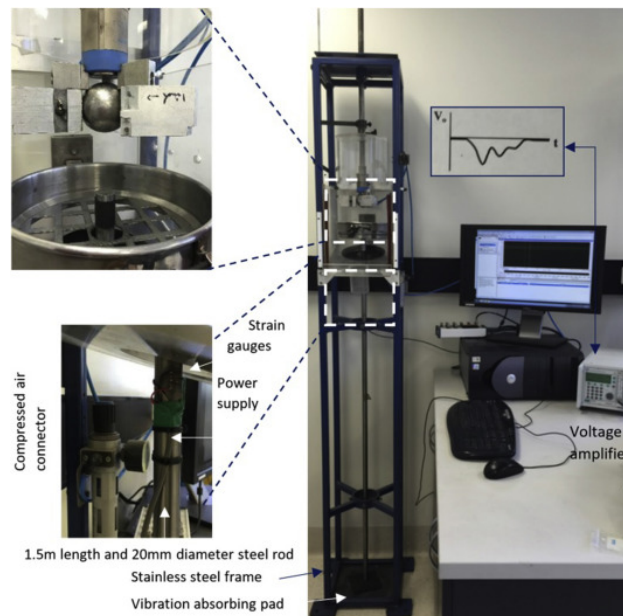


Figura 1.2 Configuración del equipo SILC [9].

La investigación de Lois-Morales et al. [10] busca encontrar cómo cambian las propiedades de materiales cuando el tamaño de partícula disminuye hasta una escala de conminución, analizaron la resistencia a tracción y los módulos elásticos aparentes de rocas ígneas alteradas mediante ensayos de impacto instrumentado en mini-testigos cilíndricos de tamaños entre 3 y 30 mm. Se demostró que la resistencia es independiente al tamaño de partícula en estos rangos, lo que sugiere que este parámetro puede considerarse como una propiedad intrínseca del material. Por otro lado, los módulos elásticos aparentes y la energía específica de fractura revelan una clara dependencia del tamaño, concorde a la teoría de Weibull, con lo que se valida el uso de la SILC como herramienta para relacionar propiedades geométricas con el comportamiento de rotura primaria en conminución. Sin embargo, la variación de las propiedades primarias de rotura a medida que disminuye el tamaño de la partícula muestra un comportamiento diferente, dependiente del mineral, pero dicen que sigue siendo relevante el estudio de materiales en diferentes tamaños, ya que el estudio realizado en la Universidad de Utah por Tavares et al.[11], en el cual se basa su investigación, no se identificó una

tendencia general clara, y que el mineral de cobre fue la única muestra que mostró un aumento sistemático de la rigidez con el tamaño de partícula.

Uno de los principales desafíos en la caracterización mecánica de partículas minerales es la estimación confiable de la energía específica de fractura en ensayos de impacto. Tradicionalmente, esta medición se ha realizado mediante el UFLC, que utiliza barras tipo Hopkinson para registrar la respuesta fuerza-tiempo con alta resolución temporal, permitiendo describir adecuadamente los procesos dinámicos de fractura mediante modelos de contacto basados en la teoría de Hertz. No obstante, el UFLC presenta limitaciones prácticas asociadas a su alto costo, complejidad instrumental y a la necesidad de un control experimental riguroso para asegurar el alineamiento del sistema.

Para abordar estas limitaciones, el estudio de Li et al. [12] propone una Piezoelectric Fast Load Cell (PFLC), que evita el uso de barras largas estilo Hopkinson y reduce la complejidad instrumental utilizando un sensor piezoeléctrico y una esfera de acero como impactador. Mediante un análisis detallado de la curva fuerza-tiempo, el estudio distingue la energía absorbida por la partícula hasta el inicio de la fractura y la energía total de impacto. De la misma manera, el uso de probetas de geometría controlada y el análisis estadístico de poblaciones de partículas permitió reducir la dispersión asociada a la forma y alineamiento, dejándola como una alternativa más práctica, de menor costo y representativa a la hora de caracterizar mecánicamente a escala de conminución.

En 2014 Ballantyne et al. [3] enfatiza que la eficiencia de conminución está fuertemente controlada por eventos de rotura primaria, dominados por mecanismos de impacto y compresión, y que la iniciación y propagación de fracturas dependen directamente de las propiedades mecánicas intrínsecas del material. Además, que propiedades como la resistencia, la rigidez y la energía de fractura influyen en la fragmentación y en el consumo energético de una mina. También comentan que este consumo energético representa un 0,2% del consumo eléctrico mundial. Con esto en mente, el desarrollo de bancos de ensayos de impacto más compactos y asequibles para caracterizar la resistencia a la fractura de minerales es sumamente importante para buscar mejorar la eficiencia de los procesos de reducción de tamaño de minerales.

En 2025 Mella [13] utilizó un DWT para encontrar la influencia de la velocidad de impacto en la fractura primaria del mineral de cobre, diseñó y fabricó un banco de ensayos modificado que permitió controlar la velocidad de impacto variando la altura de caída del percutor, complementado con la instrumentación de un sensor piezoeléctrico (Sensor Piezoeléctrico (SPE)) calibrado experimentalmente. Quedó en evidencia una relación inversa entre la velocidad de impacto y la energía específica necesaria para producir la fractura primaria, observándose menores requerimientos energéticos a bajas velocidades. Estos resultados sugieren que la velocidad de carga influye directamente en la redistribución local de esfuerzos y en los mecanismos de fractura del material. Lo cual resulta relevante, ya que valida el uso de ensayos instrumentados para estimar energía de fractura primaria bajo condiciones dinámicas, metodología que también sustenta la presente investigación aplicada a materiales frágiles de interés minero.

Los estudios recientes han comenzado a complementar los ensayos de impacto tradicionales con técnicas avanzadas de caracterización tridimensional de partículas. En este contexto, Lois-Morales et al. (2026)[14] desarrollaron una metodología que combina tomografía computarizada de rayos X (XCT), análisis mineralógico automatizado SEM-EDS y algoritmos de aprendizaje profundo para estudiar la propagación de fracturas en partículas minerales complejas sometidas a impacto mediante un equipo SILC. Los autores analizaron partículas

antes y después de la fractura, cuantificando la extensión de grietas y relacionándola con la energía absorbida durante el impacto. Los resultados mostraron que la iniciación y propagación de fracturas están fuertemente influenciadas por la distribución espacial de minerales con propiedades mecánicas contrastantes, particularmente en dominios que contienen calcita, magnetita y feldespatos. El estudio demuestra que la respuesta al impacto no depende únicamente de la energía aplicada, sino también de la microestructura interna de la partícula, proporcionando una base para futuras estrategias de conminución selectiva y mejora de la eficiencia energética en procesos mineros.

1.3 Criterios de diseño

Para este trabajo de investigación se tendrán en cuenta los siguientes criterios de diseño:

- Se realizará el diseño de mejoras a un banco de ensayos de impacto, tales como mejorar el sistema de liberación del impactador, adaptación para distintos sensores y rigidez en general del banco, el cual contará con ajustes de altura para variaciones de velocidad de impacto.
- Se utilizarán probetas de cemento para aportar a la replicabilidad de la investigación.
- Se tendrá un ajuste de la altura del impactador para variar su velocidad entre 1 y 1.5 m/s .

1.4 Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo general es diseñar de un banco de ensayos para ensayos de impacto mediante celda de carga. Para ello se plantean los siguientes objetivos específicos (OE):

- i. Diseñar banco de ensayos para pruebas de impacto.
- ii. Calcular parámetros de calibración de la celda mediante ensayos de compresión.
- iii. Formular un procedimiento de manejo de probetas de cemento.
- iv. Comparar los resultados obtenidos utilizando un sensor piezoeléctrico.
- v. Comparar los resultados obtenidos en el LTM.

2 Metodología

Se deberá dimensionar el sensor que se utilizará para esta investigación, para ello se calcula la capacidad necesaria en el apartado siguiente. Luego, se diseñarán las modificaciones al banco de ensayos existente en el Laboratorio de Vibraciones Mecánicas (LVM) necesarias para adaptar el nuevo sistema de medición, además de mejoras al sistema de liberación del peso. A continuación se realizará la compra de los materiales necesarios para la fabricación de las modificaciones diseñadas anteriormente, para luego ser implementadas en el banco de ensayos.

Paralelamente a la fabricación de piezas, se prepararán las muestras de cemento a utilizar y se planteará un protocolo de manejo de estas para la homogeneidad de las probetas. Luego, se calibrará la celda de carga utilizando una máquina de ensayos de compresión de ensayos universal. Por último se realizarán los ensayos de impacto con esferas de acero sobre probetas de cemento preparadas con anticipación, en la Fig. 2.1 se presenta un diagrama de flujo de la investigación.

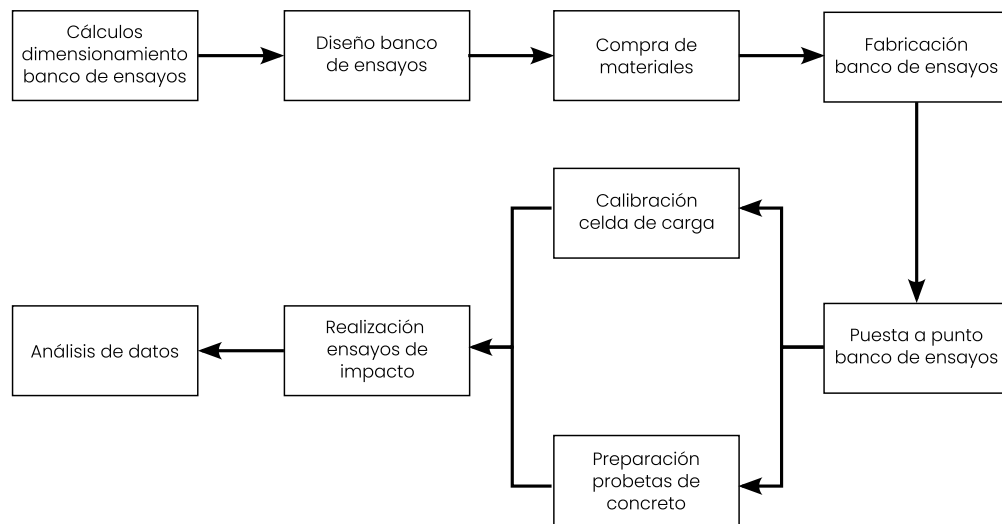


Figura 2.1 Diagrama de flujo de la investigación.

2.1 Cálculos previos

Se toma como base el banco de ensayos disponible en el Laboratorio de Vibraciones Mecánicas de la Facultad de Ingeniería y se adapta a las necesidades de esta investigación. Además, se cuenta con 4 esferas de acero en el laboratorio, cuyas propiedades se presentan en la Tabla 2.1

Tabla 2.1 Propiedades esferas de acero.

Diámetro [mm]	Masa [kg]
73	1,588
78,1	1,955
83,5	2,395
90	3,05

2.1.1 Dimensionamiento celda de carga

Para dimensionar la capacidad de la celda de carga a utilizar, teniendo en cuenta el peso de las esferas de acero disponibles en el laboratorio y las condiciones de borde del banco de ensayos, considerando la energía de impacto E_i con la bola más grande, de masa m_e de 3 kg, y una altura de caída h de 0,1 metros en la Ec. 1, se obtiene un valor de 2,943 J.

$$E_i = m_e gh \quad (1)$$

Además, se puede calcular la velocidad de impacto v_i de la bola con la Ec. 2, de 1,4 m/s.

$$v_i = \sqrt{2gh} \quad (2)$$

Luego, el impulso estará dado por la Ec. 3.

$$\Delta p = m_e v_i \quad (3)$$

Se considera en primera instancia una celda de carga de 2 toneladas, cuya capacidad C_c será de 19,62 kN. Luego, se puede estimar el tiempo de contacto t_c máximo soportado por la celda con la Ec. 4, donde, reemplazando los valores obtenidos, se tiene que el tiempo de contacto no puede superar los 0,2 ms por riesgos de sobrecarga a la celda.

$$t = \frac{\Delta p}{C_c} \quad (4)$$

Con todo, se selecciona una celda de carga de compresión y tensión de 2 toneladas, con un costo de \$45.000 CLP, de diámetro 58 mm como se puede observar en la Fig. 2.2 y sus características se pueden encontrar en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Propiedades de celda de carga seleccionada.

Modelo DYM-102	
Sensibilidad	1,7 mV/V
Diámetro	58 mm
Capacidad	2.000 kg
Resistencia	697 Ω

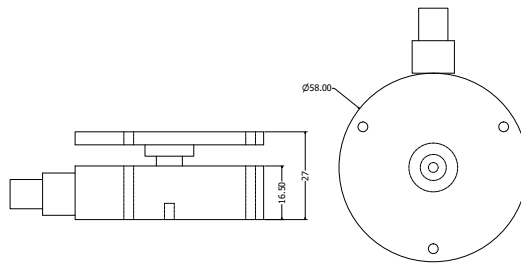


Figura 2.2 Celda de carga modelo DYM-102 de 2 toneladas.

2.1.2 Cálculo de Energía de fractura

Para encontrar la energía absorbida por la probeta, primero se puede hacer un balance de energía para un caso de control, sin probeta, dejando caer una bola sobre la celda de carga, analizando que sucede antes y después del impacto como se ve en la Ec. 5.

$$E_{k,i} = E_{k,r} + E_c + E_e \quad (5)$$

$$E_{k,i} = \frac{1}{2}m_e v_i^2 \quad (6)$$

$$E_{k,r} = \frac{1}{2}m_e v_r^2 \quad (7)$$

Donde, $E_{k,i}$ es la energía cinética antes del impacto, v_i la velocidad al momento antes del impacto, m_e la masa del impactador. Análogamente, $E_{k,r}$ será la energía de cinética del rebote de la esfera luego del impacto, y v_r la magnitud de velocidad a la que rebota (ésta tiene componentes en 2 direcciones a diferencia de v_i), E_c será la energía que absorbe la celda y E_e es el error asociado a las mediciones. Luego, el impulso se describe como la Ec. 8, donde las velocidades se suman debido al sentido opuesto de estas.

$$I = m_e(v_i + v_r) \quad (8)$$

Luego, trabajando la Ec. 5 se crea una diferencia de energía, y se puede expresar E_c como la Ec. 9:

$$E_c = \frac{1}{2}I(v_i + v_r) \quad (9)$$

Así, se puede calcular la energía absorbida por la celda. Se realizaron 23 ensayos de impacto con la esfera de acero de 1,5 kilogramos con una altura de 110,5 milímetros para alcanzar una velocidad de 1,47 m/s, de los cuales se obtienen curvas de carga-tiempo como el presentado en la Fig. 2.3. De los ensayos se obtienen los datos de la Tabla 2.3, donde se encontró un error del 12%, en comparación con otros ensayos realizados con un sensor piezoeléctrico, con un error de 1,97%.

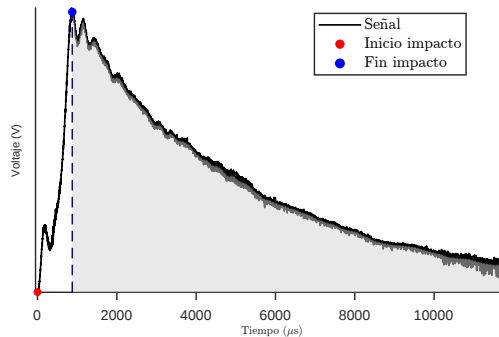


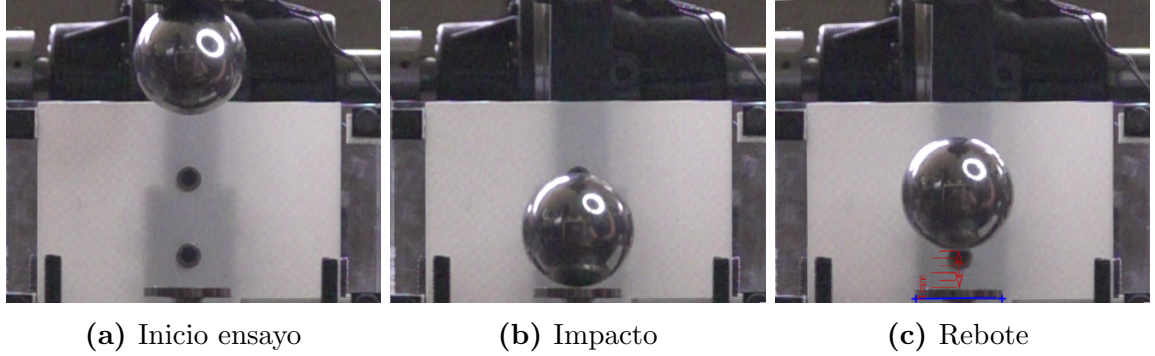
Figura 2.3 Gráfico fuerza-tiempo ensayo sin probeta.

Para encontrar la velocidad del rebote se pueden tomar dos caminos, uno es utilizar el software Tracker para obtener el tiempo y altura de rebote del impactador, utilizando herramientas internas del programa como se puede ver en la Fig. 2.4c para medir la distancia entre la esfera y la celda de carga.

Tabla 2.3 Ensayos de calibración

Ensayo	1	2	3	4	5	...	8	9	Promedio
Impulso[Ns]	3,9227	3,8656	3,9071	3,9977	3,9151	...	4,0341	3,8315	3,955
Error %	14	10	11	13	12	...	14	9	12

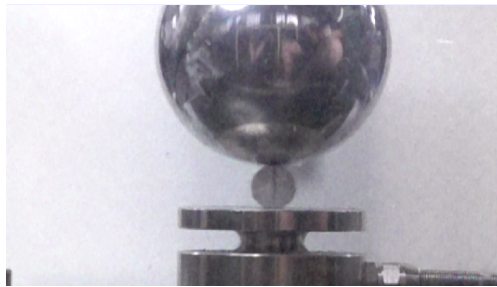
Otro enfoque es analizando el gráfico obtenido con el osciloscopio, donde se puede encontrar el tiempo que demora en rebotar la esfera y con la masa de ésta se obtiene la velocidad, ambos métodos llegan a valores similares cercanos a los 0,7 m/s.

**Figura 2.4** Ensayo de impacto sin probeta.

Luego, se debe encontrar la energía de fractura primaria E_m trabajando las ecuaciones anteriores, obteniéndose la Ec. 10, que toma en consideración ahora la probeta a la cual se le realiza el ensayo de impacto.

$$E_{k,i} = E_{k,r} + E_c + E_e + E_m \quad (10)$$

Ahora se busca la energía de fractura, por lo que se considera la energía hasta el momento de la fractura, Fig. 2.5, después del impacto y antes del rebote, por lo que la velocidad de rebote $v_r = 0$.

**Figura 2.5** Impacto y fractura de probeta.

Luego, resulta relevante determinar E_m y para ello es necesario que la muestra se fracture para que el ensayo sea válido. Sin embargo, es fundamental comprender que no toda la energía captada por el sensor corresponde directamente a la energía de fractura primaria, sino que se debe despejar de la Eq. 10. Por ello, se identifica el momento en que el material se fractura, como se puede observar en la Fig. 2.5, instante en el cual aparece un máximo local, cómo se verá en el siguiente capítulo.

2.2 Diseño banco de ensayos

La celda de carga seleccionada será montada sobre una placa de acero con pernos Allen M4x15 mm de cabeza avellanada para que queden incrustados en la placa de acero y no interfiera al momento de fijar el banco de ensayos a la bancada del laboratorio. El apriete de estos debe ser firme ya que no se desea que el sensor se mueva al momento de realizar ensayos, esto se corrobora una vez realizado un ensayo sin probeta, donde se puede observar claramente si la celda no quedó firme utilizando la cámara de alta velocidad. Otra forma de corroborar es utilizando una llave de torque digital, se opta por un apriete firme mano utilizando una llave Allen.

Para controlar la altura desde la cual cae el impactador se diseña una estructura que se puede mover en dos ejes, con rieles que faciliten un movimiento vertical y una ranura en el lugar de montaje del electroimán que permite su movimiento horizontal, para realizar los ajustes necesarios en caso de ocuparse diferentes sensores y así queden centrado el sensor con el impactador. La fabricación de estas piezas se realizará en el Taller Mecánico, ocupándose herramientas como taladro de pedestal y soldadora, además de ocupar las instalaciones para pintar todas las partes previo a su ensamblaje para proteger el banco de ensayos. Finalmente se tiene el diseño del banco de ensayos como se puede observar en la Fig. 2.6.

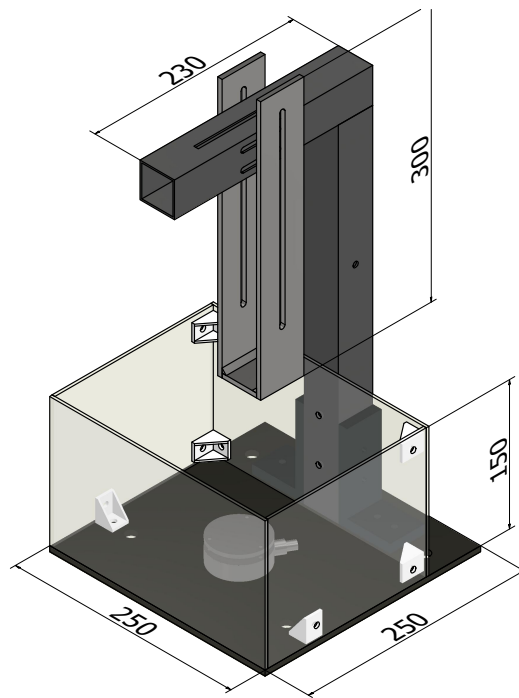


Figura 2.6 Banco de ensayos y sus dimensiones generales en [mm].

2.3 Calibración celda de carga

Para la calibración de la celda de carga se realizaron ensayos de compresión utilizando el banco de ensayos Zwick-Roell de la Facultad de Ingeniería (Fig. 2.7), obteniendo la deformación que sufrió la celda aplicándose una fuerza conocida, a una velocidad de 10 mm/min. Así, se obtiene la rigidez de la celda luego de aplicarle una fuerza de 1000N.

Al mismo tiempo se registró la carga medida por la celda F_c durante el ensayo utilizando un osciloscopio, la cual se traduce a fuerza utilizando la Ec. 11. En la Fig. 2.8 se pueden observar ambas mediciones.



Figura 2.7 Celda de carga montada en Máquina de compresión Zwick Roell modelo Z005.

$$F_c = m_{celda} \cdot g \quad (11)$$

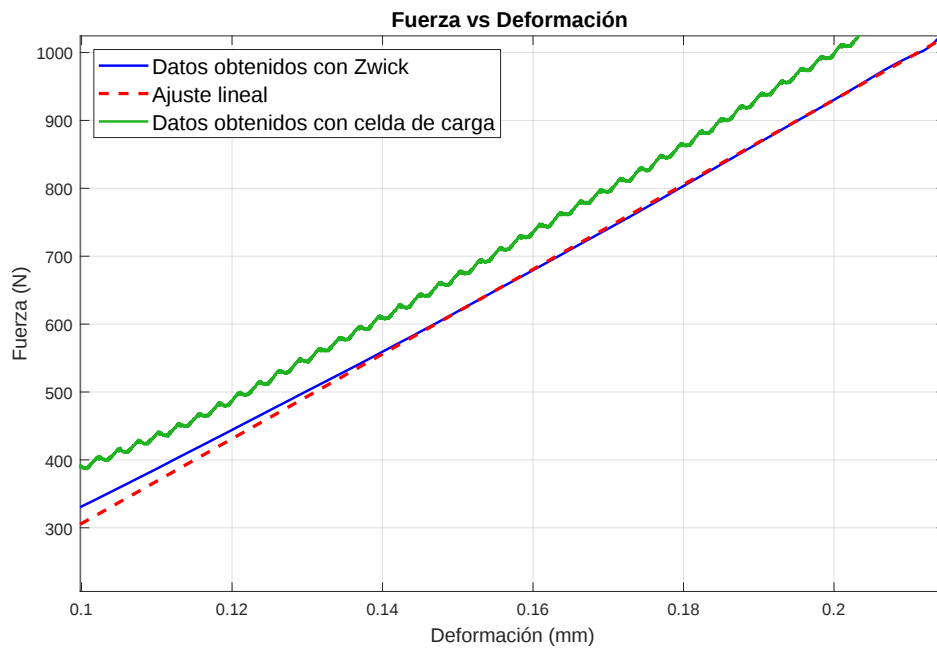


Figura 2.8 Gráficos obtenidos para calibración.

Luego, el factor de calibración C será de 1,3749 y se obtiene mediante la Ec. 12, el cual se valida sometiendo la celda a una carga estática conocida. Así la nueva sensibilidad de la celda de carga S_c será de 2,34 mV/V.

$$C = \frac{F_{celda}}{F_{zwick}} \quad (12)$$

2.4 Fabricación probetas de cemento

En esta investigación se utilizan probetas de cemento debido a la homogeneidad del material, la cual será importante al momento de comprar diferentes sensores. Utilizando una razón cemento-agua de 0,5, por recomendaciones de la literatura [15], las propiedades mecánicas de las probetas se presentan en la Tabla 2.4, donde la resistencia a la compresión puede variar según el tiempo de curado.

Tabla 2.4 Propiedades probetas cemento.

Propiedad	Valor esperado
Resistencia compresión (28 d)	25 MPa
Resistencia compresión (7 d)	15 - 25 MPa
Módulo elástico	10 - 15 GPa
Resistencia a la tracción	1.5 - 4 MPa
Comportamiento	Frágil, poroso

Para ello se utiliza un molde consistente de 2 partes unidas por pernos capaz de confeccionar 4 probetas a la vez como se puede ver en la Fig. 2.9.

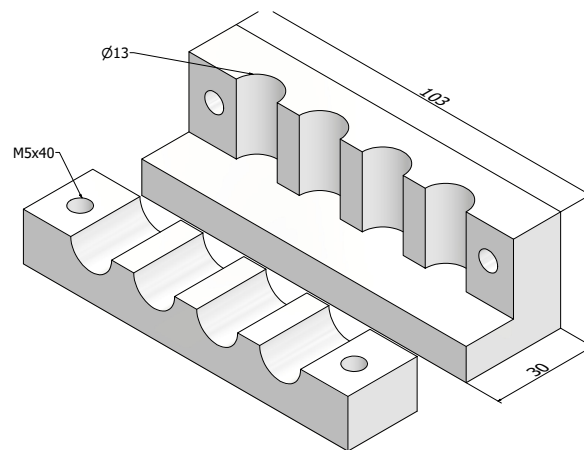


Figura 2.9 Molde probetas de cemento y sus dimensiones en [mm].

Para la preparación de las probetas de cemento se debe seguir el siguiente procedimiento:

1. Aplicar aceite en ambas partes del molde, para facilitar su desmontaje, y cerrar el molde con sus debidos pernos aplicando un apriete firme.
2. Mezclar dos partes de cemento por cada una parte de agua, aplicar la mezcla en el molde a tope, agitándola y haciendo vibrar el molde para evitar burbujas.
3. Cubrir el molde con un material plástico y dejar reposar al menos 24 horas a temperatura ambiente.
4. Luego de 24 o más horas, retirar las probetas del molde y cortarlas en su cara superior (Fig. 2.10.(c)) para lograr una relación diámetro-altura 1:1.
5. Dejar las probetas cortadas y enumeradas en la sala de curado del Departamento de Ingeniería Civil por periodos de 7, 14 o 28 días según se desee.
6. Una vez afuera de la sala de curado, las probetas deben ser pesadas y registradas.

En la Fig. 2.10 se puede observar el procedimiento de preparación de muestras de cemento.



Figura 2.10 Procedimiento de preparación probetas de cemento.

Una vez listas las probetas, puede ocurrir que algunas deban ser descartadas debido a imperfecciones como se pueden observar en la Fig. 2.11, donde se tiene una probeta en óptimas condiciones y dos que debieron ser descartadas luego de un examen visual. Otro criterio para descartar probetas es observando su masa, si está por debajo de los 2,5 gramos, es un indicio de que deberá ser descartada.



Figura 2.11 Probetas de cemento: Buena (izq.), descartada por una muesca (medio) y con burbujas (der.)

En la Tabla 2.5 se presentan algunas de las probetas listas para ensayar, donde se considerarán válidas las que cuenten con una relación de aspecto entre el diámetro y la altura de 1:1, con un margen de 10%.

Tabla 2.5 Dimensiones de algunas probetas de cemento válidas.

ID	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Relación de aspecto	Masa [g]
1	12,86	12,92	1,005	2,4925
10	13,06	13,6	0,998	2,6052
20	13,15	13,28	0,990	2,6975
30	13,01	13,52	0,962	2,8195

2.5 Selección mineral de cuarzo y jaspolita

Además de las probetas de cemento se seleccionan partículas de cuarzo y jaspolita con formas irregulares para evaluar la energía de fractura primaria de los minerales en un mismo rango de tamaño, para ello se seleccionaron partículas tamizadas entre 13 y 16 mm. Entre ellas se eligen las partículas con tamaños más parecidos y se posicionan en una superficie plana hasta que se mantenga estática, luego se mide su ancho, largo y altura con un pie de metro, como se observa en la Fig. 2.12, 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 medidas y se seleccionan considerándolas como muestras válidas de manera preliminar.

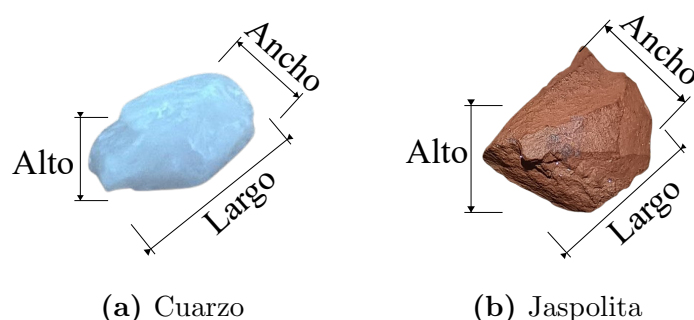


Figura 2.12 Partículas de cuarzo y jaspolita con sus medidas correspondientes.

Una vez medida la masa de cada partícula se analiza la distribución de masas del conjunto completo, donde se descartan las muestras que se encuentren fuera de un 20% de la media de las masas, como se puede observar en la Fig. 2.13, las que se encuentren dentro del rango se consideran válidas. Por lo que se recomienda tomar más muestras de las que se quieren estudiar en la primera fase de selección en caso que se deban descartar debido a su masa.

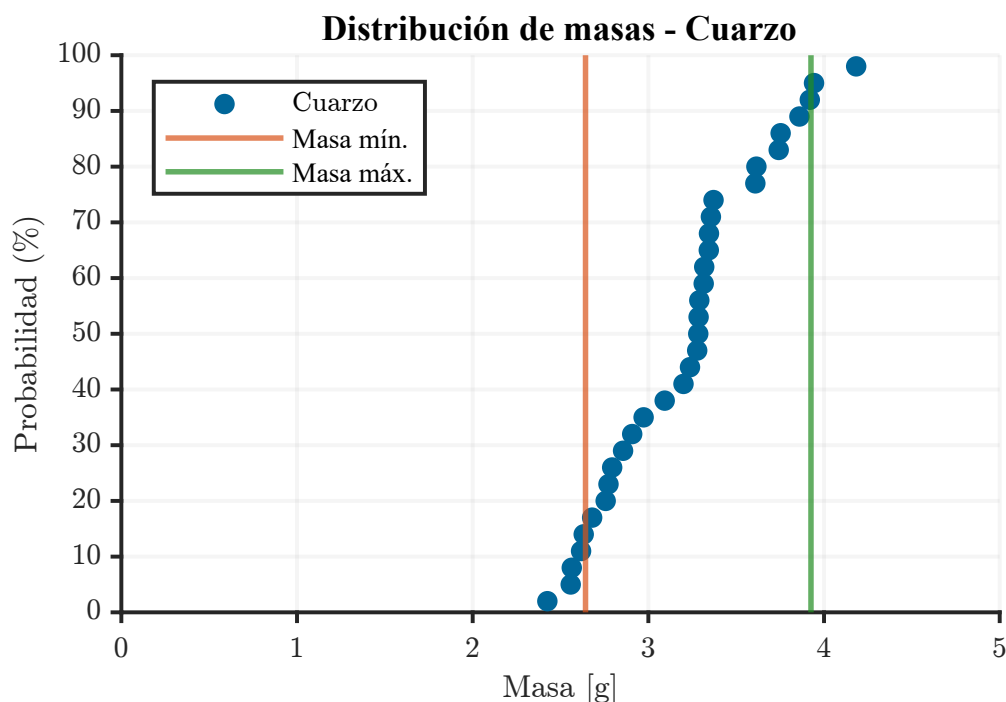


Figura 2.13 Distribución de masas de partículas de cuarzo.

2.6 Ensayos de impacto

Para realizar los ensayos de impacto se utilizan principalmente 4 equipos:

- Celda de carga - DYMH-102 de 2 toneladas.
- Amplificador de voltaje - TD-SST02.
- Osciloscopio - 5442D de la empresa Pico.
- Cámara de video RIBCAGE RX0 II.
- Notebook.

En la Fig. 2.14 se muestra un diagrama de como se conecta el sistema de medición. La celda de carga entrega un voltaje, el cual es amplificado y alimentado al osciloscopio, quien lo interpreta como una carga sobre la celda y lo grafica a una velocidad de muestreo determinada por el usuario, en este caso los ensayos se realizan a 8,93 MS/s, utilizando la configuración presentada en la Tabla 2.6, por último, se exportan los datos para luego ser analizados utilizando el programa MATLAB. Al mismo tiempo se graban los ensayos utilizando una cámara de alta velocidad para determinar la velocidad de impacto sobre las muestras y el momento exacto de la fractura.

Tabla 2.6 Configuración del osciloscopio para las mediciones.

Parámetro	Valor
Velocidad muestreo objetivo	10 MS/s
Modo progresivo	200 ms/div
N° muestras objetivo	4 MS

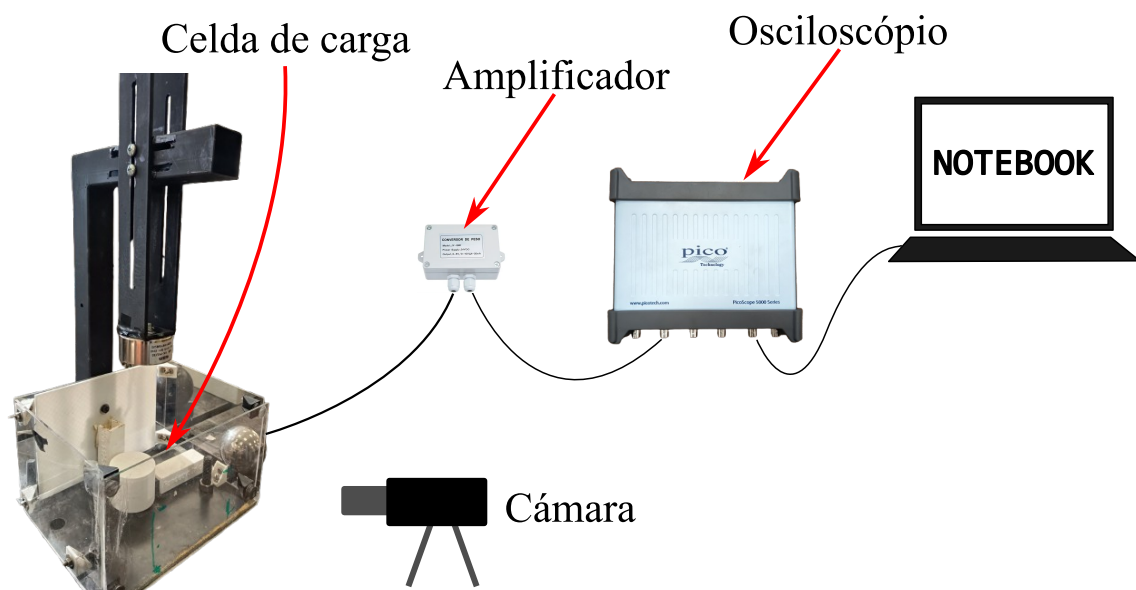


Figura 2.14 Esquema de conexión de instrumentos.

2.7 Ensayos de impacto con UFLC en Laboratorio de Tecnología Mineral

Durante una pasantía al LTM de la Facultad de Ingeniería Metalúrgica y Materiales - COPPE de la Universidad Federal de Río de Janeiro a cargo del profesor Marcelo Tavares se realizaron ensayos de impacto utilizando una UFLC. En la Fig. 2.15 se pueden observar las conexiones y elementos utilizados, entre ellos un DAQ de National Instruments, modelo USB-6451, el uso de baterías en vez de conectar el amplificador directo a la red eléctrica y en su caso no ocupan cámaras para capturar los ensayos.

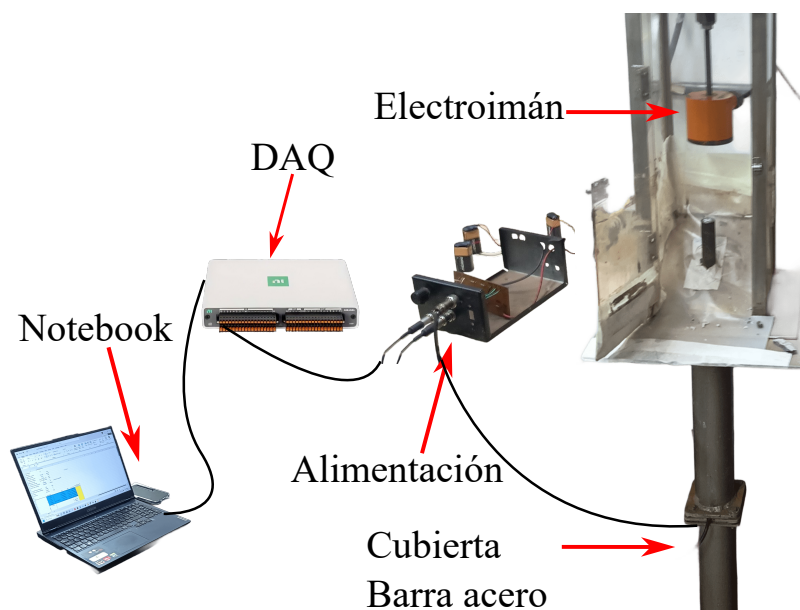


Figura 2.15 Esquema de conexión de instrumentos en LTM.

El procedimiento para realizar los ensayos es el siguiente:

- Ajustar el banco de ensayos con la altura deseada.
- Registrar las condiciones de ensayo, altura, masa de impactador, tamaño de muestras.
- Medir masa de la muestra y registrar antes de colocar en el banco.
- Ajustar resistencia del amplificador y esperar que se estabilice.
- Liberar impactador y exportar datos.
- Procesar datos y calcular energía específica de fractura primaria.

Durante la pasantía se observaron diversas prácticas experimentales que permitieron complementar y validar la metodología desarrollada en esta investigación. En primer lugar, se constató que, al configurar el banco de ensayos para un mineral que no ha sido evaluado previamente, se realizan una docena de ensayos preliminares con el objetivo de determinar la altura de caída que proporciona la energía de impacto suficiente para producir la fractura primaria de las partículas. Este valor puede estimarse a partir de literatura o determinarse mediante ensayo y error. Una vez identificada la energía adecuada, los ensayos definitivos se llevan a cabo utilizando dicha condición.

Asimismo, se observó que el proceso de selección de muestras empleado en el LTM difiere del utilizado en esta investigación. En dicho laboratorio no se determina la relación de aspecto

de cada partícula ni se analiza la distribución de masas del conjunto completo de muestras. En su lugar, la selección se basa principalmente en criterios visuales, procurando que las partículas presenten tamaños similares y evitando aquellas con geometrías excesivamente planas o alargadas. En este trabajo, por el contrario, se incorporó un procedimiento de selección más estricto, considerando tanto la relación de aspecto como la distribución de masas, con el fin de reducir la variabilidad experimental y mejorar la repetibilidad de los ensayos.

Otra diferencia relevante corresponde al número de ensayos realizados por condición experimental. En el LTM es habitual efectuar entre 50 y 100 ensayos para cada tipo de material, ya que el objetivo principal es caracterizar minerales para aplicaciones industriales solicitadas por empresas externas. En cambio, en la presente investigación se realizaron aproximadamente 21 ensayos por condición, debido a que el propósito fue analizar la influencia de variables específicas, como y el tipo de sensor utilizado, más que obtener una caracterización estadística exhaustiva del material.

Otra práctica observada durante la pasantía corresponde al tratamiento de los ensayos en los que no se produce fractura primaria. En la metodología empleada en el LTM, estos ensayos no son descartados del análisis, sino que se incorporan en la construcción de la distribución acumulada de energía específica de fractura primaria. En consecuencia, cuando una fracción de las partículas no se fractura bajo la condición de impacto aplicada, la curva no alcanza una probabilidad acumulada del 100%, sino que su valor máximo corresponde al porcentaje efectivo de muestras fracturadas. Por ejemplo, si únicamente el 75% de las partículas experimenta fractura primaria, como se puede apreciar en la curva roja de la Fig. 2.16, la distribución finalizará en dicho valor. Este criterio permite representar de forma más fiel el comportamiento del material y evidenciar cuando la energía de impacto utilizada resulta insuficiente para fracturar la totalidad de las muestras. De manera práctica, si aproximadamente un 15% o más de los ensayos no presenta fractura primaria, se considera un indicio de que la energía de impacto seleccionada no es adecuada, por lo que resulta necesario reajustar la altura de caída o la masa del percutor antes de continuar con la campaña experimental.

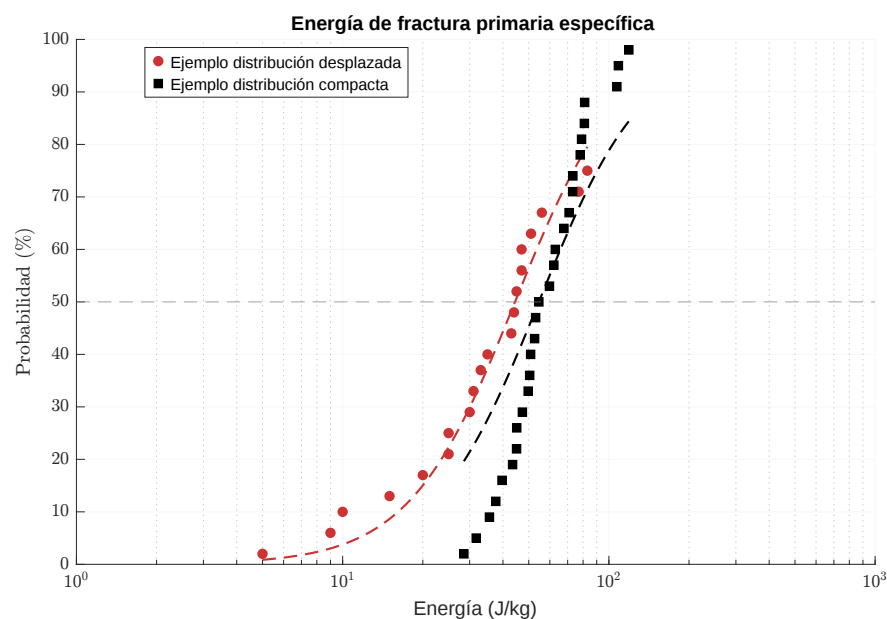


Figura 2.16 Ejemplo gráfico distribución de energía específica de fractura primaria con curva desplazada y compacta.

Finalmente, durante la pasantía se identificó una práctica útil para la validación de los resultados experimentales. El análisis de las distribuciones de energía específica de fractura primaria permite detectar posibles inconsistencias en la selección del intervalo temporal utilizado para el procesamiento de las señales. En particular, cuando la distribución presenta un desplazamiento sistemático hacia valores menores de energía respecto de la tendencia esperada como se aprecia en la curva de color rojo de la Fig. 2.16, ello puede indicar que el intervalo de integración seleccionado no corresponde al evento de fractura primaria, sino que este ocurrió en un instante anterior al considerado. Por esta razón, el análisis conjunto de las señales registradas y de las distribuciones de energía constituye una herramienta complementaria para verificar la correcta identificación del evento de fractura durante el procesamiento de los datos.

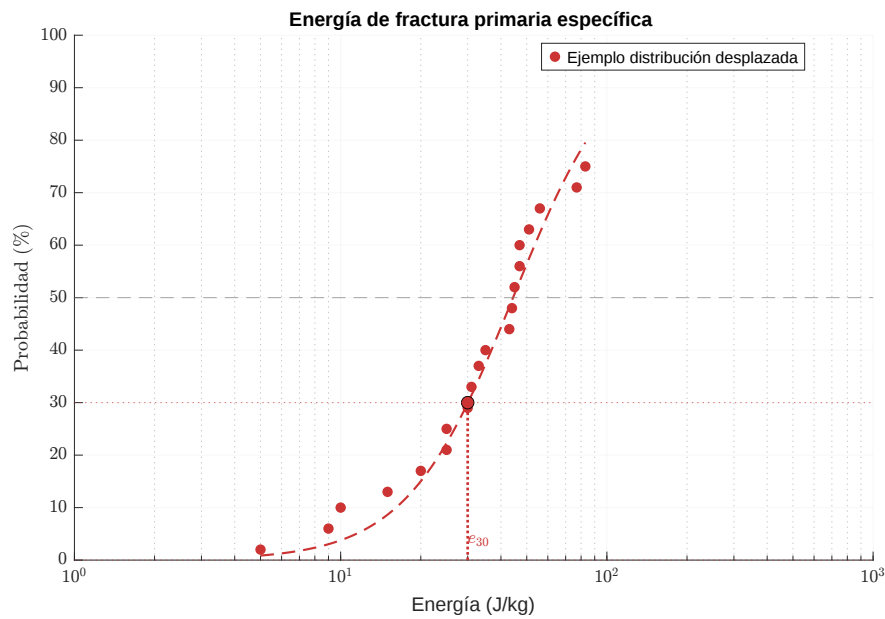


Figura 2.17 Ejemplo gráfico distribución de energía específica de fractura primaria con curva desplazada.

El procedimiento consiste en seleccionar un determinado percentil de la distribución, por ejemplo el correspondiente al 30% de probabilidad de fractura como se aprecia en la Fig. 2.17, e identificar la energía asociada a dicho punto. Posteriormente, se realizan nuevos ensayos aplicando esa energía de impacto sobre un conjunto independiente de aproximadamente una docena de partículas. Si la metodología de procesamiento es correcta, se espera que alrededor del 30% de las muestras experimente fractura primaria. En caso de que el porcentaje observado sea significativamente menor, ello sugiere que el intervalo de integración utilizado para calcular la energía es demasiado corto y que el evento de fractura primaria ocurre en un instante posterior al considerado. Por el contrario, si el porcentaje de partículas fracturadas resulta considerablemente mayor al esperado, el intervalo seleccionado probablemente incluye eventos posteriores a la fractura primaria, sobreestimando la energía necesaria para producirla. Esta metodología de validación resulta especialmente útil en materiales minerales, donde la identificación del instante exacto de fractura primaria suele ser más compleja debido a la presencia de múltiples eventos de contacto y fractura. En materiales como el cemento, en cambio, el evento de fractura primaria puede distinguirse con mayor claridad en las señales registradas, como se mostrará en el capítulo de resultados.

3 Resultados

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos a partir de 113 ensayos utilizando el banco de ensayos, sobre probetas de cemento, mineral de cuarzo y ensayos de calibración en el LVM. Además se realizaron 105 ensayos en el LTM sobre probetas de cemento, cuarzo y jaspolita. En la Tabla 3.1 se presentan los ensayos realizados, detallando las condiciones a las cuales se realizaron.

Tabla 3.1 Ensayos realizados en LVM.

Probeta	Diámetro (mm)	Velocidad (m/s)	Sensor	Cantidad
Cemento	13	1,5	Celda de carga	20
	13	1,1		15
	13	1,5	Piezoeléctrico	20
	13	1,1		15
Cuarzo	14,8	1,1	Celda de carga	8
	14,5	1,1	Piezoeléctrico	17

3.1 Ensayos de impacto sobre muestras de cemento

Se realizaron 70 ensayos de impacto sobre muestras de cemento de 13 mm de diámetro, con dos configuraciones diferentes de velocidad, a 1,1 y 1,5 m/s. Ambas configuraciones fueron puestas a prueba utilizando la celda de carga y el sensor piezoeléctrico.

3.1.1 Ensayos sobre cemento a 1.5 m/s

En la Fig. 3.1 se pueden observar los resultados obtenidos de ensayos de impacto para una velocidad de 1,5 (m/s) con una esfera de acero de 1,5 kg, sobre probetas de cemento utilizando la celda de carga. En los gráficos se pueden observar que la fractura ocurre en el punto máximo y es cercano a los 200 N. En este caso se aplicó un filtro pasa bajo de cuarto grado a la señal, con una frecuencia de 5 kHz.

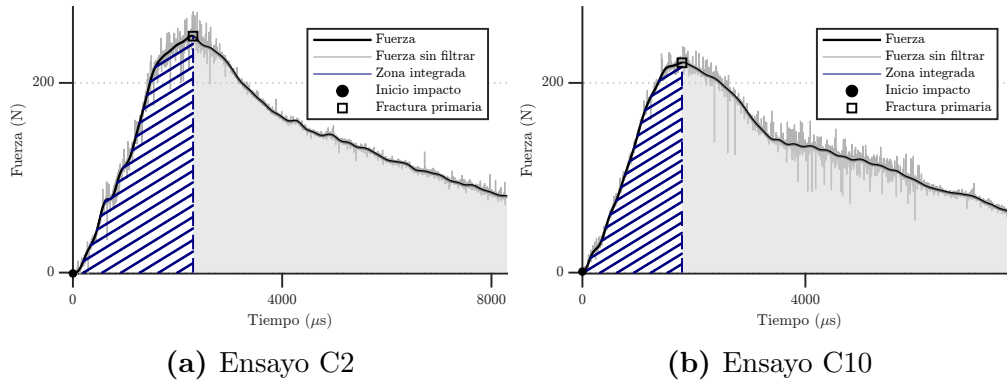


Figura 3.1 Ensayos DWT con celda de carga sobre probetas de cemento a 1,5 m/s.

Análogamente, se realizaron ensayos de impacto con el SPE utilizando la misma configuración de velocidad y la misma esfera de acero de 1,5 kg. En la Fig. 3.2 se presentan los resultados obtenidos, donde se puede observar, al igual que en la Fig. 3.1, que la fractura ocurre en el punto máximo y, en este caso, se puede observar mejor el momento en que el percutor deja de tener contacto con la muestra, debido a la naturaleza del sensor.

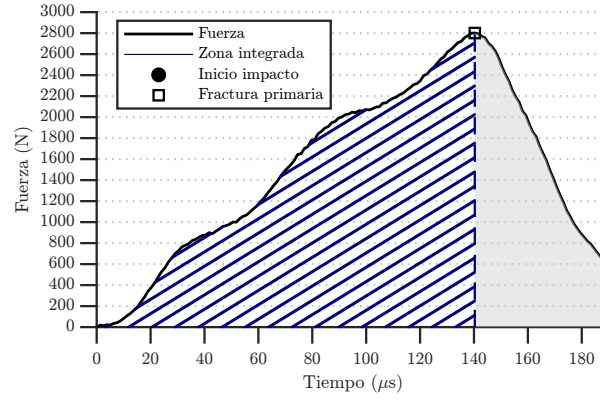


Figura 3.2 Ensayo de impacto sobre probetas de cemento con SPE a 1,5 m/s.

3.1.2 Ensayos sobre cemento a 1,1 m/s

Además, se realizaron ensayos con velocidad de impacto de 1,1 m/s usando una esfera de acero de 3 kg. En la Fig. 3.3 se pueden observar los resultados de tres ensayos realizados sobre la celda de carga.

Por último, se realizaron ensayos de impacto utilizando el SPE con la misma configuración de velocidad y la misma esfera de acero de 3 kg. En la Fig. 3.4 se pueden observar los resultados obtenidos.

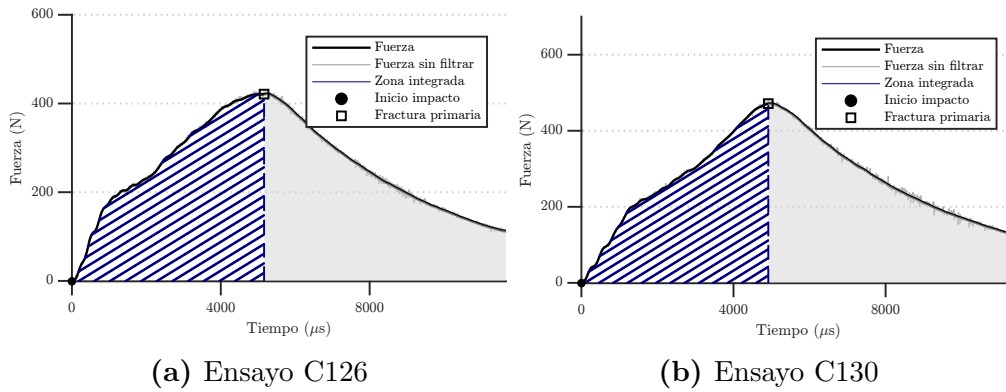


Figura 3.3 Ensayos de impacto con celda de carga sobre probetas de cemento a 1,1 m/s.

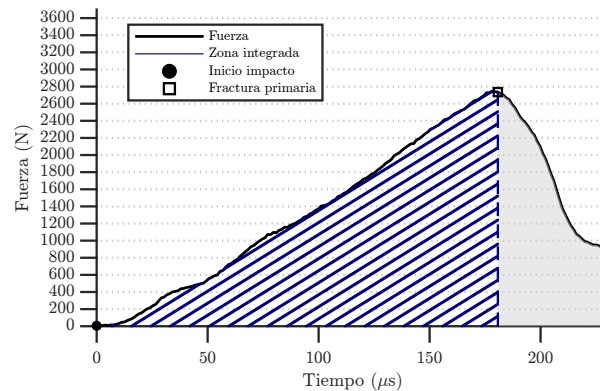


Figura 3.4 Ensayo de impacto sobre probetas de cemento con SPE a 1,1 m/s.

3.2 Ensayos de impacto sobre muestras de cuarzo

Se realizaron 25 ensayos de impacto sobre mineral de cuarzo (Cuarzo (Q)) tamizado entre 13 y 16 mm, a una velocidad de 1,1 m/s, utilizando la celda de carga y el sensor piezoeléctrico. En la Fig. 3.5 se pueden observar los resultados obtenidos de ensayos DWT para una velocidad de impacto de 1,1 (m/s) con una esfera de acero de 3 kg, sobre partículas de cuarzo utilizando la celda de carga y en la Fig. 3.6 se pueden observar los resultados obtenidos con el sensor piezoeléctrico, .

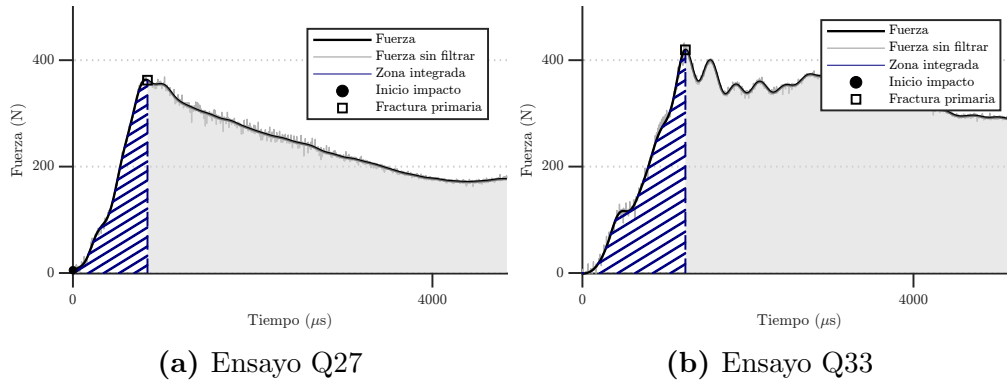


Figura 3.5 Ensayos de impacto con celda de carga sobre mineral de cuarzo a 1,1 m/s.

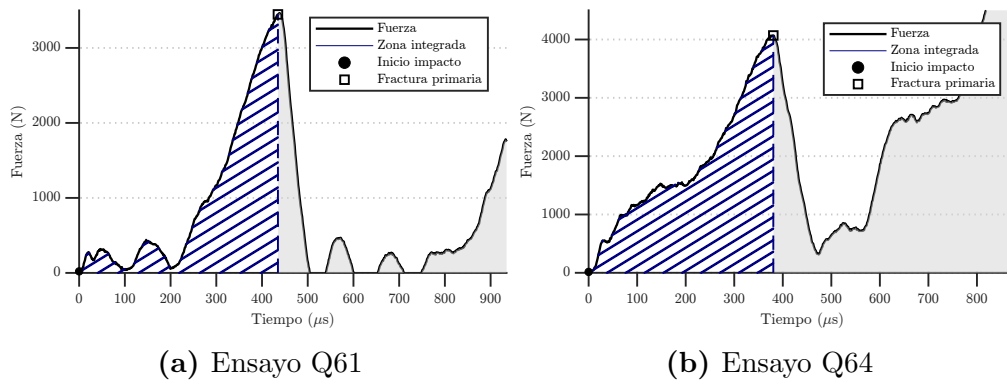


Figura 3.6 Ensayos de impacto con piezoeléctrico sobre mineral de cuarzo a 1,1 m/s.

3.3 Ensayos con banco UFLC

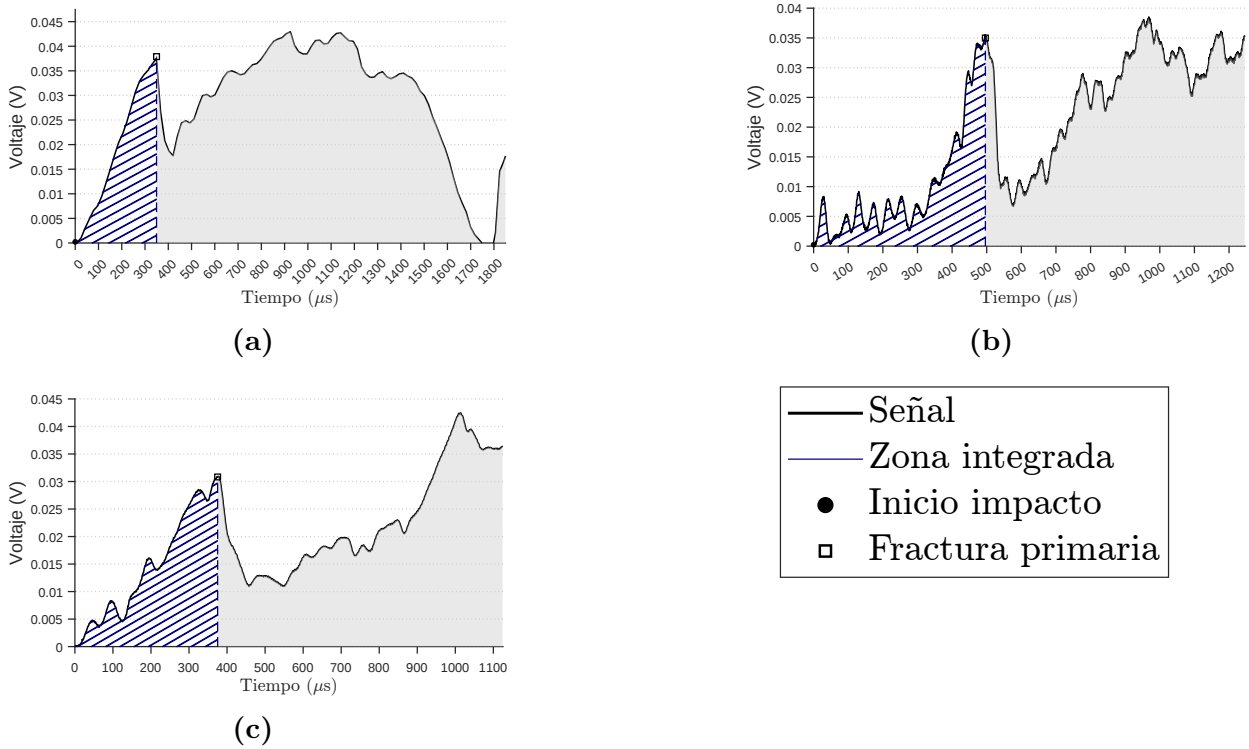
En esta sección se presentan los resultados obtenidos de ensayos de impacto utilizando un banco UFLC sobre muestras de cemento y mineral de cuarzo en el LTM. Se realizaron 105 ensayos y para familiarizarse con el equipo se realizaron 50 ensayos sobre mineral de Jaspolita, debido a la naturaleza del mineral y a la familiaridad del personal del laboratorio con este, en la 3.2 se pueden observar los ensayos realizados, donde la diferencia entre el número total de ensayos realizados y los correctos se debe a que algunas partículas no se fracturaron o no se ensayaron correctamente.

En la Fig. 3.7 se pueden observar la respuesta del sistema al realizarse los tres tipos de ensayos, se puede apreciar que tanto en el cemento como la jaspolita se puede diferenciar claramente el punto de fractura primaria, mientras que el cuarzo presenta un comportamiento más volátil que los demás. Esto es de esperarse debido a la naturaleza cuarzo es un material natural con una mayor variabilidad en geometría, micro grietas internas, orientación cristalina, etc. A diferencia del concreto, que es fabricado bajo condiciones controladas, las

Tabla 3.2 Ensayos realizados en LTM

	Jaspolita	Cemento	Cuarzo
Altura de caída, mm	100	60	45
Energía de impacto, J/kg	448	337	217
Número de ensayos	50	29	26
Ensayos correctos	43	29	20
Masa de partículas, g	3,47	2,77	3,21
Diámetro equivalente, mm	13,78	13,08	14,95
e_{50} , J/kg	108,7	54,6	44,4

partículas de cuarzo pueden presentar diferencias significativas en su estructura interna y planos de fractura, generando una mayor variabilidad en la respuesta al impacto.

**Figura 3.7** Ensayos realizados en LTM sobre: (a) Cemento. (b) Cuarzo. (c) Jaspolita.

3.4 Comparación entre celda de carga y sensor piezoeléctrico

Una forma de comparar ambos sensores es gráficamente o analizando la energía específica de fractura primaria, la cual se obtiene dividiendo la energía de fractura primaria sobre la masa de la probeta ensayada. Luego se obtienen los gráficos de distribución, donde se tiene la probabilidad de fractura P según la energía específica de fractura primaria, dicha probabilidad se obtiene mediante la Ec. 13, donde i corresponde al número de ensayo y n será el número total de ensayos.

$$\%P = \frac{i - 0.5}{n} \quad (13)$$

Con todo, se obtiene el valor E_{50} para ese material bajo esas condiciones de ensayo, que será la energía necesaria para fracturar el 50% de las muestras bajo estas condiciones de ensayo.

En la Tabla 3.3 se presentan los valores obtenidos para ensayos realizados a 1.5 m/s sobre muestras de cemento, donde se puede ver una diferencia de 60 J/kg entre los resultados obtenidos con la celda de carga y el piezoeléctrico.

Tabla 3.3 Ensayos realizados a velocidad 1,5 m/s.

Probeta	Diámetro (mm)	Velocidad (m/s)	Sensor	e_{50}
Cemento	13	1,5	Celda de carga	528,2
	13	1,5	Piezoeléctrico	587

En la Fig. 3.8 se puede observar que el comportamiento de las muestras de cemento es más condensado, lo que es de esperarse debido a la naturaleza homogénea de la mezcla de cemento, en comparación al cuarzo.

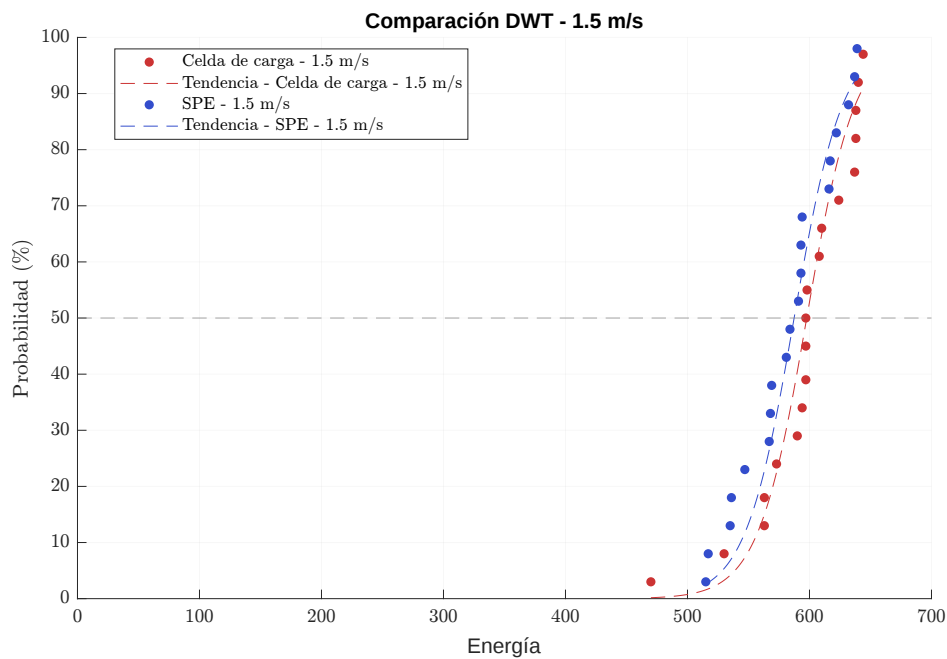


Figura 3.8 Energía específica de fractura primaria del cemento versus su probabilidad de fractura primaria utilizando ambos sensores a 1,5 m/s.

En la Tabla 3.4 se presentan los valores E_{50} obtenidos para ensayos realizados a 1,1 m/s sobre muestras de cemento y cuarzo. Hay una diferencia de 7 J/kg entre los resultados obtenidos con la celda de carga y el piezoeléctrico para el cemento y de 30 J/kg para el cuarzo.

Tabla 3.4 Ensayos realizados a velocidad 1,1 m/s.

Probeta	Diámetro (mm)	Velocidad (m/s)	Sensor	e_{50}
Cemento	13	1,1	Celda de carga	544
	13	1,1	Piezoeléctrico	537
Cuarzo	14,8	1,1	Celda de carga	478
	14,5	1,1	Piezoeléctrico	448

Por otro lado, en la Fig. 3.9 se puede ver mayor dispersión en los resultados como es de esperarse por las razones expuestas en la sección 3.3.

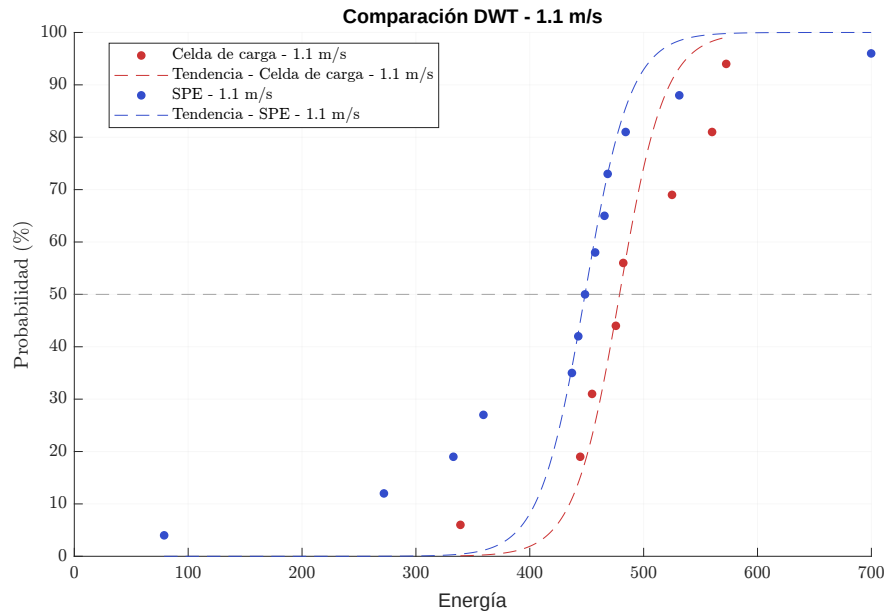


Figura 3.9 Energía de fractura primaria específica del cuarzo versus su probabilidad de fractura primaria utilizando ambos sensores a 1,1 m/s.

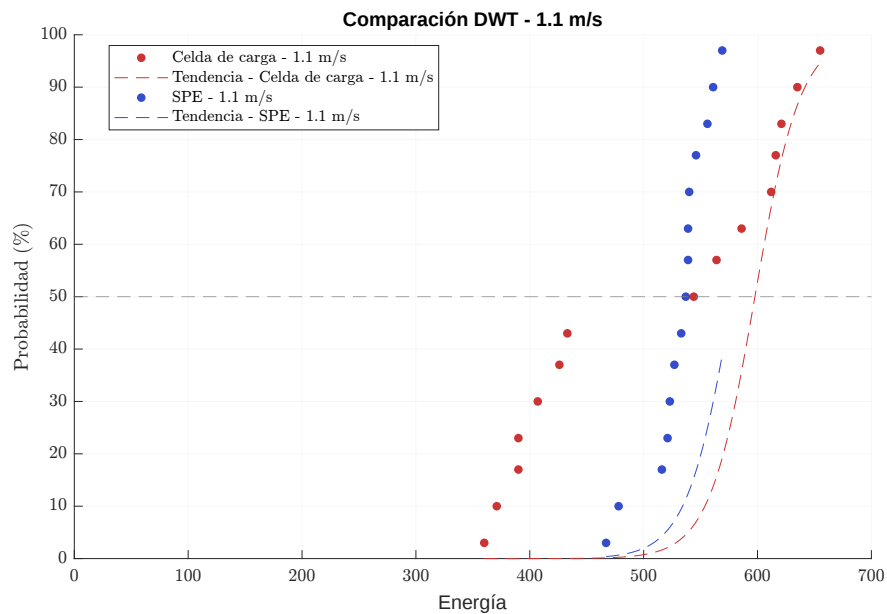


Figura 3.10 Energía específica de fractura primaria del cemento versus su probabilidad de fractura primaria utilizando ambos sensores a 1,1 m/s.

De la misma forma, en la Fig. 3.10 se puede observar la distribución de energía específica de fractura primaria del cemento para una velocidad de 1,1 m/s, dónde se puede apreciar una clara discontinuidad en los datos obtenidos con la celda de carga.

En general los gráficos muestran una clara tendencia que la utilización de la celda de carga para ensayos de impacto arrojan valores más altos que con un SPE diseñado para impactos. Esto se puede deber a que al estar diseñada para soportar cargas cuasi estáticas, esta absorbe la energía del impacto y antes de poder liberarla recibe la energía que trae la bola después del impacto, pero aún así entrega resultados coherentes, por lo que considerando la diferencia del costo entre ambos sensores la utilización de una celda de carga en ensayos de impactos es una solución viable.

3.5 Comparación celda de carga y UFLC

En la Fig. 3.11 se presentan los gráficos de distribución de energía específica de fractura primaria para los 3 tipos de probetas ensayados en el LTM, con las condiciones expuestas en la Tabla 3.2.

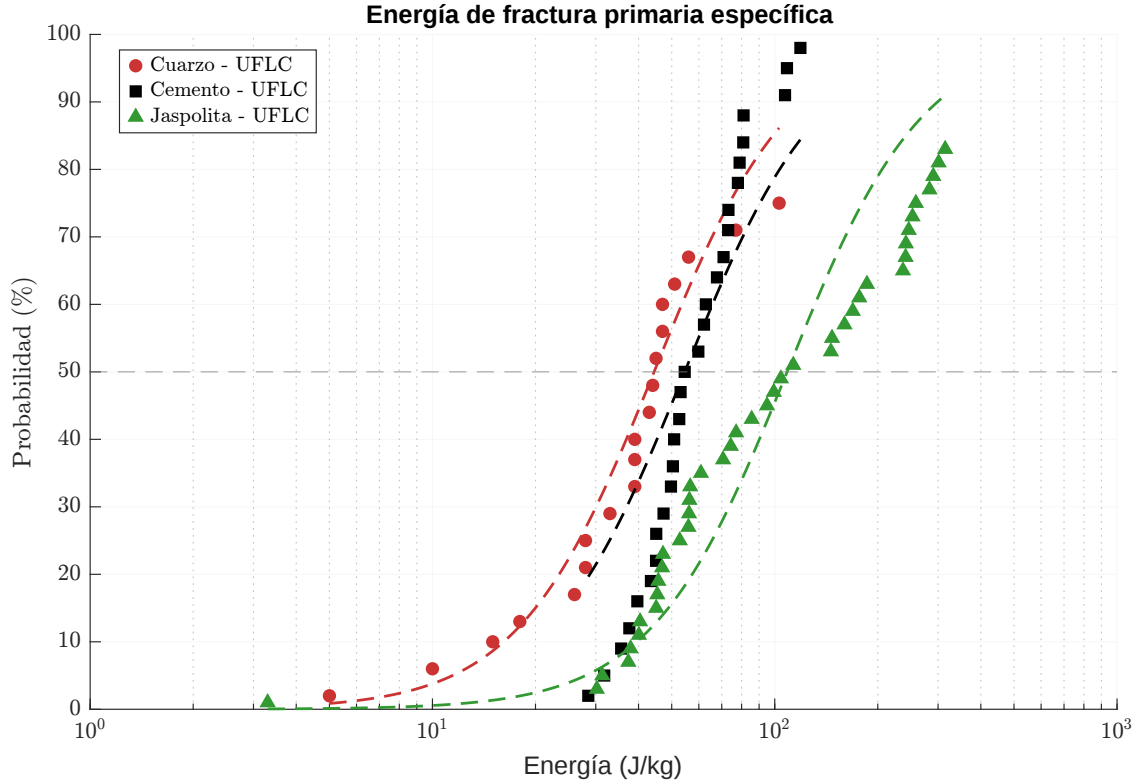


Figura 3.11 Distribución de energía específica de fractura primaria de probetas de cemento, mineral de cuarzo y jaspólita.

En el caso de la jaspólita, se puede observar que una de las partículas presenta un comportamiento claramente diferente respecto al resto del conjunto de datos, la cual coincidentemente era una de las partículas con mayor masas del set de muestras ensayadas. En el caso del cemento los datos presentan una menor dispersión en comparación con la jaspólita, lo cual era esperable debido a la naturaleza más homogénea y controlada del material. Y, finalmente, al igual que en el comportamiento individual de cada ensayo, el cuarzo presenta mayor dispersión.

Además, se analizó la fuerza máxima registrada durante cada impacto. Esta corresponde al mayor valor de fuerza alcanzado durante el contacto entre la esfera y la probeta. En ambos casos, la fuerza máxima se obtuvo a partir de la señal de fuerza registrada durante el ensayo, definida como:

$$F_{\max} = \max(F(t)), \quad (14)$$

Donde $F(t)$ representa la fuerza de impacto medida por cada sensor. Para la UFLC la fuerza fue calculada a partir de la deformación longitudinal medida por los strain gauges instalados en la barra. Debido a que ambos sistemas presentan principios de funcionamiento diferentes y fueron utilizados en campañas experimentales independientes, la comparación de la fuerza máxima no pretende establecer una equivalencia directa entre las mediciones, sino

analizar el comportamiento relativo de cada sistema frente a impactos sobre materiales de características similares. En consecuencia, para cada condición experimental se determinó el valor promedio de la fuerza máxima a partir del conjunto de ensayos válidos realizados.

Se analizaron los resultados obtenidos durante los ensayos de compresión realizados sobre probetas de cemento como se aprecia en la Fig. 3.12, donde se registró la fuerza aplicada en función del desplazamiento de la cruceta, permitiendo estimar el trabajo mecánico realizado sobre la probeta hasta alcanzar la carga máxima.

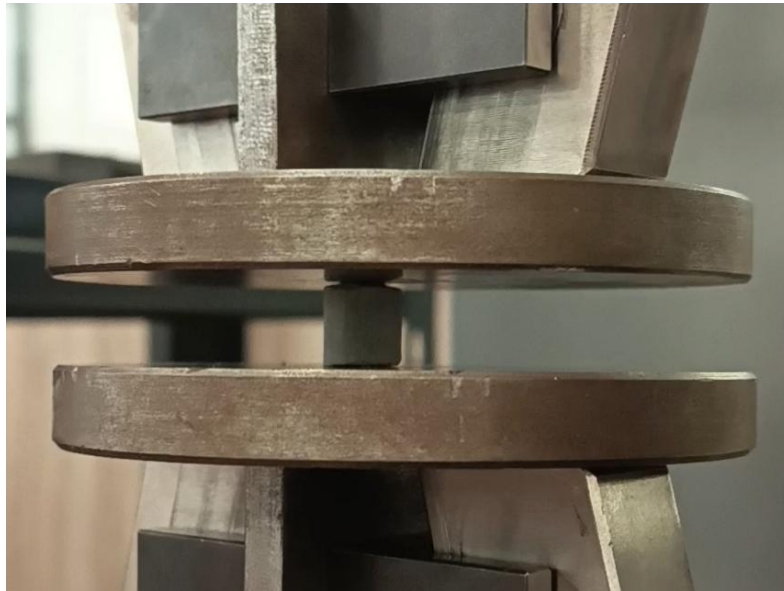


Figura 3.12 Probeta de cemento montada en Máquina de compresión Zwick Roell modelo Z005.

La energía absorbida durante el ensayo se determinó como el área bajo la curva fuerza-desplazamiento, la cual puede expresarse mediante la Ec. 15. donde $F(\delta)$ corresponde a la fuerza aplicada y δ_f al desplazamiento alcanzado al momento de la fractura.

$$U = \int_0^{\delta_f} F(\delta) d\delta \quad (15)$$

Para las probetas se obtuvo una carga máxima promedio cercana a 3330 N, correspondiente a una resistencia a compresión aproximada de 25.1 MPa. La integración de la curva fuerza-desplazamiento entregó una energía absorbida de aproximadamente $U = 1,76[J]$.

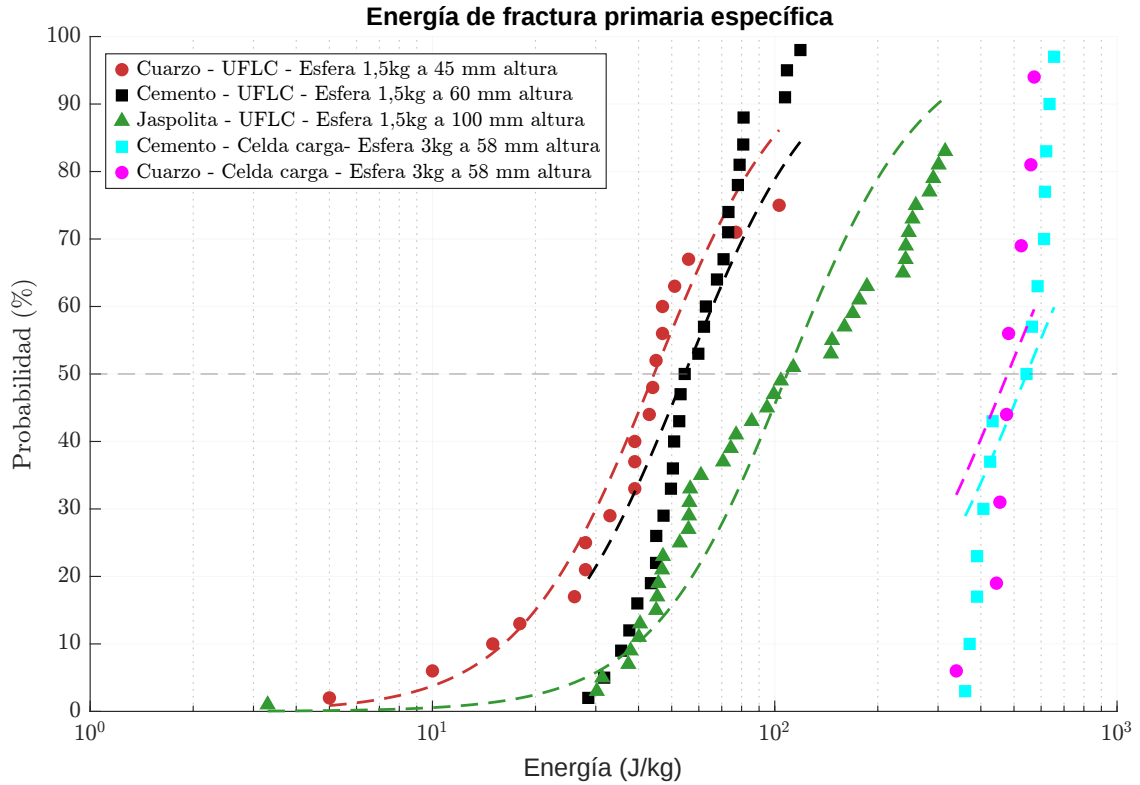
Este valor representa una estimación de la energía mecánica absorbida hasta la falla bajo una condición de carga cuasiestática. En comparación, la energía potencial disponible durante los ensayos de impacto realizados con una esfera de 1.5 kg y una altura de caída de 111 mm fue de aproximadamente 1.67 [J], dependiendo del ensayo. Valor del mismo orden de magnitud que la energía absorbida obtenida en los ensayos de compresión.

Finalmente, en la Tabla 3.5 se encuentra una comparación entre los ensayos de impacto realizados con la UFLC en el LTM y la celda de carga en el LVM sobre probetas de cemento, mineral de jaspilita y cuarzo, donde se puede ver una clara diferencia en los resultados de e_{50} , pero se debe tener en cuenta que las condiciones en las que se realizaron los ensayos no son las mismas.

Tabla 3.5 Comparación UFLC y celda de carga.

	Jaspolita		Cemento		Cuarzo	
Sensor	UFLC	UFLC	Celda carga	Celda carga	UFLC	Celda carga
Altura de caída, mm	100	60	110	58	45	58
Masa percutor, kg	1.5	1.5	1.5	3	1.5	3
Número de test	50	29	20	15	26	8
Test válidos	43	29	19	15	20	8
Masa de muestra, g	3,47	2,77	2,61	3,05	3,21	3,30
Diámetro equivalente, mm	13,78	13,08	13,03	13,01	14,95	15,10
e_{50} , J/kg	108,7	54,6	528,2	544	44,4	478
F_{max} , N	1988	1306	212	396	911	449

Por otro lado, observando los gráficos de distribución de energía específica de fractura primaria del cemento y cuarzo realizados con la celda de carga y los realizados en el LTM con la UFLC en la Fig. 3.13, se tiene el mismo comportamiento para ambos materiales, donde las probetas de cemento presentan una tendencia más compacta en su distribución, mientras que el cuarzo no se logra apreciar la tendencia del material debido al bajo número de ensayos realizados bajo esas condiciones.

**Figura 3.13** Distribución de energía específica de fractura primaria de probetas de cemento, mineral de cuarzo y jaspolita, con UFLC y celda de carga.

4 Algoritmo para la modelación de fractura en DEM

4.1 Introducción

El Método de Elementos Discretos (DEM) representa un material particulado como un conjunto de partículas individuales, cuyas interacciones se evalúan en cada contacto. La posición, velocidad y aceleración de cada partícula se actualizan explícitamente a partir de las fuerzas y momentos resultantes. Esta característica hace que el método sea apropiado para analizar fenómenos dinámicos tales como impactos, interacción partícula–estructura y conminución [16].

En aplicaciones de conminución, la fractura se debe modelar explícitamente y existen dos enfoques principales [17]: *Bonded Particle Method* (BPM), en el cual una partícula se representa mediante un conjunto de esferas unidas mediante enlaces cohesivos; y el *Particle Replacement Method* (PRM), en el cual una partícula individual se reemplaza por fragmentos al satisfacer un criterio de fractura. El BPM permite representar explícitamente la iniciación y propagación de grietas; el PRM, en cambio, resulta conveniente para simulaciones de equipos de conminución debido a su menor costo computacional [18–20].

En este capítulo se presentan ambos enfoques para partículas esféricas, considerando un modelo de contacto de resorte histerético. Para el BPM se propone un criterio combinado de tracción y corte que incorpora los efectos de flexión y torsión. Para el PRM se utiliza un criterio energético, calibrable mediante ensayos de impacto de partículas individuales.

4.2 Formulación de DEM

El movimiento traslacional y rotacional de una partícula i , de masa m_i y tensor de inercia $\mathbf{I}_i$, se determina a partir de las ecuaciones

$$m_i \ddot{\mathbf{x}}_i = \sum \mathbf{F}_{c,i} + m_i \mathbf{g}, \quad (16)$$

$$\mathbf{I}_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_i = \sum \mathbf{M}_{c,i}, \quad (17)$$

donde $\mathbf{x}_i$ corresponde a la posición del centro de masa, $\boldsymbol{\omega}_i$ es la velocidad angular, $\mathbf{F}_{c,i}$ representa las fuerzas de contacto y $\mathbf{M}_{c,i}$ representa los momentos aplicados sobre la partícula. Las ecuaciones se integran mediante un esquema explícito, por lo cual el paso de tiempo debe ser suficientemente menor que el período natural asociado al contacto de mayor rigidez [16].

Para dos partículas esféricas i y j , existe contacto cuando la superposición normal es positiva:

$$\delta_n = R_i + R_j - \|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i\| > 0, \quad (18)$$

donde R_i y R_j son los radios de las partículas. La fuerza normal se representa mediante un modelo de resorte histerético. Durante la carga se emplea una rigidez $k_{n,l}$, mientras que durante la descarga se utiliza una rigidez $k_{n,u}$. La diferencia entre ambas rigideces permite incorporar una pérdida irreversible de energía:

$$F_n = \begin{cases} k_{n,l} \delta_n, & \dot{\delta}_n > 0, \\ k_{n,u} (\delta_n - \delta_{n,p}), & \dot{\delta}_n \leq 0, \end{cases} \quad (19)$$

donde $\delta_{n,p}$ corresponde a la superposición permanente determinada al producirse la descarga. La fuerza tangencial se obtiene mediante un resorte incremental y se limita mediante el criterio de fricción de Coulomb:

$$\mathbf{F}_t = -\min(k_t \|\boldsymbol{\xi}_t\|, \mu F_n) \frac{\boldsymbol{\xi}_t}{\|\boldsymbol{\xi}_t\|}, \quad (20)$$

donde k_t es la rigidez tangencial, $\boldsymbol{\xi}_t$ representa el desplazamiento tangencial acumulado y μ es el coeficiente de fricción.

4.3 Bonded Particle Method

El *Bonded Particle Method* representa un sólido frágil mediante un empaquetamiento de partículas esféricas conectadas inicialmente por enlaces cohesivos. Cada enlace une dos partículas vecinas y transmite fuerzas normales, fuerzas tangenciales, momentos de flexión y momentos de torsión. Cuando un enlace falla, las partículas permanecen en la simulación, pero posteriormente interactúan solamente mediante el modelo de contacto no cohesivo.

Se considera un enlace cilíndrico de radio R_b . Su área transversal A_b , segundo momento de área I_b y momento polar J_b se expresan como

$$A_b = \pi R_b^2, \quad I_b = \frac{\pi R_b^4}{4}, \quad J_b = \frac{\pi R_b^4}{2}. \quad (21)$$

Las fuerzas internas del enlace se actualizan a partir de los desplazamientos relativos normal y tangencial, Δu_n y $\Delta \mathbf{u}_t$, respectivamente:

$$F_n^b = k_n^b \Delta u_n, \quad \mathbf{F}_t^b = k_t^b \Delta \mathbf{u}_t, \quad (22)$$

donde k_n^b y k_t^b corresponden a las rigideces normal y tangencial del enlace. Los momentos de flexión y torsión se calculan según

$$\mathbf{M}_b = k_b^b \Delta \boldsymbol{\theta}_b, \quad M_\tau = k_\tau^b \Delta \theta_\tau, \quad (23)$$

donde $\Delta \boldsymbol{\theta}_b$ y $\Delta \theta_\tau$ son las rotaciones relativas de flexión y torsión, respectivamente.

El esfuerzo normal máximo sobre la periferia del enlace se obtiene combinando el efecto axial y el momento flector:

$$\sigma_b = \frac{F_n^b}{A_b} + \frac{\|\mathbf{M}_b\| R_b}{I_b}. \quad (24)$$

El esfuerzo de corte máximo se calcula considerando la fuerza tangencial y el momento torsor:

$$\tau_b = \frac{\|\mathbf{F}_t^b\|}{A_b} + \frac{|M_\tau| R_b}{J_b}. \quad (25)$$

La rotura del enlace se define mediante al sobrepasar un límite de esfuerzo normal, corte o ambos, cuyos valores pueden ser definidos por el usuario.

El algoritmo general del BPM se presenta en el Algoritmo 1.

Algorithm 1 Procedimiento general para el modelo BPM.

```

1: Generar el empaquetamiento de partículas esféricas.
2: Identificar pares de partículas vecinas.
3: Crear un enlace cohesivo para cada par de partículas vecinas.
4: while la simulación no haya finalizado do
5:     Detectar contactos entre partículas y paredes.
6:     Calcular fuerzas de contacto histeréticas y friccionales.
7:     for cada enlace cohesivo intacto do
8:         Calcular desplazamientos y rotaciones relativas.
9:         Actualizar fuerzas normales y tangenciales del enlace.
10:        Actualizar momentos de flexión y torsión.
11:        Calcular  $\sigma_b$ ,  $\tau_b$ .
12:        if Se cumple criterio de fractura then
13:            Eliminar el enlace cohesivo.
14:            Registrar posición y modo de falla.
15:        end if
16:    end for
17:    Sumar fuerzas y momentos sobre cada partícula.
18:    Integrar las ecuaciones de movimiento.
19: end while

```

La principal ventaja del BPM es su capacidad para reproducir daño progresivo, distribución espacial de grietas y mecanismos de fractura. Sin embargo, el tamaño mínimo de fragmento queda limitado por el diámetro de las partículas que constituyen el sólido. En consecuencia, representar fragmentación fina exige emplear partículas pequeñas, incrementando de forma importante el número de grados de libertad y el costo computacional [18, 19].

4.4 Particle Replacement Method

El *Particle Replacement Method* considera inicialmente cada partícula como una sola. A diferencia del BPM, no se representa la estructura interna de la partícula. En su lugar, se asigna una energía específica de fractura E_m , correspondiente a la energía máxima por unidad de masa que la partícula puede soportar antes de fracturarse. La energía de fractura puede depender del tamaño de partícula y presentar dispersión estadística, con el fin de representar la variabilidad observada experimentalmente [20].

El criterio de rotura primaria se expresa como

$$E_c \geq E_m. \quad (26)$$

Cuando se satisface la ecuación 26, la partícula madre se elimina y se reemplaza por N_f partículas hijas. La generación de fragmentos debe conservar la masa:

$$m_i = \sum_{k=1}^{N_f} m_k. \quad (27)$$

Si todas las partículas presentan densidad constante ρ , la condición anterior puede escribirse en función de los radios:

$$R_i^3 = \sum_{k=1}^{N_f} R_k^3. \quad (28)$$

Los radios de las partículas hijas se determinan a partir de una distribución granulométrica experimental. Esta distribución puede expresarse mediante fracciones másicas acumuladas o mediante parámetros de fragmentación, tales como t_{10} , correspondiente al porcentaje de masa que pasa por una abertura igual a un décimo del tamaño característico de la partícula madre. La distribución de fragmentos debe depender de la energía específica aplicada durante el impacto [20].

Las partículas hijas se ubican alrededor de la posición de la partícula madre, evitando superposiciones excesivas con partículas vecinas. Asimismo, sus velocidades iniciales deben satisfacer, de manera aproximada, la conservación del momento lineal:

$$m_i \mathbf{v}_i = \sum_{k=1}^{N_f} m_k \mathbf{v}_k. \quad (29)$$

El Algoritmo 2 presenta el procedimiento general de implementación del PRM.

Algorithm 2 Procedimiento general para el modelo PRM.

```
1: Inicializar partículas y asignar una energía de fractura  $E_f$ .
2: Cargar distribuciones experimentales de tamaños de fragmentos.
3: while la simulación no haya finalizado do
4:   Detectar contactos entre partículas y paredes.
5:   Calcular fuerzas de contacto histeréticas y friccionales.
6:   Calcular la energía disipada en cada contacto.
7:   for cada partícula impactada do
8:     Calcular la energía específica disponible  $E_s$ .
9:     if  $E_s \geq E_f$  then
10:      Seleccionar la distribución de fragmentos según  $E_s$ .
11:      Generar radios de partículas hijas conservando masa.
12:      Posicionar fragmentos sin superposición crítica.
13:      Asignar velocidades conservando momento lineal.
14:      Eliminar la partícula madre.
15:      Incorporar partículas hijas al sistema.
16:    end if
17:  end for
18:  Sumar fuerzas y momentos sobre cada partícula.
19:  Integrar las ecuaciones de movimiento.
20: end while
```

El PRM es particularmente apropiado para representar conminución en equipos mineros, pues permite describir una reducción progresiva de tamaño sin discretizar internamente cada partícula. En comparación con el BPM, este enfoque requiere una menor cantidad de partículas iniciales y permite incorporar directamente información obtenida a partir de ensayos de rotura por impacto [19, 20].

5 Conclusiones

En el presente trabajo se logró cumplir el objetivo general de diseñar e implementar un banco de ensayos de impacto tipo Drop Weight Test (DWT) instrumentado mediante una celda de carga, permitiendo evaluar la respuesta dinámica y la energía específica de fractura primaria de distintos materiales bajo condiciones controladas de impacto.

Respecto al primer objetivo específico, se diseñó y construyó un banco de ensayos capaz de realizar impactos controlados mediante variación de altura de caída y masa del impactador. Se desarrolló una metodología de calibración para la celda de carga DYM-102 de 2 toneladas mediante ensayos de compresión realizados en una máquina Zwick Roell Z005. A partir de estos ensayos se determinó la rigidez equivalente del sistema y un factor de calibración experimental de 1.3749 para corregir la respuesta de la celda bajo cargas dinámicas.

Se formuló un procedimiento de fabricación, selección y manejo de probetas cilíndricas de cemento, permitiendo reducir la dispersión experimental y mejorar la repetibilidad de los ensayos.

Se compararon los resultados obtenidos utilizando una celda de carga y un sensor piezoeléctrico PCB Piezotronics 208C05. Los resultados mostraron que el sensor piezoeléctrico presenta una mejor respuesta dinámica frente a impactos de corta duración, registrando con mayor precisión el contacto entre el impactador y la muestra. Por otro lado, la celda de carga presentó señales más amortiguadas y tiempos de descarga mayores, debido a que está diseñada principalmente para cargas cuasiestáticas. Sin embargo, pese a estas diferencias, los valores de energía específica de fractura primaria obtenidos mediante ambos sensores fueron comparables, especialmente en ensayos sobre cemento a 1,1 m/s, donde las diferencias fueron menores a 10 J/kg. Los resultados demostraron que, si bien la celda de carga no fue diseñada específicamente para impactos, puede entregar mediciones coherentes y reproducibles al aplicar la calibración correspondiente.

Los resultados experimentales mostraron además que el cuarzo presenta una dispersión considerablemente mayor que el cemento, tanto en la forma de las señales como en la distribución de energía específica de fractura primaria. Este comportamiento se atribuye a la naturaleza heterogénea del cuarzo, caracterizada por variaciones geométricas, presencia de microgrietas, etc. En contraste, el cemento presentó respuestas más homogéneas debido a su fabricación bajo condiciones controladas.

Además, los ensayos realizados en el laboratorio LTM permitieron validar la metodología desarrollada mediante el uso de un banco UFLC. Los valores de e_{50} obtenidos para cemento, cuarzo y jaspilita mostraron tendencias coherentes con la literatura.

Finalmente, esta investigación demuestra que la utilización de una celda de carga en ensayos de impacto representa una alternativa técnicamente viable y de menor costo frente a sensores piezoeléctricos especializados, siempre que se realice una calibración adecuada y se consideren las limitaciones dinámicas del sistema. El trabajo desarrollado aporta una metodología experimental reproducible para el estudio de fractura primaria bajo impacto, con potencial aplicación en investigaciones relacionadas con conminución y eficiencia energética en minería.

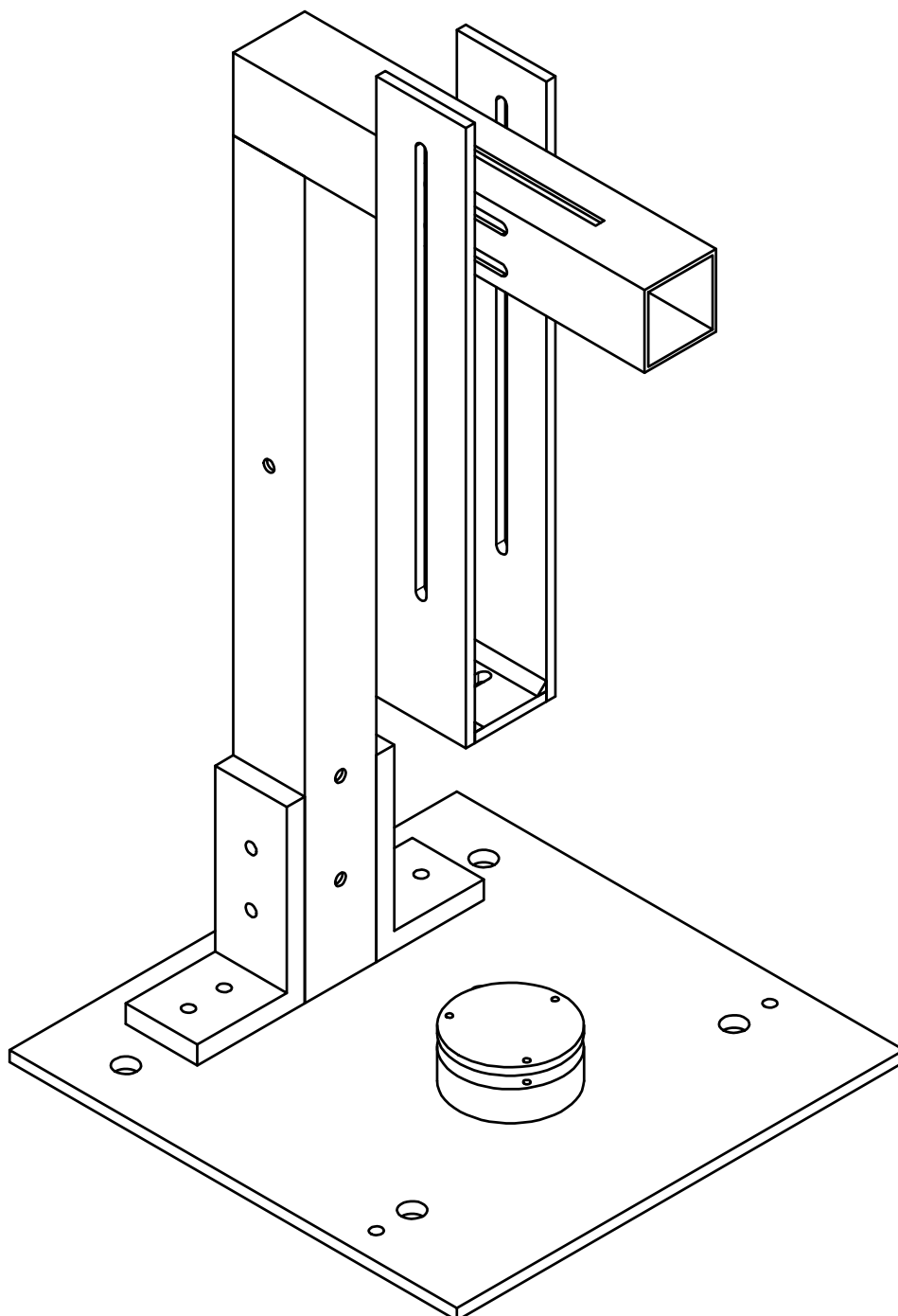
Referencias

- [1] S. Qin, H. Ren, Y. Hu, S. Ma, J. Ding, F. Lai, C. Zhang, C. Shen, and H. Zhao, “Efficient recovery of cu, co, and au from polymetallic magnetite: Insights into mineral liberation mechanisms and interfacial behavior,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 13, no. 2, p. 115940, 2025.
- [2] N. Kolev, P. Bodurov, V. Genchev, B. Simpson, M. G. Melero, and J. M. Menéndez-Aguado, “A comparative study of energy efficiency in tumbling mills with the use of relo grinding media,” *Metals*, vol. 11, no. 5, 2021.
- [3] G. Ballantyne and M. Powell, “Benchmarking comminution energy consumption for the processing of copper and gold ores,” *Minerals Engineering*, vol. 65, pp. 109–114, 2014.
- [4] T. V. B. Pinto, M. da Silva, G. Raffo, and T. Euzébio, “Specific energy reduction in a semi-autogenous grinding mill circuit by an automatic control system,” *Scientific Reports*, vol. 15, 07 2025.
- [5] K. Holmberg, P. Kivikytö-Reponen, P. Härkisaari, K. Valtonen, and A. Erdemir, “Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry,” *Tribology International*, vol. 115, pp. 116–139, 2017.
- [6] E. Aramendia, P. E. Brockway, P. G. Taylor, and J. Norman, “Global energy consumption of the mineral mining industry: Exploring the historical perspective and future pathways to 2060,” *Global Environmental Change*, vol. 83, p. 102745, 2023.
- [7] J. Jeswiet and A. Szekeres, “Energy consumption in mining comminution,” *Procedia CIRP*, vol. 48, pp. 140–145, 2016. The 23rd CIRP Conference on Life Cycle Engineering.
- [8] M. Akhondizadeh Korrani and M. Rezaeizadeh, “Experimental investigation of the effect of energy on the ore breakage,” *Mechanics and Industry*, vol. 18, p. 113, 01 2017.
- [9] K. Barbosa, J. Esterle, B. Bonfils, and Z. Chen, “The use of short impact load cell to derive geomechanical properties of sub-bituminous coal and mudstone,” *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 72, p. 103018, 2019.
- [10] P. Lois-Morales, C. Evans, and D. Weatherley, “Characterising tensile strength and elastic moduli of altered igneous rocks at comminution scale using the short impact load cell,” *Powder Technology*, vol. 388, pp. 343–356, 2021.
- [11] L. Tavares and R. King, “Single-particle fracture under impact loading,” *International Journal of Mineral Processing*, vol. 54, no. 1, pp. 1–28, 1998.
- [12] P. Li, S. Liu, Y. Wang, Z. Deng, J. Wang, and Z. Cao, “A new device and calibration method for the fracture energy testing of single-particle impact,” *Powder Technology*, vol. 445, p. 120142, 2024.
- [13] G. Mella, “Influencia de la velocidad de impacto en la fractura primaria del mineral de cobre, mediante la fabricación de un banco de ensayos,” 2025.
- [14] P. Lois-Morales, D. Mora, S. Moraga, J. R. Godinho, and L. Pereira, “Workflow for microstructural characterisation and impact breakage analysis of complex particles using xct and deep learning segmentation,” *Minerals Engineering*, vol. 246, p. 110399, 2026.
- [15] A. M. Mansor, R. P. Borg, A. M. M Hamed, M. M. Gadeem, and M. M. Saeed, “The effects of water-cement ratio and chemical admixtures on the workability of concrete,”

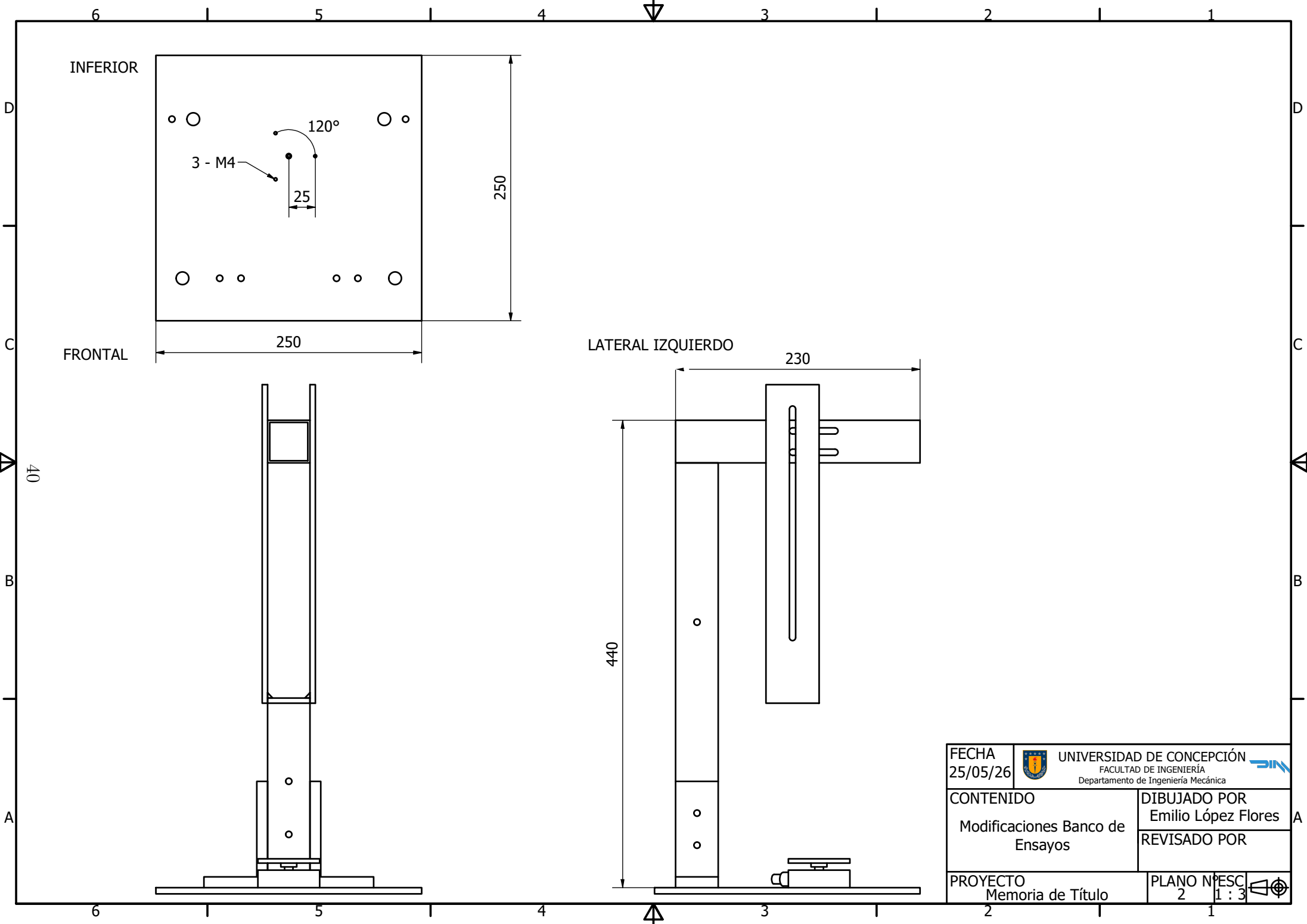
IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 442, p. 012017, nov 2018.

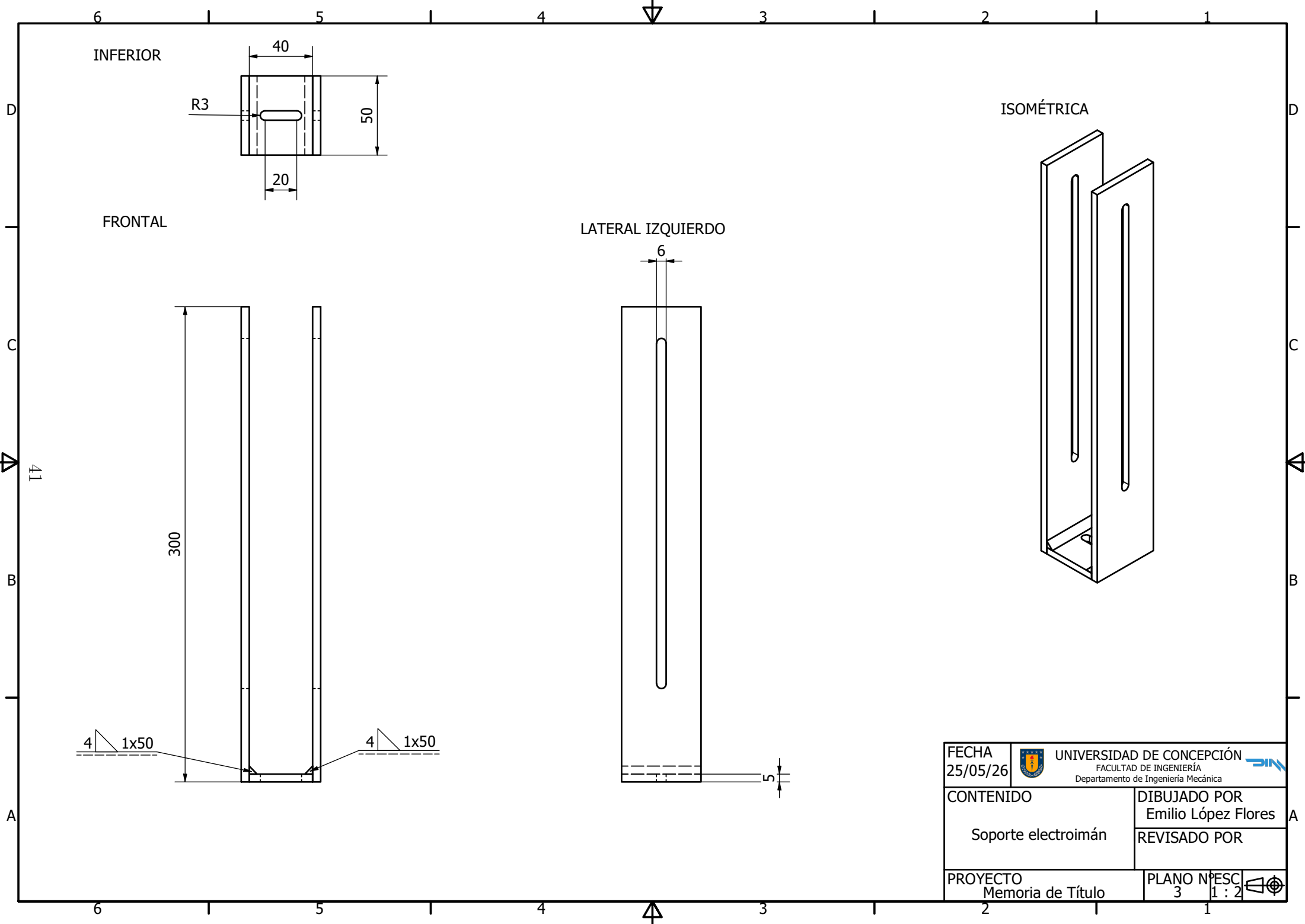
- [16] P. A. Cundall and O. D. L. Strack, “A discrete numerical model for granular assemblies,” *Géotechnique*, vol. 29, no. 1, pp. 47–65, 1979.
- [17] P. Toledo M., M. Moncada M., C. Ruiz S., F. Betancourt C., C. G. Rodríguez, and C. Vicuña, “A review of the application of the discrete element method in comminution circuits,” *Powder Technology*, vol. 459, p. 121027, June 2025.
- [18] D. O. Potyondy and P. A. Cundall, “A bonded-particle model for rock,” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 41, no. 8, pp. 1329–1364, 2004.
- [19] P. W. Cleary, “Recent advances in DEM modelling of tumbling mills,” *Minerals Engineering*, vol. 14, no. 10, pp. 1295–1319, 2001.
- [20] 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.

A Planos de fabricación



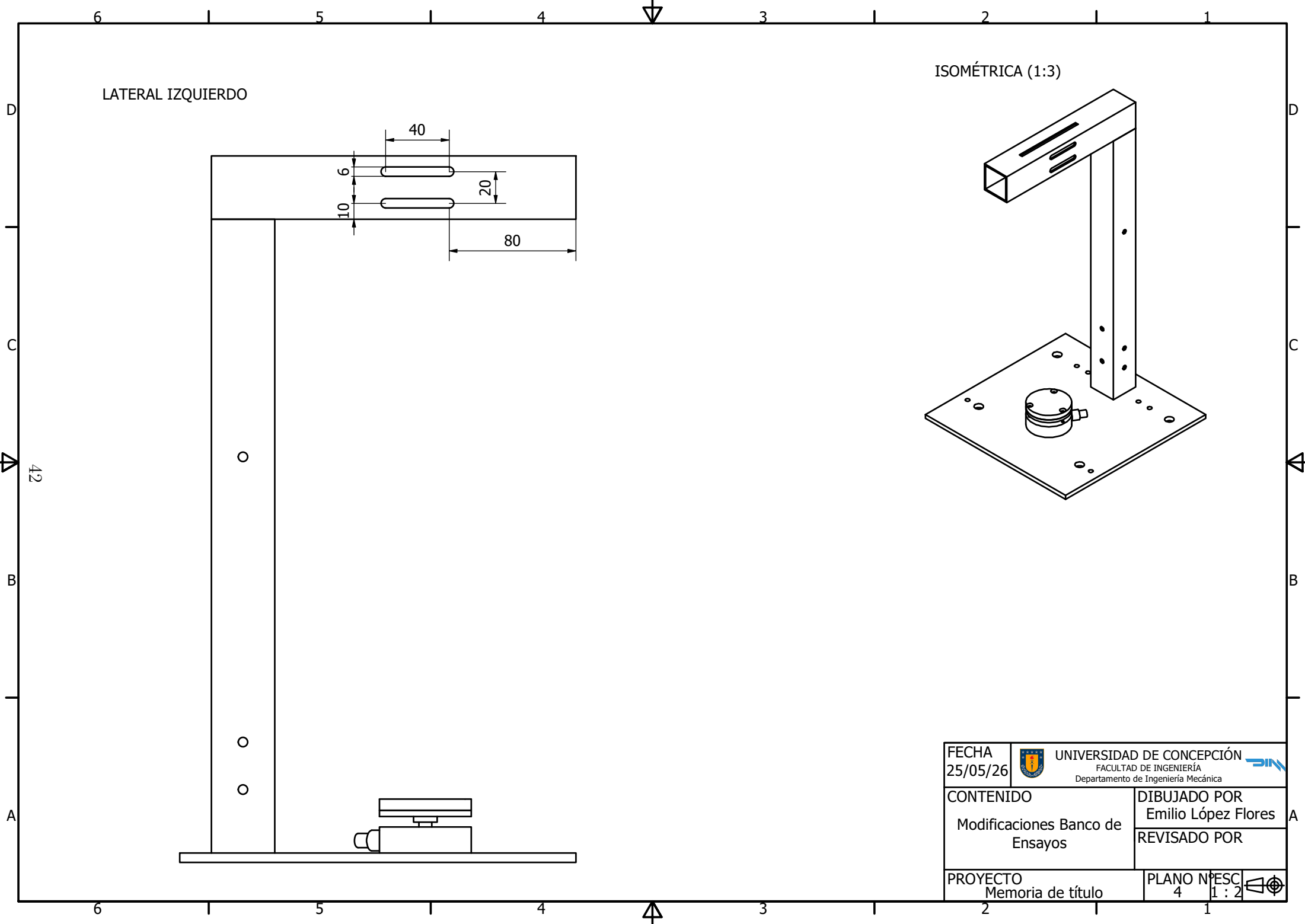
FECHA 25/05/26	 UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica 
CONTENIDO Isométrica Banco de Ensayos	DIBUJADO POR Emilio López Flores
	REVISADO POR
PROYECTO Memoria de Título	PLANO Nº 1 PESC 1 : 2 





FECHA 25/05/26		UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica	
CONTENIDO Soporte electroimán		DIBUJADO POR Emilio López Flores	
		REVISADO POR	
PROYECTO Memoria de Título		PLANO Nº 3	ESCALA 1 : 2





FECHA 25/05/26		 UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica	
CONTENIDO Modificaciones Banco de Ensayos		DIBUJADO POR Emilio López Flores	
		REVISADO POR	
PROYECTO Memoria de título		PLANO Nº 4	ESCALA 1 : 2 

B Código en Python

B.1 Calibración celda de carga

```
%% LIMPIEZA
clear; clc; close all;

% CARGAR DATOS DE ZWICK
file_zwick = 'probeta_147.xlsx';

data = readmatrix(file_zwick);

deformacion = data(:,1); % mm
fuerza_zwick = data(:,2); % N

% CARGAR DATOS DEL PICOSCOPE
file_pico = 'Ensayo_1000N_vel_8mm_min_probeta_147.mat';

load(file_pico);

% Senal
fuerza_pico_kg = double(A);

% Reconstruir tiempo
dt = Tinterval;
t0 = Tstart;

t = t0 + (0:length(fuerza_pico_kg)-1)' * dt;

% CONVERTIR KG A NEWTON
g = 9.81;

fuerza_pico_N = fuerza_pico_kg * g;

% FILTRADO
fuerza_pico_N = smoothdata(fuerza_pico_N,'movmean',500);

% SINCRONIZAR FUERZAS
Fmax_zwick = max(fuerza_zwick);
Fmax_pico = max(fuerza_pico_N);

factor_calibracion = Fmax_zwick / Fmax_pico;

fprintf('Factor de calibracion = %.4f\n',factor_calibracion);

% Aplicar calibracion
fuerza_pico_cal = fuerza_pico_N * factor_calibracion;

% CALCULO DE RIGIDEZ (regresion lineal)
% Seleccionar tramo lineal
idx = deformacion >= 0.59 & deformacion <= 0.70;
```

```

x_lin = deformacion(idx);
y_lin = fuerza_zwick(idx);

% Ajuste lineal
p = polyfit(x_lin,y_lin,1);
rigidez = p(1); % N/mm

fprintf('Rigidez del sistema = %.2f N/mm\n',rigidez);

fuerza_fit = polyval(p,deformacion);

% GRAFICAS
figure
plot(deformacion,fuerza_zwick,'b')
hold on
plot(deformacion,fuerza_fit,'r--','LineWidth',2)
xlabel('Deformacion (mm)')
ylabel('Fuerza (N)')
title('Curva Fuerza vs Deformacion (Zwick)')
legend({'Datos','Ajuste lineal'},"FontSize",14)
grid on
hold on
exportgraphics(gca,'zwick2.pdf','BackgroundColor','none');
figure(2)
plot(t,fuerza_pico_kg)
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Carga (kg)')
title('Senal osciloscopio')
grid on
exportgraphics(gca,'picoSCOPE.pdf','BackgroundColor','none');

```

B.2 Impulso absorbido por Celda de carga

```
clear; clc; close all;

%% === Estilo global ===
set(groot, 'defaultTextInterpreter', 'latex');
set(groot, 'defaultLegendInterpreter', 'latex');
set(groot, 'defaultAxesTickLabelInterpreter', 'latex');

set(groot, 'defaultAxesFontName', 'Times New Roman');
set(groot, 'defaultTextFontName', 'Times New Roman');

set(groot, 'defaultAxesFontSize', 8);
set(groot, 'defaultAxesLineWidth', 1.0);
set(groot, 'defaultLineLineWidth', 1.2);

%% === Parametros globales ===
% Deteccion de inicio
umbral_inicio_N = 30; % [N]
min_above_ms = 0.20; % [ms] persistencia sobre umbral

% Fractura primaria (modo fractura)
delta_fuerza_N = 200; % [N] caida desde maximo local

% Fin de contacto (modo contacto)
end_threshold_N = 30; % [N]
min_quiet_ms = 0.50; % [ms] persistencia bajo end_threshold_N

% Preprocesado
baseline_window_s = 0.002; % [s] tara inicial
integrar_solo_positivo = true;

% Lectura Excel/CSV
excel_force_units_default = 'lbf'; % 'lbf' o 'N'
excel_sheet_default = ''; % '' = primera hoja

% PicoScope .MAT (SIEMPRE kg)
g = 9.80665;

% Ventana util
ymax_plot = 600; % [N]
x_pre_us = -1800; % [us] OJO: AHORA DEFINE el inicio de integracion = impacto - x_
x_post_us = 6000; % [us] extra despues del fin
t_manual_start_s = 0.498; % [s] tiempo desde el cual comenzar a graficar

t_manual_span_s = 0.009; % [s] duracion de la ventana mostrada

% Export
export_svg = true;
export_segment_csv = false;

% --- Recorte y guardado automatico ---
crear_archivo_recortado = true;
```

```

guardar_recorte_mat      = false;
guardar_recorte_csv      = false;
usar_v73                 = true;

% --- Estetica elegante ---
max_points_plot = 6000;
x_tick_us = 4000;
y_tick_N = 200;

% --- Hatch con pocas lineas ---
n_hatch_lines = 20;
hatch_linewidth = 0.9;
hatch_angle_deg = 45;

%% === Seleccionar archivo ===
[fname, fpath] = uigetfile( ...
{'*.xlsx;*.xls;*.csv;*.mat', 'Datos (*.xlsx, *.xls, *.csv, *.mat)'; ...
 '*.mat', 'MAT (*.mat)'; ...
 '*.xlsx;*.xls;*.csv', 'Excel/CSV (*.xlsx, *.xls, *.csv)'; ...
 '.*', 'Todos (*.*)' }, ...
'Selecciona el archivo de datos');

if isequal(fname,0)
error('No seleccionaste ningun archivo.');
```

```

end

archivo = fullfile(fpath, fname);
[~, baseName, ext] = fileparts(archivo);

%% === Cargar datos -> time_s (s), force_N (N) ===
time_s = [];
force_N = [];
canal_usado = '';
source_file = archivo;
force_units = 'N';

% Indices (separamos impacto vs inicio integracion)
idx_impacto = [];
idx_inicio_int = [];
idx_fin = [];

switch lower(ext)
case '.mat'
S = load(archivo);

% ---- Ruta rapida: .MAT ya procesado/recortado (generado por este script) ----
if isfield(S,'time_s') && isfield(S,'force_N')
time_s = double(S.time_s(:));
force_N = double(S.force_N(:));

if isfield(S,'meta')
if isfield(S.meta,'source_file'); source_file = S.meta.source_file; end

```

```

if isfield(S.meta,'canal_usado'); canal_usado = S.meta.canal_usado; end
if isfield(S.meta,'force_units'); force_units = S.meta.force_units; end
end

if isfield(S,'idx_impacto');      idx_impacto = double(S.idx_impacto); end
if isfield(S,'idx_inicio_int');  idx_inicio_int = double(S.idx_inicio_int); end
if isfield(S,'idx_fin');         idx_fin = double(S.idx_fin); end

bad = ~isfinite(time_s) | ~isfinite(force_N);
if any(bad)
time_s(bad) = [];
force_N(bad) = [];
end
[time_s, idxSort] = sort(time_s);
force_N = force_N(idxSort);

goto_picoscope = false;
else
goto_picoscope = true;
end

% ---- PicoScope .MAT ----
if goto_picoscope
if ~isfield(S,'Tinterval') || ~isfield(S,'Length')
error('El .mat no tiene Tinterval y/o Length. Revisa exportacion PicoScope.');
```

```

y = double(S.(canal)); y = y(:);
if numel(y) < N_ps, N_ps = numel(y); end
y = y(1:N_ps);

if isfield(S,'Tstart'), t0 = double(S.Tstart); else, t0 = 0.0; end
time_s = t0 + (0:N_ps-1)' * dt_ps;

bad = ~isfinite(y);
if any(bad)
xgood = find(~bad);
y(bad) = interp1(xgood, y(~bad), find(bad), 'linear', 'extrap');
end

% === SIEMPRE kg: tara y luego convertir a N ===
nBase = min(N_ps, max(10, round(baseline_window_s/dt_ps)));
y0 = y - median(y(1:nBase)); % kg (masa equivalente) sin offset
force_N = y0 * g; % N

force_units = 'N';
end

otherwise
% Excel o CSV
if endsWith(lower(ext), {'xlsx','xls'})
sheets = sheetnames(archivo);
if isempty(excel_sheet_default)
hoja = sheets(1);
else
if any(strcmp(sheets, excel_sheet_default)), hoja = excel_sheet_default; else, hoja = sheets(1);
end

if numel(sheets) > 1
[idxs, ok] = listdlg('ListString', sheets, ...
'SelectionMode','single', ...
'PromptString','Selecciona la hoja:', ...
'ListSize',[280 160], ...
'InitialValue', find(strcmp(sheets, hoja),1,'first'));
if ok, hoja = sheets(idx); end
end

opts = detectImportOptions(archivo, 'Sheet', hoja);
opts.SelectedVariableNames = opts.VariableNames(1:min(2,numel(opts.VariableNames)));
T = readtable(archivo, opts);
else
opts = detectImportOptions(archivo);
opts.SelectedVariableNames = opts.VariableNames(1:min(2,numel(opts.VariableNames)));
T = readtable(archivo, opts);
end

if width(T) < 2
error('El archivo debe tener al menos 2 columnas: tiempo y fuerza.');
```

```

end

raw_time_s = T{:,1}; raw_time_s = raw_time_s(:);
raw_force = T{:,2}; raw_force = raw_force(:);

unitChoice = questdlg('Unidades de la fuerza en Excel/CSV:', 'Unidades', 'lbf', 'N', 'lbf');
if isempty(unitChoice), unitChoice = excel_force_units_default; end

if strcmpi(unitChoice,'lbf'), force_N = raw_force * 4.44822; else, force_N = raw_force; end
time_s = raw_time_s;

bad = ~isfinite(time_s) | ~isfinite(force_N);
if any(bad), time_s(bad) = []; force_N(bad) = []; end

[time_s, idxS] = sort(time_s);
force_N = force_N(idxS);

dt_est = median(diff(time_s));
nBase = min(numel(force_N), max(10, round(baseline_window_s/max(dt_est,eps))));
force_N = force_N - median(force_N(1:nBase));
end

time_s = time_s(:);
force_N = force_N(:)*1.374;

dt = median(diff(time_s));
if ~isfinite(dt) || dt<=0
error('No se pudo estimar dt. Revisa la columna de tiempo.');
```

```

end

%% === Elegir modo de intervalo ===
modeChoice = questdlg('Como definir el intervalo de integracion?', ...
'Intervalo', ...
'Auto: impacto-fractura', ...
'Auto: impacto-fin contacto', ...
'Manual: clic 2 puntos', ...
'Auto: impacto-fractura');
```

```

if isempty(modeChoice)
modeChoice = 'Auto: impacto-fractura';
end

% Persistencia sobre umbral
min_above_samp = max(1, round((min_above_ms/1000)/dt));
get_first_persistent = @(aboveVec) ...
find( conv(double(aboveVec(:)), ones(min_above_samp,1), 'same') >= min_above_samp, 1, 'first'

% Si venia de .mat recortado y ya trae idx, usalo (excepto Manual)
need_detect = true;
if ~isempty(idx_impacto) && ~isempty(idx_inicio_int) && ~isempty(idx_fin) ...
&& idx_fin > idx_inicio_int ...
&& idx_inicio_int>=1 && idx_fin<=numel(time_s) ...
```

```

&& ~strcmp(modeChoice,'Manual: clic 2 puntos')
need_detect = false;
end

if need_detect
switch modeChoice
case 'Manual: clic 2 puntos'
% En manual: el 1er clic define inicio de integracion (y tambien se usa como "impacto" para
% ===== Ventana controlada SOLO para visualizacion =====
t0 = time_s(1);

t_vis_start = t0 + t_manual_start_s;
t_vis_end   = t_vis_start + t_manual_span_s;

idx_vis = (time_s >= t_vis_start) & (time_s <= t_vis_end);

if nnz(idx_vis) < 10
error('Ventana de visualizacion muy corta o fuera del rango de datos.');
```

end

```

time_vis = time_s(idx_vis);
force_vis = force_N(idx_vis);

% Downsampling SOLO para el grafico
ds = max(1, round(numel(time_vis)/20000));
tplot = time_vis(1:ds:end);
Fplot = force_vis(1:ds:end);

figure('Color','w');
plot((tplot - tplot(1))*1e3, Fplot, 'k-', 'LineWidth',1.1);
grid on;
xlabel('Tiempo (ms)');
ylabel('Fuerza (N)');
title(sprintf('Clic 2 puntos (%.2f{%.2f s)', ...
t_manual_start_s, t_manual_start_s + t_manual_span_s));

% Limitar ejes explicitamente (opcional pero recomendable)
xlim([0 t_manual_span_s*1e3]);

[x_ms, ~] = ginput(2);

x_ms = sort(x_ms);
t1 = tplot(1) + x_ms(1)/1e3;
t2 = tplot(1) + x_ms(2)/1e3;

idx_inicio_int = find(time_s >= t1, 1, 'first');
idx_fin        = find(time_s <= t2, 1, 'last');

if isempty(idx_inicio_int) || isempty(idx_fin) || idx_fin <= idx_inicio_int
error('Seleccion manual invalida.');
```

```

end

idx_impacto = idx_inicio_int; % referencia para t=0

otherwise
% AUTO: detectar impacto por umbral y persistencia
above = force_N > umbral_inicio_N;
idx_impacto = get_first_persistent(above);
if isempty(idx_impacto)
error('No se detecto impacto. Ajusta umbral_inicio_N o min_above_ms.');
```

```

end

% AUTO: fin por fractura o fin de contacto (desde impacto)
if strcmp(modeChoice, 'Auto: impacto-fractura')
forces_post = force_N(idx_impacto:end);

f_max = forces_post(1);
idx_max_local = 1;
idx_fractura_rel = [];

for i = 2:numel(forces_post)
val = forces_post(i);
if val > f_max
f_max = val;
idx_max_local = i;
elseif (f_max - val) >= delta_fuerza_N
idx_fractura_rel = idx_max_local; % fractura en el maximo previo
break;
end
end

if isempty(idx_fractura_rel)
[~, idx_fractura_rel] = max(forces_post);
end

idx_fin = idx_impacto + idx_fractura_rel - 1;

else
% Auto: fin contacto
below = force_N < end_threshold_N;
min_quiet_samp = max(1, round((min_quiet_ms/1000)/dt));

below_post = below;
below_post(1:idx_impacto) = false;

idx_below = find( conv(double(below_post(:)), ones(min_quiet_samp,1), 'same') >= min_quiet_samp);

if isempty(idx_below)
[~, imax] = max(force_N(idx_impacto:end));
idx_fin = idx_impacto + imax - 1;
else
idx_fin = idx_below;

```

```

end
end

% === CAMBIO CLAVE: inicio de integracion = impacto - x_pre_us (en AUTO) ===
pre_samp = max(0, round((x_pre_us * 1e-6)/dt));
idx_inicio_int = max(1, idx_impacto - pre_samp);
end
end

%% === RECORTE automatico (ahora recorta desde idx_inicio_int, no desde impacto) ===
if crear_archivo_recortado
post_samp = max(0, round((x_post_us * 1e-6)/dt));

idx0 = max(1, idx_inicio_int);           % inicio real de integracion
idx1 = min(numel(time_s), idx_fin + post_samp);

time_cut_s = time_s(idx0:idx1);
force_cut_N = force_N(idx0:idx1);

% Ajustar indices al recorte
idx_impacto      = idx_impacto      - idx0 + 1;
idx_inicio_int   = idx_inicio_int   - idx0 + 1; % queda 1
idx_fin          = idx_fin          - idx0 + 1;

time_s = time_cut_s;
force_N = force_cut_N;

if endsWith(baseName, '_recortado')
outBase = baseName;
else
outBase = [baseName '_recortado'];
end

if guardar_recorte_mat
nombre_mat = fullfile(fpath, sprintf('%s.mat', outBase));

meta = struct();
meta.source_file = source_file;
meta.canal_usado = canal_usado;
meta.force_units = force_units;
meta.modeChoice = modeChoice;

meta.umbral_inicio_N = umbral_inicio_N;
meta.min_above_ms    = min_above_ms;
meta.delta_fuerza_N  = delta_fuerza_N;
meta.end_threshold_N = end_threshold_N;
meta.min_quiet_ms    = min_quiet_ms;

meta.baseline_window_s = baseline_window_s;
meta.integrar_solo_positivo = integrar_solo_positivo;

meta.x_pre_us = x_pre_us;

```

```

meta.x_post_us = x_post_us;

% indices
idx_impacto_save    = idx_impacto;
idx_inicio_int_save = idx_inicio_int;
idx_fin_save        = idx_fin;

if usar_v73
save(nombre_mat, 'time_s','force_N','idx_impacto_save','idx_inicio_int_save','idx_fin_save',
else
save(nombre_mat, 'time_s','force_N','idx_impacto_save','idx_inicio_int_save','idx_fin_save',
end
fprintf('Recorte guardado: %s\n', nombre_mat);
end

if guardar_recorte_csv
nombre_csv = fullfile(fpath, sprintf('%s.csv', outBase));
out_cut = table(time_s, force_N, 'VariableNames', {'time_s','force_N'});
writetable(out_cut, nombre_csv);
fprintf('Recorte CSV guardado: %s\n', nombre_csv);
end

baseName = outBase;
end

%% === Intervalo seleccionado (integracion) ===
t_impacto_s = time_s(idx_impacto);
t_inicio_int_s = time_s(idx_inicio_int);
t_fin_s      = time_s(idx_fin);

% Integrar desde idx_inicio_int (que en recorte queda 1) hasta idx_fin
mask_sel = false(size(time_s));
mask_sel(idx_inicio_int:idx_fin) = true;

time_sel_s = time_s(mask_sel);
force_sel_N = force_N(mask_sel);

Fint = force_sel_N;
if integrar_solo_positivo
Fint = max(Fint, 0);
end
impulso = trapz(time_sel_s, Fint);

fprintf('\nArchivo fuente: %s\n', source_file);
if ~isempty(canal_usado), fprintf('Canal: %s (asumido kg)\n', canal_usado); end
fprintf('Impacto (t=0):          %.6f s\n', t_impacto_s);
fprintf('Inicio integracion:      %.6f s (offset = %.1f us)\n', t_inicio_int_s, (t_inicio_int-1));
fprintf('Fin:                        %.6f s\n', t_fin_s);
fprintf('Impulso J:                  %.4f N·s\n\n', impulso);

%% === GRaFICO elegante ===
darkblue = [0 0 0.5];

```

```

lightgray = [0.83 0.83 0.83];

t0_us = t_impacto_s * 1e6;          % t=0 en impacto (no en integracion)
time_us = time_s * 1e6;

time_rel_us      = time_us - t0_us;
time_sel_rel_us  = (time_sel_s*1e6) - t0_us;
t_fin_rel_us     = (t_fin_s*1e6) - t0_us;
f_fin = force_N(idx_fin);

xlim_use = [min(time_rel_us), t_fin_rel_us + x_post_us];
ylim_use = [0, ymax_plot];

fig = figure('Units','inches','Position',[1, 1, 4, 2.5], 'Color','w');
ax = gca; hold on;

% Curva completa (downsample)
ds_plot = max(1, ceil(numel(time_rel_us)/max_points_plot));
h_force = plot(time_rel_us(1:ds_plot:end), force_N(1:ds_plot:end), ...
'Color','k', 'LineWidth', 1.2, 'DisplayName','Fuerza');

% Gris post-fin
mask_gray = time_rel_us >= t_fin_rel_us;
if any(mask_gray)
    xg = time_rel_us(mask_gray);
    yg = force_N(mask_gray);
    ds_gray = max(1, ceil(numel(xg)/max(2000, floor(max_points_plot/2))));
    xg = xg(1:ds_gray:end);
    yg = yg(1:ds_gray:end);

    patch([xg; flip(xg)], [yg; zeros(size(yg))], lightgray, ...
'EdgeColor','none', 'FaceAlpha',0.5, 'HandleVisibility','off');
end

% Zona integrada (hachurado)
x_int = time_sel_rel_us(:);
y_int = force_sel_N(:);
ds_int = max(1, ceil(numel(x_int)/2000));
x_int_d = x_int(1:ds_int:end);
y_int_d = y_int(1:ds_int:end);

draw_hatch_few_lines(ax, x_int_d, y_int_d, hatch_angle_deg, n_hatch_lines, hatch_linewidth,
darkblue, xlim_use, ylim_use);

h_zone = patch(nan, nan, 'w', 'FaceColor','none', 'EdgeColor',darkblue, ...
'DisplayName','Zona integrada');

% Linea punteada en fin
line([t_fin_rel_us t_fin_rel_us], [0 f_fin], ...
'Color', darkblue, 'LineStyle','--', 'LineWidth',1.0, 'HandleVisibility','off');

% Marcadores: inicio impacto y fin

```

```

h_start = scatter(0, force_N(idx_impacto), 15, 'o', ...
'MarkerFaceColor','k', 'MarkerEdgeColor','k', 'DisplayName','Inicio impacto');
h_end = scatter(t_fin_rel_us, f_fin, 25, 's', ...
'MarkerFaceColor','none', 'MarkerEdgeColor','k', 'LineWidth',1.0, ...
'DisplayName','Fractura primaria');

% Ejes / ticks
xlabel('Tiempo ( $\mu$ s)', 'FontSize', 8);
ylabel('Fuerza (N)', 'FontSize', 8);

xlim(xlim_use);
ylim(ylim_use);

xt0 = floor(xlim_use(1)/x_tick_us)*x_tick_us;
xt1 = ceil(xlim_use(2)/x_tick_us)*x_tick_us;
ax.XTick = xt0:x_tick_us:xt1;

ax.YTick = 0:y_tick_N:ceil(ylim_use(2)/y_tick_N)*y_tick_N;

% Grid discreto (si quieres SIN lineas verticales, deja XGrid off)
grid on;
ax.XGrid = 'off';
ax.YGrid = 'on';
ax.GridLineStyle = ':';
try, ax.GridAlpha = 0.25; catch, end

ax.LineWidth = 1.0;
ax.TickDir = 'out';
ax.TickLength = [0.03 0.03];

leg = legend([h_force, h_zone, h_start, h_end], 'Location','best');
leg.FontSize = 6;
leg.Interpreter = 'latex';

if export_svg
nombre_svg = sprintf('grafico_%s_impulso.pdf', baseName);
%exportgraphics(gca, fullfile(fpath, nombre_svg), 'ContentType','vector');
exportgraphics(gca,'grafico_131_impulso.pdf','BackgroundColor','none');
set(fig, 'Renderer', 'painters'); % CLAVE para SVG
print(fig, fullfile(fpath, nombre_svg), '-dsvg');
fprintf('Grafico guardado: %s\n', fullfile(fpath, nombre_svg));
end
%%
if export_segment_csv
nombre_csv = sprintf('segmento_integrado_%s.csv', baseName);
out = table(time_sel_s, force_sel_N, 'VariableNames', {'time_s','force_N'});
writetable(out, fullfile(fpath, nombre_csv));
fprintf('Segmento integrado guardado: %s\n', fullfile(fpath, nombre_csv));
end

%% ===== FUNCIONES LOCALES =====
function draw_hatch_few_lines(ax, x, y, angle_deg, n_lines, lw, color, xlim_use, ylim_use)

```

```

% Hachurado liviano: dibuja SOLO n_lines lineas inclinadas dentro del poligono area-integrada
% (x,y) define el borde superior, baseline en y=0.

if n_lines <= 0, return; end

x = x(:); y = y(:);
ok = isfinite(x) & isfinite(y);
x = x(ok); y = y(ok);
if numel(x) < 10, return; end

X = [x; flipud(x)];
Y = [y; zeros(size(y))];

xmin = xlim_use(1); xmax = xlim_use(2);
ymin = ylim_use(1); ymax = ylim_use(2);
xspan = max(eps, xmax - xmin);
yspan = max(eps, ymax - ymin);

Xn = (X - xmin) / xspan;
Yn = (Y - ymin) / yspan;

P = polyshape(Xn, Yn, 'Simplify', true);
if P.NumRegions < 1 || area(P) <= 0, return; end

th = deg2rad(angle_deg);
d = [cos(th), sin(th)];
n = [-sin(th), cos(th)];

V = P.Vertices;
svals = V * n(:);
smin = min(svals);
smax = max(svals);
if ~isfinite(smin) || ~isfinite(smax) || smax <= smin, return; end

margin = 0.04*(smax - smin);
smin2 = smin + margin;
smax2 = smax - margin;
if smax2 <= smin2
smin2 = smin; smax2 = smax;
end

offsets = linspace(smin2, smax2, n_lines);

w = 0.0025;
L = 3;

for s = offsets
p0 = n*s - d*L;
p1 = n*s + d*L;

q1 = p0 + n*(w/2);
q2 = p1 + n*(w/2);

```

```

q3 = p1 - n*(w/2);
q4 = p0 - n*(w/2);

S = polyshape([q1(1) q2(1) q3(1) q4(1)], [q1(2) q2(2) q3(2) q4(2)], 'Simplify', true);
I = intersect(P, S);

if I.NumRegions < 1 || area(I) <= 0, continue; end

[bx, by] = boundary(I); % puede traer NaNs separando regiones

bx = bx * xspan + xmin;
by = by * yspan + ymin;

plot(ax, bx, by, 'Color', color, 'LineWidth', lw, 'HandleVisibility','off');
end
end

```