



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE BARRA DE COMPRESIÓN DE  
HOPKINSON (KOLSKY)

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

JOSÉ J. ARRAZTIO FIGARI

PROFESOR GUÍA:  
RUBÉN M. FERNÁNDEZ URRUTIA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
RODRIGO H. PALMA HILLERNS  
JUAN I. OSSES MÁRQUEZ

SANTIAGO DE CHILE  
2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO  
POR: JOSÉ J. ARRAZTIO FIGARI  
FECHA: 2020  
PROF. GUÍA: RUBÉN M. FERNÁNDEZ URRUTIA

## DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE BARRA DE COMPRESIÓN DE HOPKINSON (KOLSKY)

La caracterización de materiales en condiciones dinámicas representan nuevos desafíos para el desarrollo tecnológico. En base a lo anterior, se establece construir una barra de compresión de Hopkinson (SHPB, por sus siglas en inglés), en la cual un proyectil impulsado por un sistema neumático impacta a un par de barras que sujetan una muestra en configuración de tipo sandwich, registrando la deformación de las barras con extensómetros, para luego hacer la traducción en un gráfico de esfuerzo-deformación para la muestra. Para este trabajo se definen parámetros de entrada, entre los que se encuentra una presión máxima de trabajo de 6 [MPa], los largos de las barras incidentes y de transmisión fijadas en 1200 [mm] y los diámetros de éstas con 20 [mm]. Con esto en mente, se determinan las dimensiones y espesores del sistema de lanzamiento y de soporte, con el propósito de no comprometer la seguridad del personal cercano. Además, se diseña un sistema de adquisición de los datos para el cual se calcula una frecuencia de muestreo mínima de 24 [kHz] según el criterio de Nyquist, lo que permite seleccionar los componentes del sistema de medición. Posteriormente, se realizan diez mediciones experimentales para el aluminio AA1100-H14, de las cuales tres fueron ingresadas al software Sure-Pulse para obtener los gráficos característicos del material, registrando una tasa de deformación promedio de 139 [ $s^{-1}$ ]. Los gráficos de esfuerzo-deformación, en conjunto con la tasa de deformación, permiten determinar los parámetros de Johnson-Cook para el material. Finalmente, se concluye que se cumplen todos los objetivos propuestos para esta tesis y se proponen mejoras y estudios alternativos para el equipo, entre los que se encuentran análisis de sensibilidad y la adición de ensayos con temperatura.



# Agradecimientos

Partir agradeciendo a mis abuelos, a quienes recurrí más de alguna vez, aún cuando estaban ausentes. Parece que funcionó.

Agradecer a mi mamá, por su apoyo incondicional y a mi papá, por siempre resolver esas dudas que, aunque no solían ayudarme en lo concreto, ayudaron a formar un criterio. Igualmente, a Martín por el soporte técnico y al Mikel por jugársela con algún jugo o chocolate, incluso cuando era solo por complicidad.

De mi familia también debo agradecer a mis tíos Yáñez Figari, por hacerme un espacio en su casa durante gran parte de mi vida universitaria. Recordaré con cariño aquel periodo en el que viví en su living.

Gracias a mis compañeros y amigos por ser parte de esta etapa, por compartir algunos momentos y por ayudarme a resolver preguntas ingenieriles y no ingenieriles. En mi cabeza tengo sus nombres, pero estoy seguro que de hacer una lista habrá alguno que recordaré posterior a la entrega de este informe, y que me arrepentiré de no haberlo incluido.

Por último, darte las gracias Paz, que sé que serás de las pocas personas en leer este trabajo, por acompañarme en aquellos momentos de estrés, por cuidarme en mis múltiples dolencias y por ayudarme a solucionar problemas, usualmente con comida.



# Tabla de Contenido

<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1. Antecedentes</b>	<b>3</b>
1.1. Comportamiento mecánico de los materiales a altas tasas de deformación . .	3
1.1.1. Modelo de Plasticidad de Johnson-Cook . . . . .	5
1.2. Reseña histórica . . . . .	5
1.3. Descripción de la barra de compresión de Hopkinson (Kolsky) . . . . .	7
1.3.1. Sistema de lanzamiento . . . . .	7
1.3.2. Sistema de barras . . . . .	8
1.3.3. Sistema de adquisición . . . . .	8
1.3.4. Muestras . . . . .	8
1.4. Fundamentos de la barra de compresión de Hopkinson . . . . .	8
1.5. Criterios de diseño para el sistema de lanzamiento . . . . .	13
1.5.1. Cañón de lanzamiento . . . . .	13
1.5.2. Estanque de gas . . . . .	15
1.6. Criterios de diseño para el sistema de barras . . . . .	15
1.6.1. Material de las barras . . . . .	15
1.6.2. Dimensiones de las barras . . . . .	16
1.6.3. Soporte para las barras . . . . .	16
1.7. Adquisición de datos . . . . .	16
1.7.1. Extensómetros ( <i>strain gages</i> ) . . . . .	16
1.7.2. Puente de Wheatstone . . . . .	17
1.7.3. Amplificación de señal . . . . .	17
1.7.4. Frecuencia de muestreo . . . . .	18
1.7.5. Medición de velocidad . . . . .	18
<b>2. Metodología</b>	<b>20</b>
2.1. General . . . . .	20
2.2. Diseño y selección de los componentes mecánicos . . . . .	20
2.3. Diseño del sistema de adquisición . . . . .	21
2.4. Montaje del equipo . . . . .	21
2.5. Parámetros de entrada . . . . .	21
<b>3. Diseño del equipo</b>	<b>22</b>
3.1. Componentes Mecánicos . . . . .	22
3.1.1. Soporte de las barras . . . . .	22

3.1.2.	Proyectil y barras . . . . .	23
3.1.3.	Cañón de aire comprimido . . . . .	25
3.1.4.	Estanque de aire comprimido . . . . .	26
3.1.5.	Trampa de momentum . . . . .	26
3.1.6.	Estructura de soporte . . . . .	28
3.2.	Componentes Electrónicos . . . . .	30
3.2.1.	Cronógrafo balístico . . . . .	30
3.2.2.	Circuito de medición de onda . . . . .	30
3.3.	Resumen de parámetros calculados . . . . .	31
<b>4.</b>	<b>Selección de componentes comerciales</b>	<b>32</b>
4.1.	Componentes electrónicos . . . . .	32
4.1.1.	Strain gages . . . . .	32
4.1.2.	Amplificador operacional . . . . .	32
4.1.3.	Osciloscopio . . . . .	33
4.1.4.	Cronógrafo balístico . . . . .	34
4.2.	Conexiones de gas . . . . .	35
<b>5.</b>	<b>Construcción del equipo</b>	<b>38</b>
5.1.	Fabricación y alineación del cañón . . . . .	38
5.2.	Construcción del estanque . . . . .	40
5.3.	Alineación de las barras . . . . .	40
5.4.	Montaje de <i>strain gages</i> . . . . .	41
5.5.	Circuito de medición de onda . . . . .	44
5.6.	Procedimiento de utilización . . . . .	46
<b>6.</b>	<b>Evaluación del equipo</b>	<b>47</b>
6.1.	Curva de velocidad de proyectil . . . . .	47
6.2.	Curvas características del material AA1100-H14 . . . . .	48
6.2.1.	Curvas características . . . . .	51
6.2.2.	Parámetros de Johnson-Cook . . . . .	53
<b>7.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>55</b>
<b>8.</b>	<b>Mejoras y estudios aplicables al proyecto</b>	<b>57</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>59</b>
<b>A.</b>	<b>Memoria de cálculo</b>	<b>62</b>
A.1.	Frecuencia de muestreo . . . . .	62
A.2.	Espesor de pared . . . . .	63
A.3.	Caída de presión . . . . .	63
A.4.	Velocidad máxima del material . . . . .	64
A.5.	Puntos de apoyo de las barras . . . . .	64
A.6.	Fuerza sobre trampa de momentum . . . . .	64
<b>B.</b>	<b>Planos</b>	<b>65</b>

C. Fotografías	75
D. Procesamiento de señales	82
E. Matriz de riesgo	87

# Índice de Ilustraciones

1.1. Esfuerzo versus tasa de deformación. La importancia física de los eventos relacionados con el comportamiento de la tasa en metales. . . . .	4
1.2. Aspectos dinámicos de ensayos mecánicos. . . . .	4
1.3. Experimento de John Hopkinson. . . . .	6
1.4. Experimento original de Davis. . . . .	6
1.5. Experimento original de Kolsky. . . . .	7
1.6. Esquema general de barra de compresión de Hopkinson actual. . . . .	7
1.7. Diámetro de propagación de una onda de esfuerzo en una barra de compresión de Hopkinson. . . . .	9
1.8. Zona de muestreo en SHPB. . . . .	10
1.9. Representación de señal típica en SHPB. . . . .	10
1.10. Elemento diferencial en la barra incidente antes del impacto. . . . .	10
1.11. Expansión de serie de Taylor para la aproximación de los desplazamientos en el elemento diferencial. . . . .	11
1.12. Gráfico de velocidad-presión según el largo de cañón para un proyectil de acero, diámetro 20 [mm] y largo 200 [mm]. . . . .	14
1.13. Evolución de la presión al interior del sistema de lanzamiento . . . . .	15
1.14. Posición de los soportes para las barras incidente y de transmisión. . . . .	16
1.15. Puente de Wheatstone: a) Configuración básica, b) Cuarto de puente, c) Medio puente y d) Puente completo. . . . .	17
1.16. Diagrama típico de un amplificador operacional. . . . .	18
1.17. Esquema de medición de velocidad. . . . .	19
2.1. Metodología general del trabajo de título. . . . .	20
3.1. Diseño general del equipo. . . . .	22
3.2. Soportes de las barras. . . . .	23
3.3. Configuración de apoyo de las barras incidente y de transmisión. . . . .	24
3.4. Análisis FEM de deflexión para las barras incidente y de transmisión. . . . .	24
3.5. Análisis FEM de esfuerzos para las barras incidente y de transmisión. . . . .	24
3.6. Proyectil . . . . .	25
3.8. Estanque de aire comprimido. . . . .	26
3.7. Cañón de lanzamiento. . . . .	26
3.9. Trampa de momentum. . . . .	27
3.10. Trampa de momentum. . . . .	27
3.11. Trampa de momentum. . . . .	28

3.12. Marco de soporte del equipo. . . . .	28
3.13. Análisis FEM de viga, esfuerzos equivalentes de von Mises. . . . .	29
3.14. Análisis FEM de viga, deformación total. . . . .	29
3.15. Representación de proyectil cruzando sensores p $\acute{o}$ rticos de cron $\acute{o}$ grafo bal $\acute{i}$ stico. . . . .	30
3.16. Diagrama de bloques de circuito de medici $\acute{o}$ n de onda. . . . .	31
4.1. Strain gauge TCAM BF350-3AA. . . . .	32
4.2. Amplificador Operacional cu $\acute{a}$ druple LM324N. . . . .	33
4.3. Amplificador Operacional cu $\acute{a}$ druple LM324N. . . . .	33
4.4. Osciloscopio HANTEK 6022BE . . . . .	34
4.5. Interfaz de software HANTEK 6022BE . . . . .	34
4.6. Cron $\acute{o}$ grafo bal $\acute{i}$ stico X3200/E9800. . . . .	35
4.7. V $\acute{a}$ stago regulador de gas. . . . .	36
4.8. Manguera hidr $\acute{a}$ ulica. . . . .	36
4.9. Man $\acute{o}$ metro Winters PFQ Series Acero Inoxidable 304 0-1000 [psi]. . . . .	36
4.10. V $\acute{a}$ lvula de bola de tres piezas 25,4 [mm] con actuador neum $\acute{a}$ tico marca Genebre. . . . .	37
4.11. V $\acute{a}$ lvula de bola 12,7 [mm]. . . . .	37
5.1. Fotograf $\acute{i}$ a general del equipo. . . . .	38
5.2. Identificaci $\acute{o}$ n de base -abrazadera para un soporte de ca $\acute{o}$ ñ. . . . .	39
5.3. Ca $\acute{o}$ ñ de lanzamiento montado sobre sus soportes. . . . .	39
5.4. Estanque de gas. . . . .	40
5.5. Alineaci $\acute{o}$ n de las barras mediante puntero l $\acute{a}$ ser. . . . .	41
5.6. Adhesi $\acute{o}$ n del <i>strain gage</i> a la superficie de la barra. . . . .	42
5.7. Verificaci $\acute{o}$ n de la resistencia del <i>strain gage</i> . . . . .	42
5.8. Configuraciones de soldadura de cables utilizadas. . . . .	43
5.9. <i>Coating</i> del <i>strain gage</i> . . . . .	43
5.10. Diagrama de bloques de circuito de medici $\acute{o}$ n de onda implementado. . . . .	44
5.11. Diagrama de entradas y salidas para los circuitos de medici $\acute{o}$ n. . . . .	45
5.12. Interior del sistema de medici $\acute{o}$ n de onda. . . . .	45
6.1. Largo efectivo del ca $\acute{o}$ ñ. . . . .	47
6.2. Comparativa de curvas velocidad-presi $\acute{o}$ n del <i>striker</i> . . . . .	48
6.3. Probetas 1, 2, 3 y 4 luego del ensayo, comparadas con una probeta no ensayada (0). . . . .	49
6.4. Probetas 5, 6 y 7 luego de ser ensayadas, comparadas con una probeta no ensayada (0). . . . .	49
6.5. Probetas 8, 9 y 10 luego de ser ensayadas, comparadas con una probeta no ensayada (0). . . . .	50
6.6. Se $\acute{n}$ al registrada en barras incidente y de transmisi $\acute{o}$ n para probeta 8. . . . .	50
6.7. Se $\acute{n}$ al registrada en barras incidente y de transmisi $\acute{o}$ n para probeta 9. . . . .	50
6.8. Se $\acute{n}$ al registrada en barras incidente y de transmisi $\acute{o}$ n para probeta 10. . . . .	51
6.9. Curvas esfuerzo-deformaci $\acute{o}$ n real de probetas 8, 9 y 10 con filtro num $\acute{e}$ rico de 30 [kHz]. . . . .	51
6.10. Curvas esfuerzo real en el tiempo de probetas 8, 9 y 10 con filtro num $\acute{e}$ rico de 30 [kHz]. . . . .	52
6.11. Curvas de tasa de deformaci $\acute{o}$ n real en el tiempo de probetas 8, 9 y 10 con filtro num $\acute{e}$ rico de 30 [kHz]. . . . .	52

6.12. Curvas de deformación real en el tiempo de probetas 8, 9 y 10 con filtro numérico de 30 [kHz]. . . . .	53
6.13. Rango plástico analítico del aluminio AA1100-H14 determinado con los parámetros de Johnson-Cook. . . . .	54
8.1. Configuración de 3 cables para <i>strain gages</i> puente de Wheatstone. . . . .	58
C.1. Soporte de barra incidente montado en el equipo. . . . .	76
C.2. Cronógrafo balístico X3200/E9800 montado sobre el cañón de lanzamiento. . . . .	76
C.3. Probetas de aluminio analizadas. . . . .	77
C.4. Desprendimiento de cables soldados en configuración sin liberación de tensión. . . . .	77
C.5. Trampa de momentum con barra impactada sobre plastilina. . . . .	78
C.6. <i>Striker</i> de acero SAE 1020 con bujes de teflón. . . . .	78
C.7. Medición de masa del <i>striker</i> . . . . .	79
C.8. Montaje del <i>strain gage</i> . . . . .	80
C.10. Montaje de <i>strain gages</i> (continuación). . . . .	81
D.1. Señal de onda de probeta 1 con falla de <i>strain gage</i> en barra de transmisión. . . . .	82
D.2. Señal de onda de probeta 2 con falla de <i>strain gage</i> en barra de transmisión. . . . .	82
D.3. Señal de onda de probeta 3 con falla de <i>strain gage</i> en barra de transmisión. . . . .	83
D.4. Señal de onda de probeta 4 con falla de <i>strain gage</i> en barra incidente. . . . .	83
D.5. Señal de onda de probeta 5. . . . .	83
D.6. Señal de onda de probeta 6. . . . .	84
D.7. Señal de onda de probeta 7 con falla de <i>strain gage</i> en barra incidente. . . . .	84
D.8. Creación de espacio de trabajo en software SURE-Pulse. . . . .	84
D.9. Creación de nuevo <i>strain gage</i> en software SURE-Pulse. . . . .	85
D.10. Creación de nueva muestra en software SURE-Pulse. . . . .	85
D.11. Recorte de datos de señal en barra incidente en software SURE-Pulse. . . . .	86

# Introducción

Requerimientos más específicos y una comprensión superior del comportamiento de materiales, se han tornado importantes en el desarrollo de maquinaria para la industria chilena. Un claro ejemplo de esto se puede observar en el revestimiento de molinos para la minería, en donde los tiempos de reparación o reposición generan costes elevados en la producción. Es por esto que se hace necesaria la implementación de nuevas tecnologías y métodos de análisis, de manera de apoyar y mejorar la selección de materiales en equipos para los diversos rubros del país. Uno de los potenciales factores a mejorar, considera el hecho de que la selección de materiales se suele realizar en base al comportamiento estático de los mismos. Existen métodos tradicionales para el análisis del comportamiento mecánico de materiales, como lo es el péndulo de Charpy, los cuales consideran tasas de deformación más altas. Sin embargo, éstos no logran registrar una curva de esfuerzo-deformación completa.

La barra de compresión de Hopkinson (Kolsky), es uno de los pocos métodos existentes que buscan registrar una curva de esfuerzo-deformación completa, considerando diferentes velocidades de deformación. Este equipo se compone primeramente por 2 barras alineadas, una barra incidente y una barra de transmisión, las cuales pueden deslizar libremente. Entre ambas barras se sujeta una muestra del material a analizar, mientras una tercera barra de menor longitud, conocida como barra de impacto, hace la función de proyectil, golpeando a la barra incidente y logrando una compresión a alta velocidad de la muestra. Para alcanzar el impulso de la barra de impacto es necesario un sistema de lanzamiento. Este último suele componerse de un cañón de gas comprimido. Además, mediante el uso de extensómetros ubicados en las barras incidentes y de transmisión, es posible registrar las ondas de tensión, para luego traducirlas en una curva de esfuerzo-deformación.

El en presente informe se detalla el diseño, construcción y evaluación de una barra de compresión de Hopkinson para materiales dúctiles.

# Objetivos

## Objetivo general

Diseñar y construir una barra de compresión de Hopkinson capaz de caracterizar los parámetros de Johnson-Cook para materiales metálicos.

## Objetivos específicos

1. Establecer los parámetros de diseño, en base a los datos bibliográficos.
2. Evaluar las dimensiones del equipo y los rangos de operación.
3. Diseñar y seleccionar los componentes según el rango de operación.
4. Construir el y ensamblar el equipo.
5. Implementar el sistema de adquisición de datos.
6. Evaluar el desempeño del equipo comparando resultados con valores bibliográficos.

## Alcances

- Los *strain gages* a utilizar fueron comprados anteriormente, de modo que el presente trabajo no incluye la adquisición o implementación de otra configuración de *strain gage*.
- El sistema de adquisición de datos a diseñar se determinará como finalizado una vez sea posible registrar mediciones. Se excluye la realización de cualquier análisis de sensibilidad.
- La instalación del equipo en su ubicación final se acordará posterior a la entrega de este trabajo.
- Cualquier tipo de análisis térmico es excluido para este trabajo.
- Se excluye cualquier variación en la configuración de las barras.

# Capítulo 1

## Antecedentes

### 1.1. Comportamiento mecánico de los materiales a altas tasas de deformación

La tasa de deformación (*strain rate* en inglés) es una magnitud que mide el cambio de deformación con respecto al tiempo. Se ha observado ampliamente la relación que existe entre la tasa de deformación y las propiedades mecánicas de los materiales. En particular, para metales y aleaciones, la tasa de deformación se describe desde un punto de vista de la mecánica de la dislocación, en donde el movimiento de estos defectos en la red cristalina se traduce en diversos comportamientos mecánicos, dependientes del tipo de celda cristalina presente en el material estudiado. Un ejemplo interesante a esto, es la influencia opuesta observada para ductilidad en el punto de máxima tracción, la cual disminuye con el *strain rate* en el caso de metales con celdas del tipo cúbico centrado en el cuerpo (BCC por sus siglas en inglés) y aumenta para los metales con celdas cubicas centradas en las caras (FCC por sus siglas en inglés).[1]

La variación en la resistencia del material con la tasa de deformación aplicada es una consideración importante en el diseño o selección de materiales a utilizar en estructuras sometidas a cargas repentinas. Se ha observado que para muchos materiales, el esfuerzo aumenta rápidamente en consideración del *strain rate* para una determinada carga aplicada instantáneamente. La importancia física de los eventos en relación con el comportamiento de la tasa de deformación de los metales se muestra en la figura 1.1[2], que también muestra la diferencia entre el tipo de carga (tensión o compresión) y la tasa de deformación.[2]

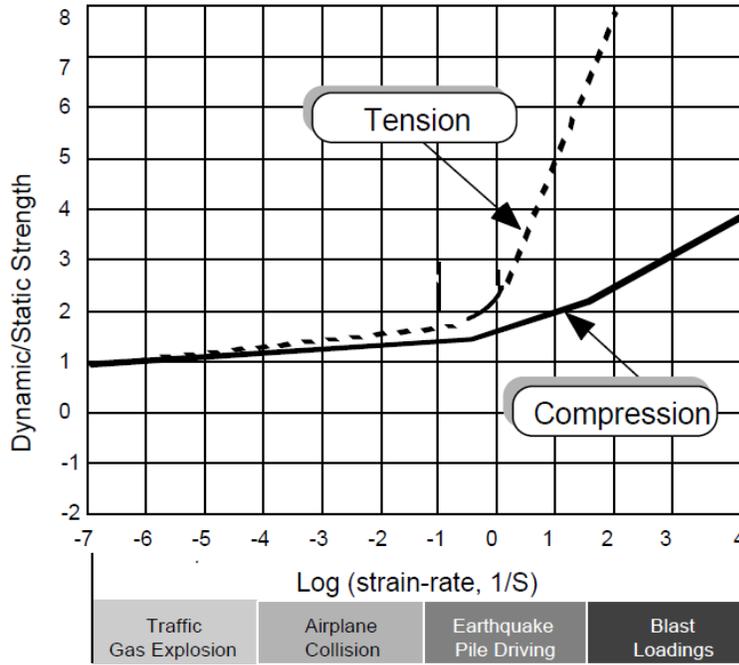


Figura 1.1: Esfuerzo versus tasa de deformación. La importancia física de los eventos relacionados con el comportamiento de la tasa en metales.

Los aspectos de las pruebas dinámicas relacionados con los tiempos de carga característicos y los rangos de strain rate, han sido descritas por Lindholm (1971) y se muestran en la figura 1.2 [2]. El diagrama muestra el método de carga, el régimen de velocidad de deformación y la dinámica importante los sucesos debían considerarse para realizar pruebas en el régimen especificado. [2]

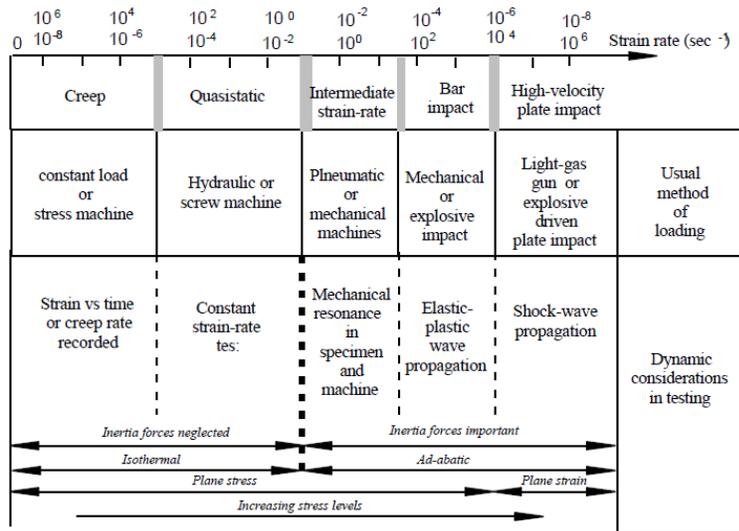


Figura 1.2: Aspectos dinámicos de ensayos mecánicos.

### 1.1.1. Modelo de Plasticidad de Johnson-Cook

El modelo de Johnson-Cook fue propuesto para representar el efecto de la deformación, tasa de deformación y temperatura en una onda de esfuerzo en materiales metálicos. La ecuación de Johnson-Cook se muestra en la ecuación 1.1, en donde  $\varepsilon$  corresponde a la deformación plástica equivalente,  $\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$  es la tasa de deformación adimensional para  $\dot{\varepsilon}_0 = 1/s$ , mientras que  $T_r$  y  $T_m$  son la temperatura ambiente y la temperatura de fusión respectivamente.[3]

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \left[ 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left[ 1 - \frac{T - T_r}{T - T_m} \right]^m \quad (1.1)$$

Las cinco constantes son representadas con  $A$ ,  $B$ ,  $n$ ,  $C$  y  $m$ . La primera sección de la ecuación entrega el esfuerzo como una función de la deformación para  $\dot{\varepsilon}_0 = 1/s$  y  $T = T_r$ . Las expresiones central y final de la ecuación, representan el efecto de la tasa de deformación y la temperatura, respectivamente.

Este modelo es el más utilizado debido a su simplicidad. Sin embargo, presenta algunos inconvenientes para representar las características de endurecimiento para todos los tipos de materiales. Esta expresión no logra representar un límite elástico inicial preciso a diversas velocidades de deformación, a causa del cambio de la velocidad de deformación en materiales metálicos. Como resultado de la expresión lineal del endurecimiento de la velocidad de deformación, se predice una relación lineal del límite elástico inicial, con el cambio del logaritmo de la tasa de deformación.

## 1.2. Reseña histórica

La barra de compresión de Hopkinson toma su nombre en memoria a John Hopkinson y a su hijo Bertram Hopkinson, quienes en el año 1872 realizaron un experimento de tracción de un cable de acero sometido a una carga en caída, como se muestra en la figura 1.3. En 1914, Bertram Hopkinson inventó un ensayo de compresión dedicado a medir la presión producida por una carga explosiva, utilizando lapiz y papel para registrar los movimientos de las barras.[4]

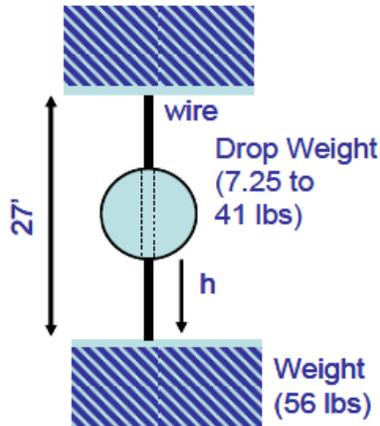


Figura 1.3: Experimento de John Hopkinson.

EN el año 1948, el autor Davis ideó un estudio crítico para el desarrollo de esta técnica, utilizando micrófonos de placas paralelas y de condensador, con el propósito de medir los movimientos axiales y radiales de las barras sometidas al esfuerzo de una carga explosiva (figura 1.4). Estas mediciones fueron mucho más precisas que las del Hopkinson. En el mismo año, Davis argumentó sobre la dispersión de las ondas de esfuerzo cuando se propagan sobre una barra larga. [4]

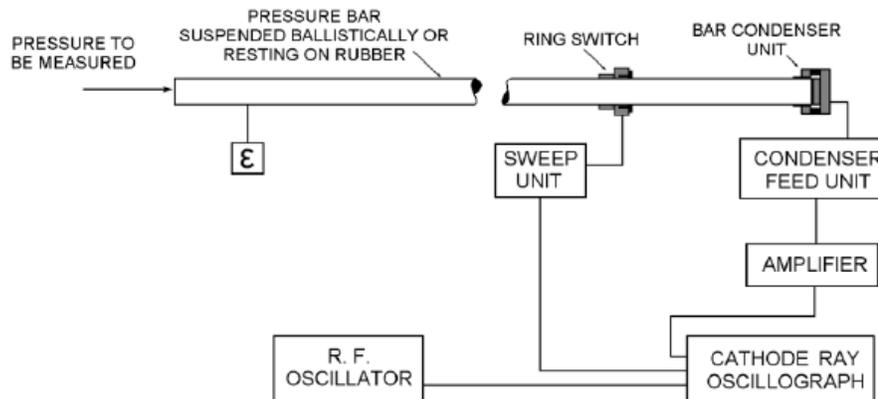


Figura 1.4: Experimento original de Davis.

En el año 1949, Herbert Kolsky logra medir por primera vez la respuesta de esfuerzo-deformación de materiales bajo una carga de impacto. Su experimento se basó en la utilización de dos barras, las cuales sujetaban una muestra entre ellas, como de puede observar en la figura 1.5. En su publicación realizada en 1949, Kolsky detalla el método para calcular las curvas de esfuerzo-deformación, utilizando señales obtenidas de un micrófono condensador. [4]

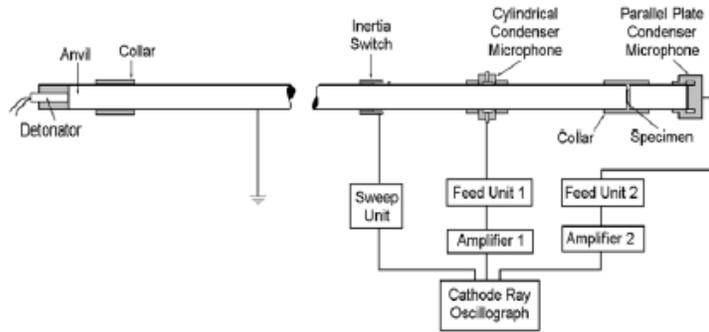


Figura 1.5: Experimento original de Kolsky.

En 1949, Krafft adaptó la técnica de Kolsky, mediante el uso de extensómetros, lo que se convertiría en el método estándar utilizado en la actualidad. Además, Krafft añade un proyectil lanzado con un cañón (accionado por pólvora), buscando una mayor homogeneidad de resultados al repetir el experimento.[4]

### 1.3. Descripción de la barra de compresión de Hopkinson (Kolsky)

Una barra de compresión de Hopkinson se suele componer de tres subsistemas: El sistema de carga, el sistema de barras y el sistema de adquisición de datos (figura 1.6).

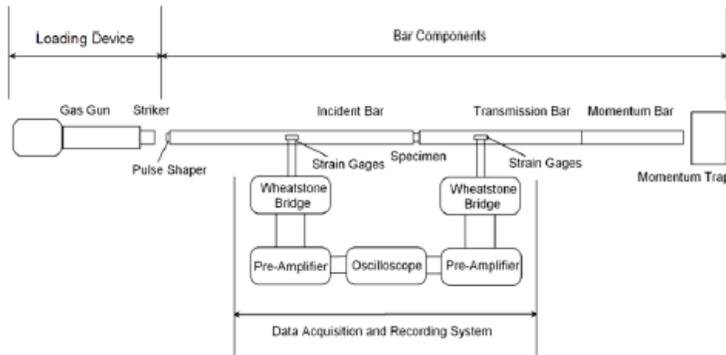


Figura 1.6: Esquema general de barra de compresión de Hopkinson actual.

#### 1.3.1. Sistema de lanzamiento

El sistema de lanzamiento actual se compone principalmente de un estanque destinado a llenarse con gas a alta presión y un cañón, encargado de direccionar y acelerar un proyectil, el cual debe presentar la menor fricción posible con el proyectil. Con el uso de sistemas de lanzamiento neumáticos se ha logrado disminuir el riesgo potencial existente al utilizar cargas explosivas accionadas por pólvora, además de lograr una mayor homogeneidad en los resultados. Entre el estanque y el cañón se ubica una válvula encargada de liberar el gas a

alta presión. Esta última suele ser activada por un actuador neumático, con el propósito de obtener la mayor eficiencia en la liberación del gas.

Además, dentro de este sistema se suele incluir un equipo encargado de la medición de velocidad justo antes del impacto.

### **1.3.2. Sistema de barras**

El equipo suele utilizar una barra incidente y una barra de transmisión, además del proyectil. Normalmente, todas las barras son del mismo material y mantienen el mismo diámetro, aunque existe una gran variedad de diseños y configuraciones. El material de las barras debe garantizar la no existencia de fluencia a las velocidades de impacto, evitando influir en el análisis. Esto último depende principalmente del tipo de material que se desea analizar.

Para garantizar la propagación unidireccional de la onda de propagación, es necesario utilizar soportes que faciliten el deslizamiento y disminuyan la fricción.

La muestra a analizar se ubica entre las barras incidente y de transmisión, y esta debe estar alineada con el eje central del sistema de barras.

### **1.3.3. Sistema de adquisición**

El uso de extensómetros se ha tornado una técnica estándar en los experimentos de compresión de la barra de Hopkinson. Se suelen utilizar dos extensómetros ubicados de manera simétrica en las barras. Las señales de estos aparatos se condicionan mediante el uso de puentes de Wheatstone. Debido a que las señales registradas son de baja amplitud, es necesario utilizar un amplificador de señal. Finalmente, se utiliza un equipo para registrar los datos procesados, ya sea un osciloscopio, o bien una tarjeta de adquisición de alta velocidad.

### **1.3.4. Muestras**

La geometría de la muestra es relevante para el análisis. Es de suma importancia tener muestras cilíndricas cuyo diámetro no supere el diámetro de las barras. Además, se debe tener en cuenta que el largo de la muestra puede afectar en la posición de las barras con respecto a sus apoyos, por lo que es preferible establecer un largo de muestra y luego fijar la posición de los apoyos.

## **1.4. Fundamentos de la barra de compresión de Hopkinson**

En las barras de compresión de Hopkinson con de proyectil, la onda de esfuerzo es representada en un gráfico posición-tiempo (figura 1.7). La onda de tensión se transmite a la barra incidente en forma de onda de descarga. De manera semejante a la onda de compresión,

parte de la onda de descarga es reflejada hacia atrás y el resto se transmite a la barra de transmisión. La duración de la carga  $T$  se determina en función del largo del proyectil ( $L$ ).[4]

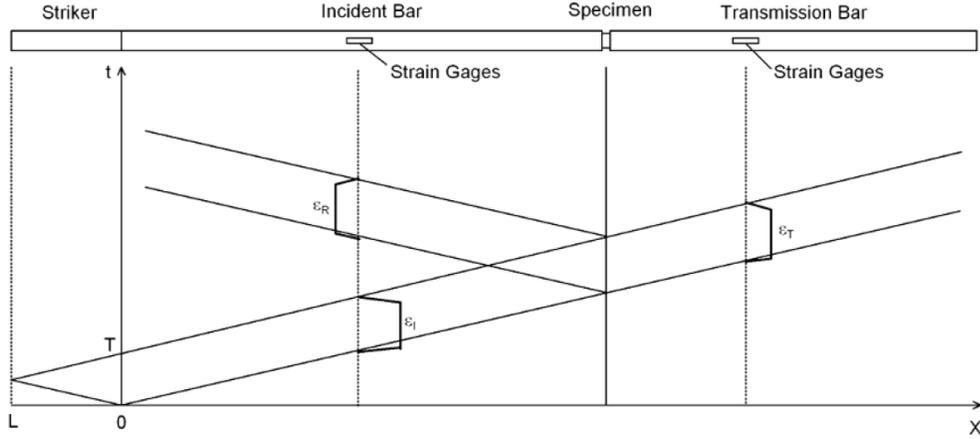


Figura 1.7: Diámetro de propagación de una onda de esfuerzo en una barra de compresión de Hopkinson.

El primer parámetro seleccionado corresponde al material a utilizar en el sistema de barras, del cual se extrae el valor de densidad ( $\rho_B$ ) y la velocidad de propagación de sonido en el material ( $C_B$ ). Este último se determina de la definición de la velocidad de onda unidimensional para vibraciones libres, como se muestra en la ecuación 1.2. En ésta,  $E_B$  corresponde al módulo de elasticidad, también conocido como módulo de Young.

$$C_B = \sqrt{\frac{E_B}{\rho_B}} \quad (1.2)$$

En el caso en que el proyectil mantiene el mismo diámetro y material de las barras incidente y de transmisión, la amplitud del esfuerzo en la barra incidente ( $\sigma_I$ ) se determina mediante la ecuación 1.3, en donde  $v_{st}$  es la velocidad del proyectil justo antes del impacto.

$$\sigma_I = \frac{1}{2} \rho_B C_B v_{st} \quad (1.3)$$

Esta ecuación también puede ser escrita según la deformación ( $\varepsilon_I$ ) según como se muestra en la ecuación 1.4. En la figura 1.8, se esquematiza la zona de muestreo de la SHPB, donde se observan los pulsos a registrar por los extensómetros. La deformación  $\varepsilon_I$  sirve para calibrar el equipo en primera instancia. La figura 1.9 muestra una representación de la forma de la señal esperada a registrar.

$$\varepsilon_I = \frac{1}{2} \frac{v_{st}}{C_B} \quad (1.4)$$

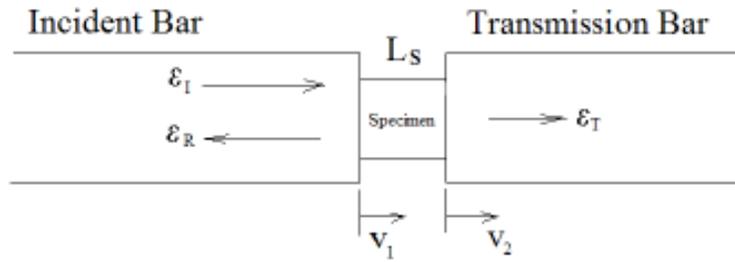


Figura 1.8: Zona de muestreo en SHPB.

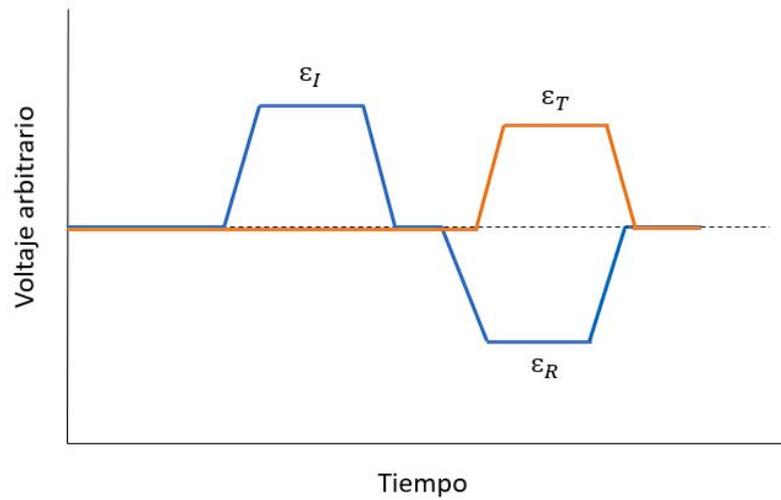


Figura 1.9: Representación de señal típica en SHPB.

La condición inicial de barra incidente se muestra en la figura 1.10, en donde se destaca un elemento diferencial del componente. El instante siguiente al impacto del proyectil, el elemento diferencial es sometido a compresión, debido a las fuerzas  $F_1$  y  $F_2$ . Estas fuerzas pueden definirse en función del esfuerzo que actúa en cada cara del elemento, según como se muestra en la ecuación 1.5, en donde  $A_0$  corresponde al área de la sección transversal de la barra incidente. [5]

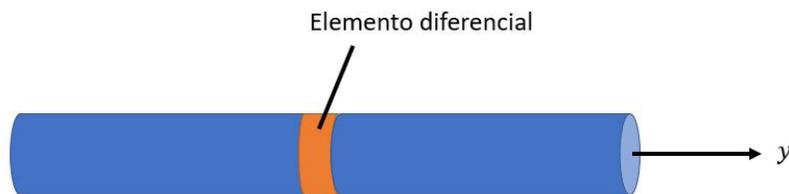


Figura 1.10: Elemento diferencial en la barra incidente antes del impacto.

$$\sigma_1 = \frac{F_1}{A_0} \quad y \quad \sigma_2 = \frac{F_2}{A_0} \quad (1.5)$$

El esfuerzo en el elemento diferencial se puede relacionar con la ley de Hook (ecuación 1.6), en donde  $U$  corresponde al desplazamiento del elemento, y por ende,  $\frac{dU}{dy}$  es la velocidad en la dirección  $y$ .

$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{dU}{dy} \quad (1.6)$$

Al combinar las ecuaciones 1.5 y 1.6, es posible despejar los valores  $F_1$  y  $F_2$  (ecuación 1.7).

$$F_1 = EA_0 \frac{dU_1}{dy} \quad y \quad F_2 = EA_0 \frac{dU_2}{dy} \quad (1.7)$$

Siguiendo la segunda ley de Newton, la suma de las fuerzas que actúan sobre elemento diferencial se igualan con la aceleración de la masa en el tiempo, obteniendo la ecuación 1.8.

$$EA_0 \frac{dU_1}{dy} - EA_0 \frac{dU_2}{dy} = A_0 dy \rho \frac{d^2U}{dt^2} \quad (1.8)$$

Para lograr despejar la velocidad  $\frac{dU_2}{dy}$  en función de la velocidad  $\frac{dU_1}{dy}$ , se puede utilizar una expansión de Taylor, como se muestra en la figura 1.11, con lo que el desplazamiento queda según lo descrito por la ecuación 1.9 [6]. La forma diferencial de  $U_2$  con respecto a  $y$  se muestra en la ecuación 1.10.

$$U_2 = U_1 + \frac{dU_1}{dy} dy \quad (1.9)$$

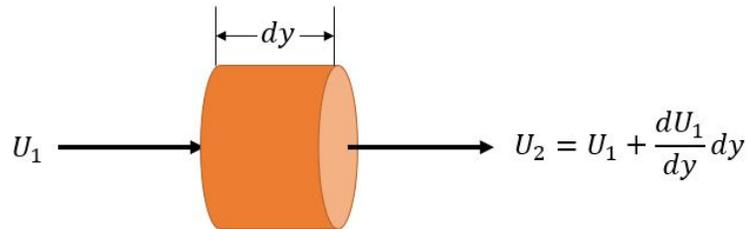


Figura 1.11: Expansión de serie de Taylor para la aproximación de los desplazamientos en el elemento diferencial.

$$\frac{dU_2}{dy} = \frac{dU_1}{dy} + \frac{d^2U_1}{dy^2}dy \quad (1.10)$$

La ecuación 1.2 puede reescribirse al despejar  $\rho_B$  y reemplazar en la ecuación 1.8, con lo que se obtiene la ecuación 1.11.

$$E_B A_0 \frac{dU_1}{dy} - E_B A_0 \frac{dU_2}{dy} = A_0 dy \frac{E_B}{C_B^2} \frac{d^2U}{dt^2} \quad (1.11)$$

Sustituyendo la ecuación 1.10 en la ecuación 1.11, se obtiene la ecuación para propagación de una onda unidimensional (ecuación 1.12).

$$C_B^2 \frac{d^2U_1}{dy^2} = \frac{d^2U}{dt^2} \quad (1.12)$$

La solución a la ecuación 1.11 para la barra incidente, libre de condiciones de borde, puede ser escrita como se muestra en la ecuación 1.13.

$$U = f(y - C_B t) + g(y + C_B t) = U_i + U_r \quad (1.13)$$

Las funciones  $f$  y  $g$  describen las ondas incidente y reflejada, mientras que  $U_i$  y  $U_r$  corresponden al desplazamiento de la onda incidente y reflejada respectivamente. Derivando los desplazamientos en la ecuación 1.13, con respecto a  $y$ , las deformaciones totales en la barra incidente ( $\varepsilon_{tbi}$ ) se representan según la ecuación 1.14.

$$\varepsilon_{tbi} = \frac{dU_i}{dy} + \frac{dU_r}{dy} = \varepsilon_i + \varepsilon_r \quad (1.14)$$

Del mismo modo, al derivar la ecuación 1.13 con respecto al tiempo, se obtiene la ecuación 1.15.

$$\dot{U}_1 = C_B(-\varepsilon_i + \varepsilon_r) \quad (1.15)$$

Diferenciando el desplazamiento en la barra de transmisión, se obtiene la ecuación 1.16, con lo que se define la ecuación 1.17, en donde  $\varepsilon_t$  corresponde a la deformación en la barra de transmisión y  $h$  es una función que describe la forma de las ondas transmitidas.

$$U_2 = h(y - C_B t) = \varepsilon_t \quad (1.16)$$

$$\dot{U}_2 = -C_B \varepsilon_t \quad (1.17)$$

La tasa de deformación ( $\dot{\varepsilon}$ ) puede ser expresada según la ecuación 1.18, en la cual  $\dot{U}_1$  y  $\dot{U}_2$  son las velocidades en la interfaz entre la barra incidente-probeta y probeta-barra de transmisión respectivamente, mientras que  $L_p$  es el largo instantáneo de la probeta [7].

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_2}{L_p} \quad (1.18)$$

Al substituir las definiciones de  $\dot{U}_1$  y  $\dot{U}_2$  en la ecuación 1.18, se obtiene la ecuación 1.19, la cual, al aplicar el principio de conservación de momentum al proyectil, barra incidente, probeta y barra de transmisión, el *strain rate* en la probeta se representa, de manera simplificada, según la ecuación 1.20.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{C_B(-\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t)}{L_p} \quad (1.19)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_{st}}{L_p} \quad (1.20)$$

Debido a que la probeta se supone como un sólido incompresible, el volumen justo antes del impacto con el proyectil puede relacionarse con el volumen luego del impacto como se muestra en la ecuación 1.21, en la cual  $A_{pa}$  es la sección transversal y  $L_{pa}$  corresponde a largo de la probeta justo antes del impacto. De manera análoga,  $A_{pd}$  y  $L_{pd}$  representan las dimensiones justo después del impacto.

$$A_{pa} \cdot L_{pa} = A_{pd} \cdot L_{pd} = A_p \cdot L_p \quad (1.21)$$

El esfuerzo ingenieril en el tiempo se puede representar entonces, como la fuerza transmitida, dividida por la sección transversal de la probeta (ecuación 1.22).

$$\sigma_p(t) = \frac{A_B E_B \varepsilon_t(t)}{A_p} \quad (1.22)$$

Esto se denomina como análisis de esfuerzo de onda, debido a que solo utiliza los valores obtenidos de la onda transmitida.

## 1.5. Criterios de diseño para el sistema de lanzamiento

### 1.5.1. Cañón de lanzamiento

El cañón a utilizar debe ser tal que reduzca la pérdida de presión del sistema, es por esto que se selecciona el diámetro comercial más cercano al diámetro de las barras.

La selección del largo del cañón se hace en consideración de la velocidad del proyectil ( $v_{st}$ ), según la ecuación 1.23, en donde,  $P$  es la presión de trabajo,  $L_c$  corresponde a al largo del cañón,  $\rho_{st}$  es la densidad del proyectil,  $L_{st}$  es el largo del proyectil y  $D_c$  es el diámetro interno del cañón, que en este caso, se asume igual al diámetro del proyectil.

$$v_{st} = \left[ \frac{2P L_c / D_c}{\rho_{st} L_{st} / D_c} \right]^{1/2} \quad (1.23)$$

En la figura 1.12 se muestra el gráfico comparativo entre velocidad y presión para distintos largos de cañón.

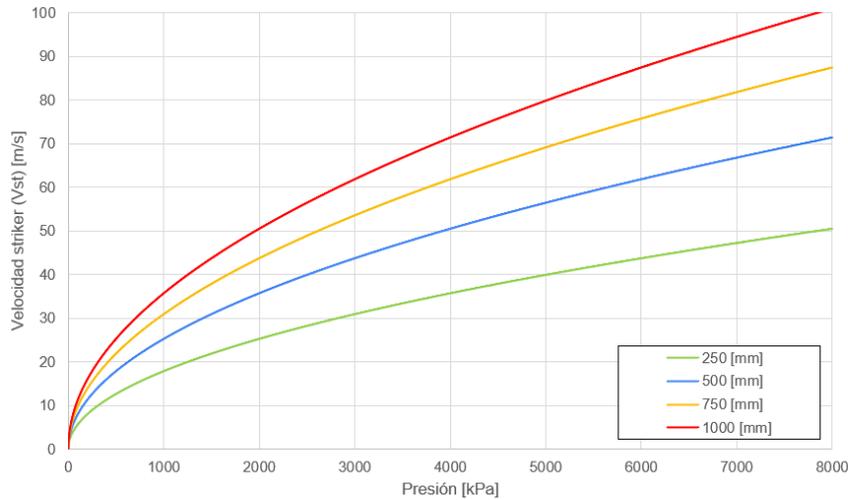


Figura 1.12: Gráfico de velocidad-presión según el largo de cañón para un proyectil de acero, diámetro 20 [mm] y largo 200 [mm].

También es necesario determinar un espesor de pared del cañón que sea seguro para la operación. Para esto se realiza el cálculo en consideración de un recipiente cerrado con casco cilíndrico, según la ecuación 1.24. [8]

$$t = \frac{PR}{SE - 0,6P} \quad (1.24)$$

En donde  $t$  corresponde al espesor de pared de un estanque con casco cilíndrico,  $P$  es la presión de diseño,  $R$  es el radio interno del cañón,  $S$  es el esfuerzo máximo del material a 6,89 [Mpa], mientras que  $E$  es la eficiencia de la soldadura.

El último factor a considerar para la construcción del cañón, es la rugosidad interna, la cual debe garantizar el libre deslizamiento del proyectil. Esta consideración permite descartar todo tipo de cañerías con costura.

## 1.5.2. Estanque de gas

Al igual que el cañón, el espesor de pared del estanque se calcula con la ecuación 1.24. Además, se calcula el largo del estanque, de manera de reducir en lo posible la pérdida de presión ( $\Delta P \%$ ). Para esto se utiliza la Ley de Boyle-Mariotte.[8][9][10]

### Ley de Boyle-Mariotte

$$P_f = P_i \frac{V_i}{V_f} \quad (1.25)$$

Debido a que la estimación de la velocidad alcanzada por el proyectil se realiza en función de la presión en el estanque, es necesario analizar la pérdida de presión, y con esto, la presión final en la salida del proyectil. La pérdida de presión (ecuación 1.26) se calcula utilizando el valor de presión de inicial o de diseño ( $P_i$ ), junto con la presión final ( $P_f$ ), obtenida de la ley de Boyle-Mariotte. Una representación de la pérdida de presión debido a la expansión del gas al abrir la válvula de salida se muestra en la figura 1.13.

### Pérdida de presión

$$\Delta P \% = 100 - \frac{P_f \cdot 100}{P_i} \quad (1.26)$$

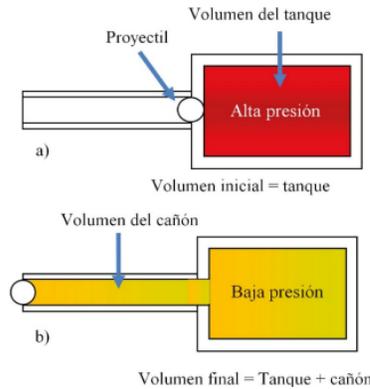


Figura 1.13: Evolución de la presión al interior del sistema de lanzamiento

## 1.6. Criterios de diseño para el sistema de barras

### 1.6.1. Material de las barras

Para la selección del material a utilizar en las barras, es necesario conocer las velocidades a las cuales se pretende realizar los ensayos. La velocidad máxima para el proyectil, está limitada por el límite de fluencia del material de la barra. Despejando de la ecuación 1.3 y reemplazando el esfuerzo por el límite de fluencia del material, se obtiene la ecuación 1.27, en donde  $v_{stmax}$  es la velocidad máxima a la que se puede lanzar el proyectil, sin sufrir deformación plástica. El parámetro  $S_{yB}$  corresponde al límite de fluencia del material, mientras que  $\rho_B$  y  $C_B$ , corresponden a la densidad del material y a la velocidad de

propagación del sonido en el material, respectivamente.

$$v_{stmax} = \frac{2S_{yB}}{\rho_B C_B} \quad (1.27)$$

### 1.6.2. Dimensiones de las barras

Para la selección del diámetro de las barras, se toma en consideración la disponibilidad comercial. Esto en conjunto con los materiales seleccionados previamente, determinan la selección final del material.

El largo de las barras fue fijado en consideración del espacio disponible de instalación del equipo. La tasa entre el largo y el diámetro ( $L/D$ ) debe ser superior a 20. [4][11]

### 1.6.3. Soporte para las barras

El sistema de soporte debe ser tal que permita sostener las barras, además de reducir en lo posible los efectos de deflexión y roce. En la figura 1.14 se muestra una configuración de dos soportes para una barra.

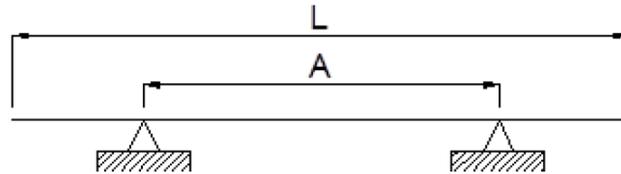


Figura 1.14: Posición de los soportes para las barras incidente y de transmisión.

La distancia  $A$  entre los soportes se determina utilizando la fórmula de Airy (ecuación 1.28), en donde  $L$  es el largo de la barra y  $n$  corresponde a la cantidad de soportes a considerar.[10]

$$A = \frac{L}{\sqrt{n^2 - 1}} \quad (1.28)$$

## 1.7. Adquisición de datos

### 1.7.1. Extensómetros (*strain gages*)

Para realizar las mediciones de deformación, se utilizan extensómetros (*strain gauge* en inglés), los cuales son sensores capaces de medir deformación, presión o carga, y se basan en el efecto piezoresistivo (propiedad que tienen ciertos materiales de cambiar el valor nominal de su resistencia cuando se les somete a ciertos esfuerzos y se deforman en dirección de los ejes mecánicos).

### 1.7.1.1. Montaje de *strain gages*

El procedimiento de montaje de los *strain gages* debe ser el apropiado para evitar alteraciones en las mediciones. Para esto se sigue el procedimiento descrito por Micro-Measurements [12], en donde se identifican los pasos para la preparación de superficie, fijación del *strain gage* y adición de una protección aislante. Además de esto, dadas las características del ensayo, corresponde analizar el uso de una configuración con libreación de tensión para los cables.[13]

### 1.7.2. Puente de Wheatstone

El puente de Wheatstone es un circuito eléctrico utilizado principalmente para medir resistencias desconocidas, mediante el equilibrio de las ramas del puente. Existen variadas configuraciones y sus usos dependen de lo que se desea muestrear. En la figura 1.15 se muestran algunas de las configuraciones más usuales. El principio de funcionamiento de este circuito consiste en la comparación del voltaje en los puntos 2 y 3 de la figura 1.15.a (mismos puntos para cada configuración), en donde, si es que las ramas del puente se encuentran equilibradas, la diferencia de voltaje será nula, por lo que al existir cualquier variación en una de las resistencias, la diferencia de voltaje será distinta de cero.

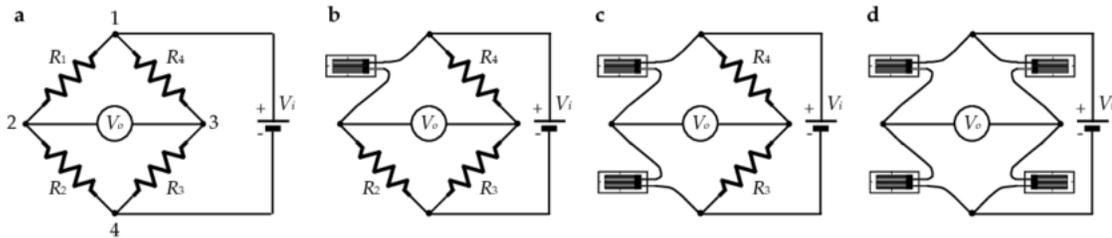


Figura 1.15: Puente de Wheatstone: a) Configuración básica, b) Cuarto de puente, c) Medio puente y d) Puente completo.

### 1.7.3. Amplificación de señal

Cuando se tienen señales cuyos voltajes originales son muy bajos, es necesario realizar una amplificación de la señal. Para esto se utilizan amplificadores operacionales (Op-Amp por sus siglas en inglés) como aquel mostrado en la figura 1.16. Un Op-Amp es un dispositivo amplificador electrónico de alta ganancia, el cual es acoplado en corriente continua y que posee dos entradas y una salida. [14]

En la figura 1.16,  $V_+$  y  $V_-$  son las entradas inversora y no inversora,  $V_{s+}$  y  $V_{s-}$  son las fuentes DC positiva y negativa, mientras que  $V_{out}$  corresponde a la salida.

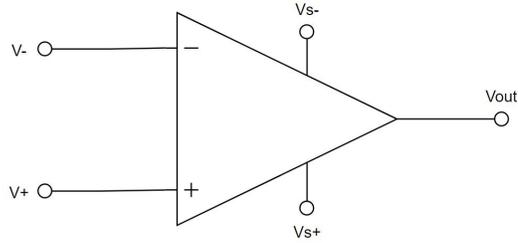


Figura 1.16: Diagrama típico de un amplificador operacional.

Existe una gran variedad de circuitos que involucran Op-Amps, y la implementación de un circuito en particular dependerá de la salida deseada.

#### 1.7.4. Frecuencia de muestreo

La selección del sistema de adquisición se realiza en función de la frecuencia de muestreo, es decir, del número de registros por segundo. El sistema de adquisición debe satisfacer el criterio de Nyquist [15], el cual establece que la señal debe ser registrada a una frecuencia que sea al menos el doble de la frecuencia máxima del componente de interés (ecuación 1.29).

$$f_{max} = \frac{1}{T} \quad (1.29)$$

En donde  $T$  corresponde al tiempo de carga  $T$  sobre las barras, el cual es fundamental para determinar la frecuencia de muestreo mínima requerida por el sistema de adquisición. El tiempo de carga se determina como se muestra en la ecuación 1.30.

$$T = \frac{\lambda}{\text{imagenes}/C_B} \quad (1.30)$$

Los parámetros  $\lambda$  y  $C_B$  corresponden a la longitud de onda y velocidad del sonido en el material, respectivamente. La longitud de onda  $\lambda$  se determina como el doble del largo del *striker*.

#### 1.7.5. Medición de velocidad

El método más utilizado para la medición de velocidad en estos equipos considera un par de sensores ubicados a una distancia conocida (1.17), los cuales registran el paso del proyectil por cada uno. Dividiendo la distancia por el tiempo se obtiene la velocidad.

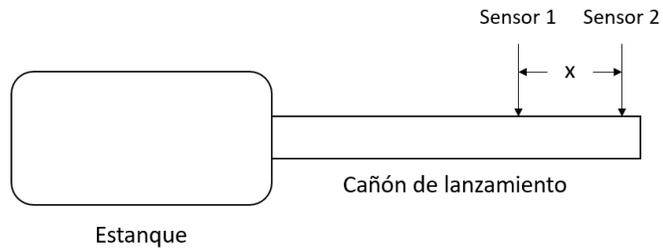


Figura 1.17: Esquema de medición de velocidad.

Los sensores utilizados suelen ser fotointerruptores, tales como fotodiodos y fototransistores, aunque también se utilizan sensores magnéticos o sensores de ultrasonido.

# Capítulo 2

## Metodología

### 2.1. General

En la figura 2.1 se muestra la metodología general a seguir en el trabajo de título. El procedimiento consiste en seleccionar los parámetros de funcionamiento del equipo, para luego pasar a las etapas de diseño. La fase diseño culmina con el montaje e instrumentación, para continuar con la etapa de calibración y, posteriormente, con la realización de ensayos experimentales.

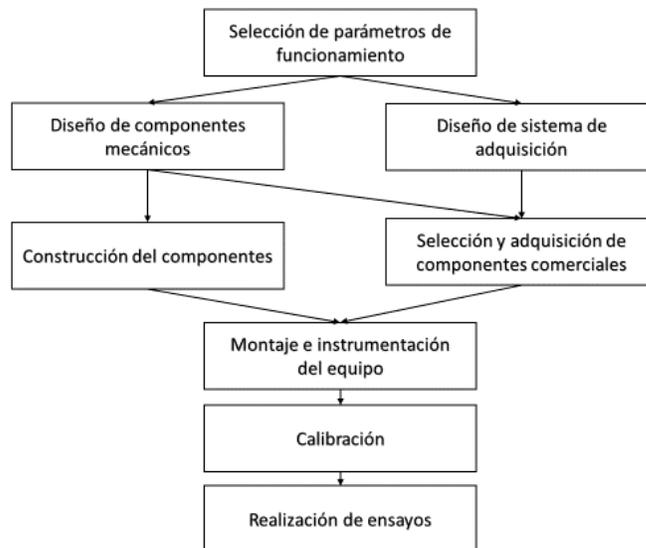


Figura 2.1: Metodología general del trabajo de título.

### 2.2. Diseño y selección de los componentes mecánicos

Para el diseño y la selección de los componentes mecánicos, se debe tener en cuenta las características físicas del ensayo, en donde, la presión dentro del sistema de lanzamiento

establece el criterio para la selección de los componentes comerciales. Por otra parte, los efectos de deflexión y pandeo deben ser verificados, de manera de asegurar que no exista influencia en el ensayo.

### 2.3. Diseño del sistema de adquisición

Dentro del proceso de diseño para el sistema de adquisición del equipo, es necesario considerar los tiempos de respuesta de los componentes a seleccionar. El procedimiento para determinar los circuitos para el equipo se realizará de manera empírica, ajustando las conexiones y componentes en pos de mejorar la visualización de la señal.

### 2.4. Montaje del equipo

El montaje del equipo contempla el armado de la estructura de soporte, instalación de los componentes y la alineación del ensayo. Esto último corresponde a la operación más sensible dentro de esta etapa, pues puede alterar los resultados de manera significativa. Para alinear el sistema, se comenzará fabricando los soportes del cañón en simultáneo, de manera de que mantengan la mayor similitud entre ellas. Luego, se monta el cañón y se ajusta la altura del estanque. Finalmente, se realiza la alineación de las barras, la cual se realiza regulando la altura y posición de los soportes. Este último procedimiento considera la utilización de un láser, y tapas montadas en los soportes de las barras, las cuales poseen una pequeña perforación para permitir el paso de la luz.

### 2.5. Parámetros de entrada

Para el diseño de la barra de compresión de Hopkinson, se determinaron algunos parámetros de entrada, seleccionados a partir de las necesidades a cumplir, la ubicación del equipo y de la disponibilidad comercial. Estos parámetros serán verificados para establecer su viabilidad. La tabla 2.1 enuncia los parámetros de entrada seleccionados.

Tabla 2.1: Parámetros de entrada para el diseño del equipo.

Parámetro de diseño	Valor	Unidad
Presión máxima de trabajo	6	[MPa]
Largo barra incidente	1200	[mm]
Largo barra de transmisión	1200	[mm]
Largo proyectil	200	[mm]
Diámetro barra incidente	20	[mm]
Diámetro barra de transmisión	20	[mm]
Diámetro proyectil	20	[mm]
Material de las barras	SAE 1020	-
Material del proyectil	SAE 1020	-

# Capítulo 3

## Diseño del equipo

La etapa de diseño resuelve en general, la manera en que se montará cada componente. En la figura 3.1 se muestra la disposición general, junto a algunas zonas de interés para los ensayos.

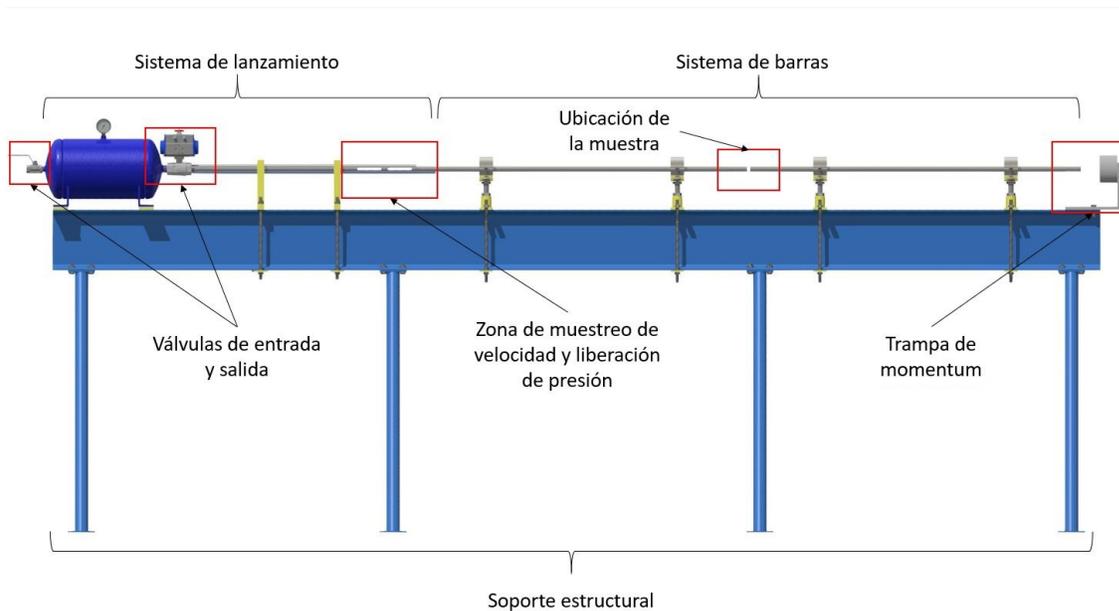


Figura 3.1: Diseño general del equipo.

### 3.1. Componentes Mecánicos

#### 3.1.1. Soporte de las barras

Los soportes de las barras cumplen la función de soportar y alinear el sistema. Cada soporte posee ajustes en las tres dimensiones, además de contar con un buje de teflón, encargado de disminuir el roce de la barra en su apoyo. Tanto el coeficiente de roce estático ( $\mu_e$ ) como el dinámico ( $\mu_d$ ) poseen un valor de 0,04. El diseño de los soportes se inspira en un modelo

propuesto por los autores Zanettin, Young y Hussain en el año 2012 [16].

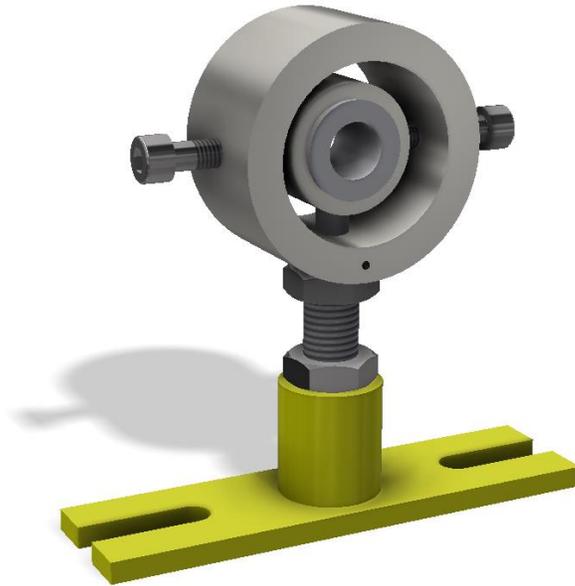


Figura 3.2: Soportes de las barras.

### 3.1.2. proyectil y barras

Por simplicidad del sistema, tanto las barras como el proyectil se fijan en un diámetro de 20 [mm]. El largo de las barras se determina en función del largo máximo para la ubicación del equipo y es por esto que se establece en 1.200 [mm]. Con esto, se tiene que la tasa  $L/D$  posee un valor de 60, superando los 20 recomendados por literatura para considerar que el pandeo es mínimo en operación.

El material de las barras corresponde al acero SAE 1020 trefilado, el cual posee un buen acabado superficial y cuyas propiedades mecánicas se muestran en la tabla 3.1. [17]

Tabla 3.1: Propiedades mecánicas acero SAE 1020.

Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de Young [GPa]	Límite de fluencia [Mpa]	Coefficiente de Poisson -	$C_B$ [m/s]
7.850	190-200	294,8	0,27-0,30	5000

Las barras incidente y de transmisión son analizadas mediante el método de elementos finitos, con el propósito de verificar posibles deflexiones que puedan alterar las mediciones. Para esto, se determina utilizar dos apoyos en cada barra, separados 692,8 [mm] entre sí y a una distancia de 253,6 [mm] de los extremos, como se muestra en la figura 3.3.

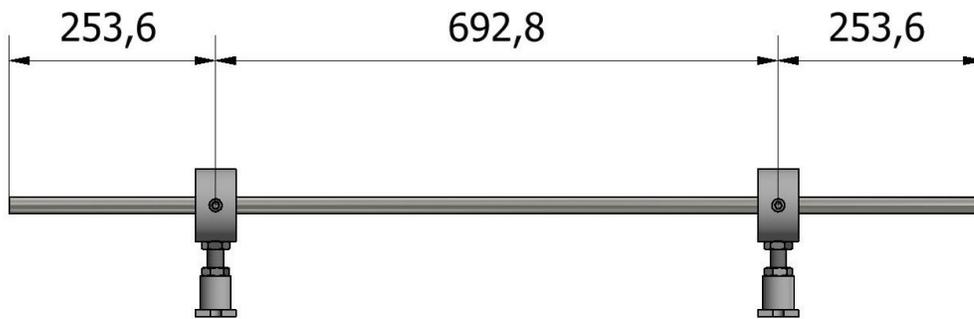


Figura 3.3: Configuración de apoyo de las barras incidente y de transmisión.

En la figura 3.4, se aprecia el resultado extraído del software Ansys Mechanical para la deflexión de las barras, en la cual se consideraron los largos de los bujes de teflón para cada apoyo involucrado. Con esto se obtiene un máximo de 0,009 [mm]. La figura 3.5 corresponde al análisis de esfuerzos equivalentes de von-Mises en la barra, por causa de la gravedad, en donde se observa un máximo de 0,14 [MPa].

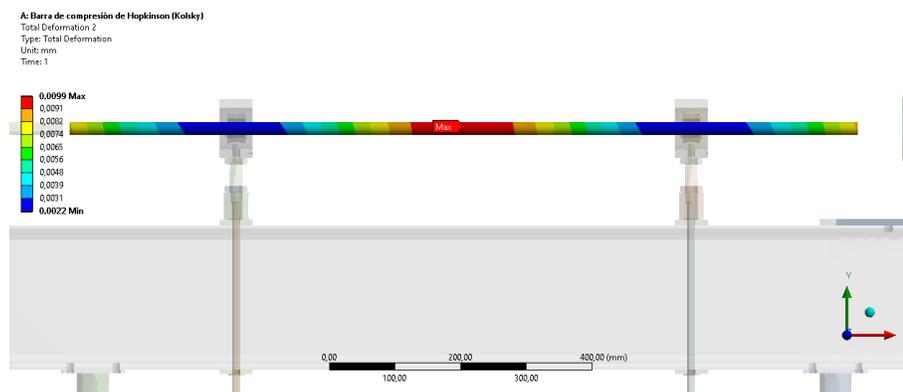


Figura 3.4: Análisis FEM de deflexión para las barras incidente y de transmisión.

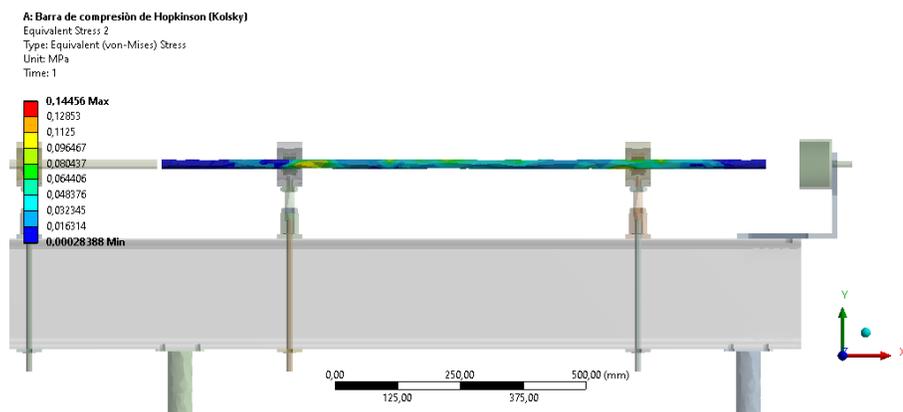


Figura 3.5: Análisis FEM de esfuerzos para las barras incidente y de transmisión.

El proyectil a utilizar posee un largo de 200 [mm] y utiliza dos bujes de teflón para disminuir la fricción entre el proyectil y el cañón de aire, como se observa en la figura 3.6, en donde también se logran apreciar los seguros seager DIN 471, encargados de fijar la posición del teflón [18]. La posición de los bujes se calcula bajo el criterio de Airy, con lo que se obtiene una separación de 115,5 [mm] entre centros y a una distancia de 42,3 [mm] desde los centros hasta el extremo más cercano.



Figura 3.6: Proyectil

En la tabla 3.2 se muestra un resumen de las dimensiones de las barras, proyectil y probetas para el equipo.

Tabla 3.2: Resumen de dimensiones de las barras y probeta.

	L [mm]	D [mm]
Barra incidente	1200	20
Barra transmisión	1200	20
Striker	200	20
Probeta	10	10

### 3.1.3. Cañón de aire comprimido

Considerando el diámetro de 20 [mm] del proyectil se selecciona un diámetro de 25[mm] para el tubo del cañón, el cual entrega una holgura suficiente para la adición de bujes de teflón al proyectil. El material utilizado corresponde a SAE 1045, para el cual se implementa un valor conservador de esfuerzo máximo a 6,89 [MPa] para el cálculo, obteniendo 88,25 [MPa] como presión máxima de trabajo [8].

Considerando una presión de diseño de 6,89 [MPa] y un radio interno de 12,4 [mm], se obtiene un espesor de pared mínimo de 1,01 [mm] el cual es inferior a los 5 [mm] implementados.

El interior del tubo posee un acabado superficial pulido, mediante un proceso de bruñido,

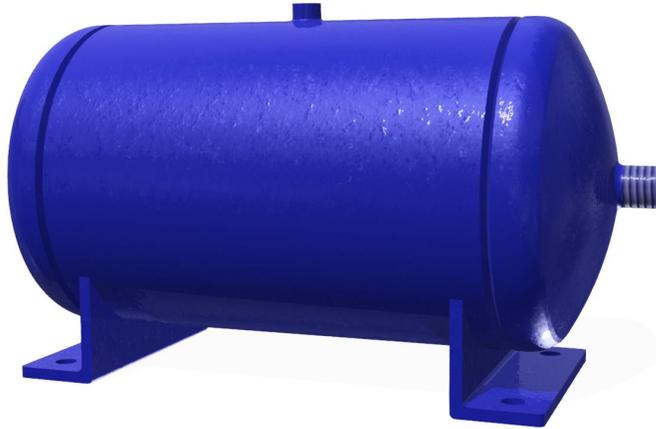


Figura 3.8: Estanque de aire comprimido.

con el propósito de disminuir la fricción con el proyectil.

En la figura 3.7 se aprecia el cañón diseñado, en donde se identifica un hilo de 25,4 [mm] para la conexión con el estanque. Además, en la zona frontal se incluye un reposo de proyectil y dos ranuras para la salida de presión. Las ranuras también se destinan a la medición de la velocidad del proyectil.



Figura 3.7: Cañón de lanzamiento.

#### 3.1.4. Estanque de aire comprimido

El estanque encargado de almacenar el gas para la realización de los ensayos (figura 3.8) se manufactura utilizando una tubería y tapas de diámetro 203,2 [mm] SCH40. El material utilizado en las tapas y cilindro corresponde al ASTM A-234 WPB, el cual posee un valor de esfuerzo máximo a 6,89 [MPa] de presión estática, de 95 [MPa][8].

El estanque también considera una conexión de 12,7 [mm] para la entrada de gas y una conexión de 25,4 [mm] para la salida de gas, junto con una abertura de 6,35 [mm] en la zona superior, destinada a la instalación de un manómetro.

#### 3.1.5. Trampa de momentum

Para la trampa de momentum se propone un diseño sencillo a base de un bloque de plastilina para moldear, con la función se absorber la energía del impacto, como se ha observado

en la literatura [19][20]. El bloque de plastilina se monta al interior de una copa construida a partir de una tubería tapada por uno de sus extremos. La copa se monta sobre una escuadra con rieles para el ajuste horizontal y un riel vertical para la regulación de altura, como se observa en la figura 3.9.



Figura 3.9: Trampa de momentum.

En las figuras 3.10 y 3.11 se muestran los resultados del análisis FEM para la trampa de momentum, sometida a una fuerza estática, calculada como la masa del proyectil por la aceleración alcanzada en un cañón de 1000 [mm] para una velocidad final de 100 [m/s], que corresponde a la velocidad máxima para la presión de diseño, mostrada anteriormente en la figura 1.12. El cálculo de la aceleración de muestra en el apéndice A.6. Con esto se obtiene un esfuerzo máximo de 114,5 [MPa] y un factor de seguridad mayor a 2.

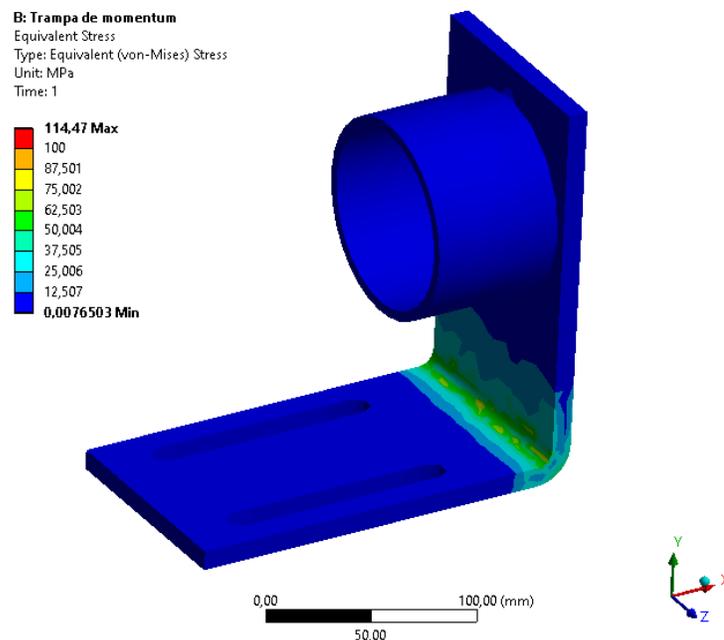


Figura 3.10: Trampa de momentum.

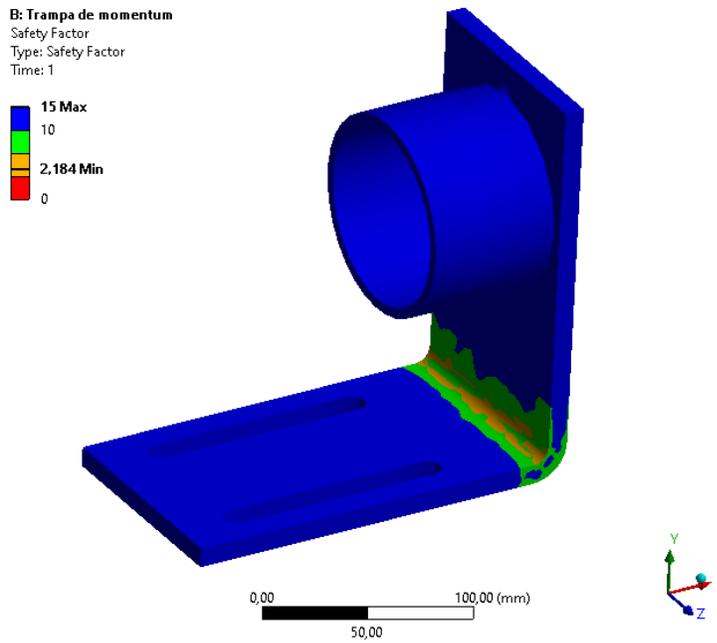


Figura 3.11: Trampa de momentum.

### 3.1.6. Estructura de soporte

La estructura del equipo debe asegurar una superficie libre de deflexiones en la operación. Es por esto que se decide montar una viga IPN de alma 120 [mm], con un largo de 3.850 [mm] y soportado por cuatro apoyos, los cuales se encargan de elevar el sistema, haciéndolo más cómodo para la realización de ensayos. La altura desde el piso hasta la cara superior de la viga es de 1.170 [mm]. En la figura 3.12 se muestra el ensamblaje de la viga, donde se aprecian los cuatro soportes, los cuales son ubicados a una distancia de 1.635 [mm] entre sí.



Figura 3.12: Marco de soporte del equipo.

El esfuerzo equivalente y la deflexión es calculada mediante el software Ansys. El esfuerzo equivalente resultante se determina en 0,4 MPa (figura 3.13, mientras que la deflexión máxima alcanza un valor de 0,0029 [mm] como se observa en la figura 3.14, la cual se considera despreciable para el estudio.

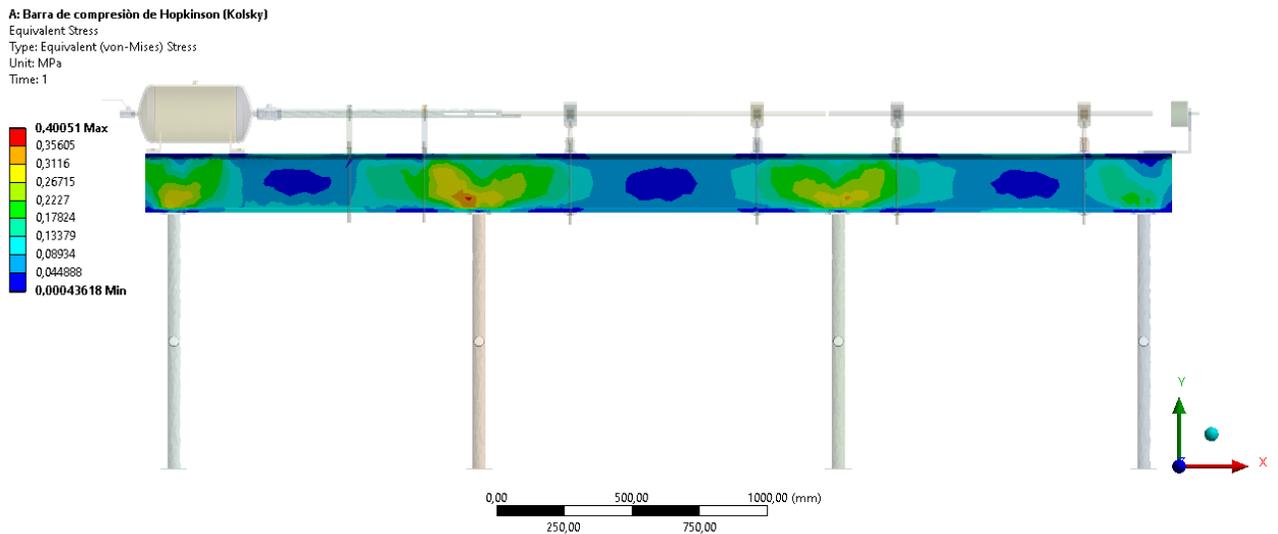


Figura 3.13: Análisis FEM de viga, esfuerzos equivalentes de von Mises.

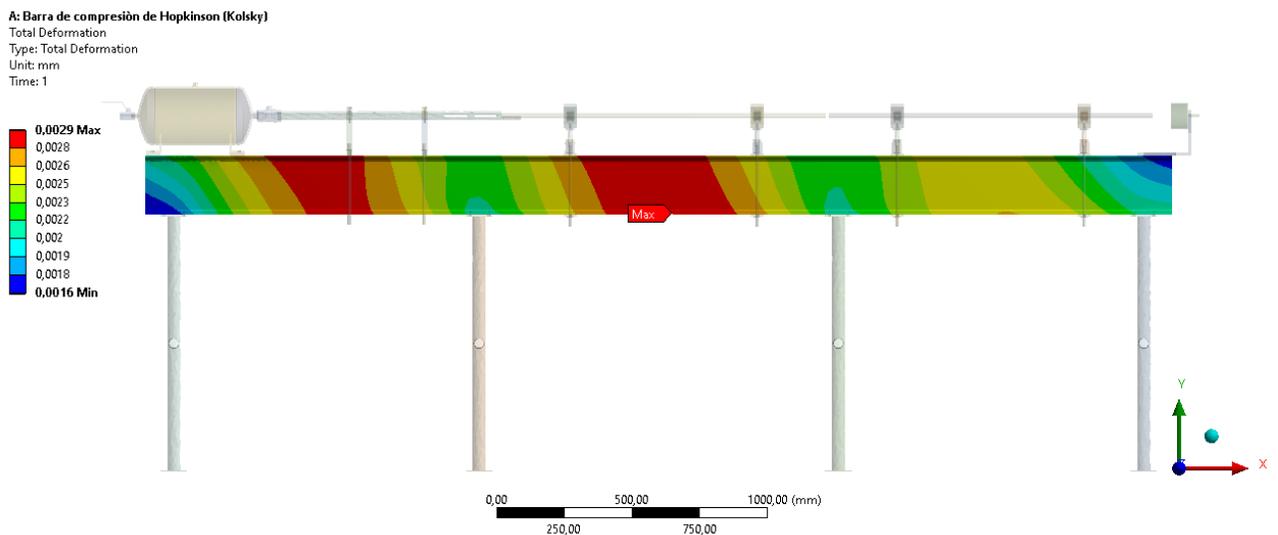


Figura 3.14: Análisis FEM de viga, deformación total.

## 3.2. Componentes Electrónicos

### 3.2.1. Cronógrafo balístico

Para la medición de velocidad se determina la utilización de un cronógrafo balístico. Este instrumento es utilizado para la medición de velocidad de proyectiles, el cual funciona mediante dos interruptores ópticos separados por una distancia conocida. El cálculo de velocidad se realiza con la diferencia de tiempo entre que el proyectil interrumpe el primer sensor, hasta el segundo sensor, dividiendo esta medida por la distancia entre sensores.

En la figura 3.15 se observa una representación de un proyectil cruzando dos pórticos, las cuales corresponden a los sensores ópticos, mientras  $X$  es la distancia entre ellos.

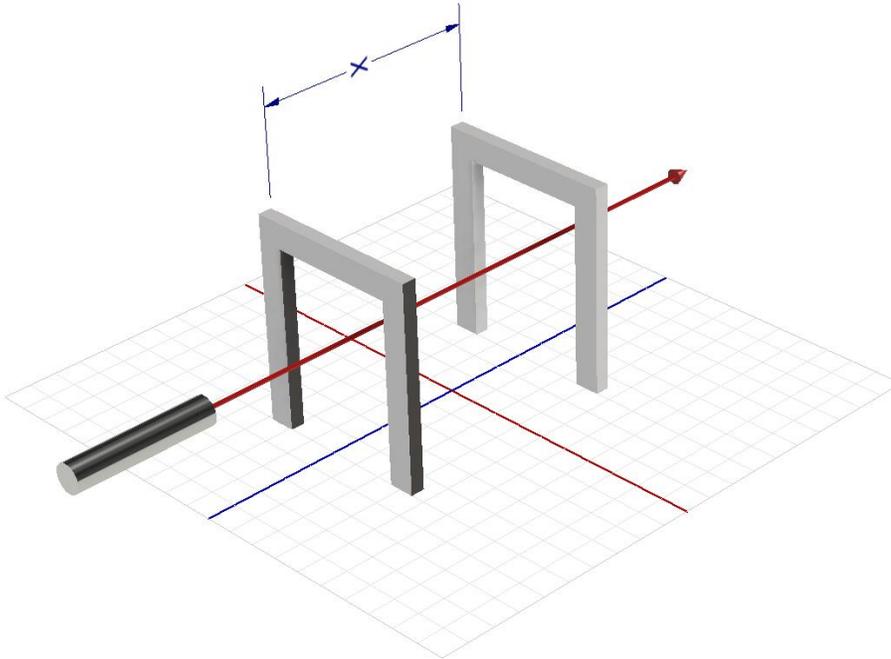


Figura 3.15: Representación de proyectil cruzando sensores pórticos de cronógrafo balístico.

### 3.2.2. Circuito de medición de onda

El circuito destinado a la medición del esfuerzo y la deformación de las muestras, se observa en la figura 3.16. En este,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  y  $R_4$  conforman el puente de Wheatstone, donde  $R_3$  es una resistencia variable, destinada a equilibrar el puente, mientras que  $R_4$  corresponde a una *strain gage*. Lo ideal es lograr que cada brazo del puente tenga la misma resistencia antes de deformar el *strain gage*. El resto del diagrama consiste en el circuito amplificador, que en este caso corresponde a un amplificador no inversor, en donde  $R_5$  y  $R_6$  son iguales. Considerando  $R_1 = R_2 = R_3 = R$  y  $R_5 = R_6 = R_f$ , además de una variación  $\delta$  en el *strain gage*, entonces el voltaje de salida ( $V_{out}$ ) se calcula según la ecuación 3.1.

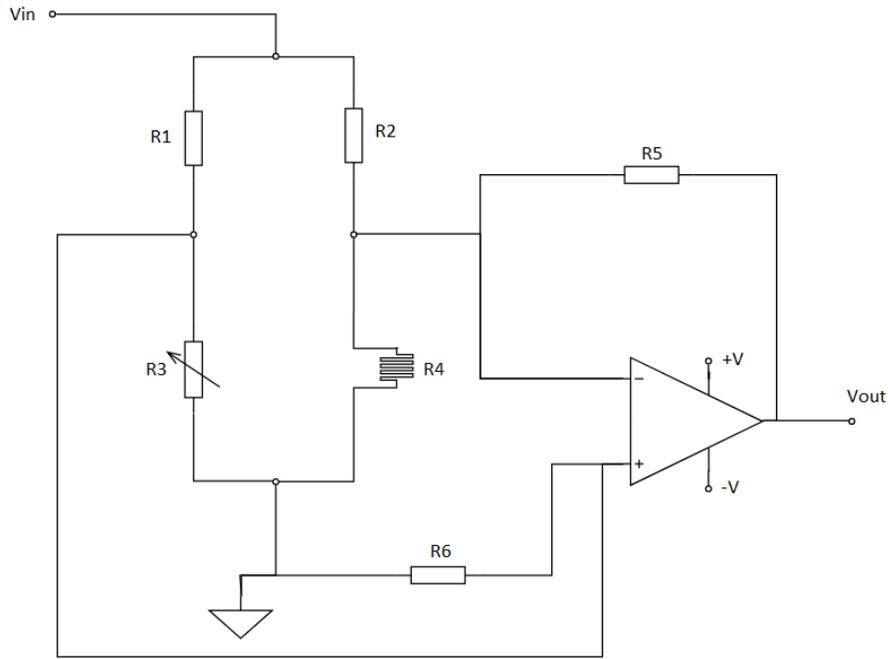


Figura 3.16: Diagrama de bloques de circuito de medición de onda.

$$V_{out} = V_{in} * (\delta/2) * \frac{R_f}{R} \quad \text{para } \delta \ll 1 \text{ y } R_f \gg R \quad (3.1)$$

### 3.3. Resumen de parámetros calculados

En la tabla 3.3 se muestra un resumen de los resultados obtenidos mediante el cálculo para el diseño de la barra de compresión de Hopkinson.

Tabla 3.3: Resumen de parámetros calculados

Parámetro	Valor	Unidad
Tasa L/D	60	-
Distancia entre apoyos de las barras	692,8	[mm]
Deflexión máxima en barras	0,009	[mm]
Esfuerzo equivalente de von Mises por gravedad en barras	0,14	[MPa]
Separación entre bujes de <i>striker</i>	115,5	[mm]
Espesor de pared mínimo cañón	1,01	[mm]
Espesor de pared mínimo cilindro estanque	6,85	[mm]
Espesor de pared mínimo tapas estanque	6,67	[mm]
Esfuerzo equivalente máximo de von Mises en trampa de momentum	114,5	[MPa]
Factor de seguridad trampa de momentum	2	-
Deflexión máxima en viga de soporte	0,0029	[mm]
Esfuerzo equivalente de von Mises por gravedad en viga	0,4	[MPa]

# Capítulo 4

## Selección de componentes comerciales

### 4.1. Componentes electrónicos

#### 4.1.1. Strain gages

Los strain gages destinados a la medición de las deformaciones corresponden al modelo BF350-3AA de la marca TCAM (figura 4.1). Las características del strain gauge se detallan en la tabla 4.1. [21]



Figura 4.1: Strain gauge TCAM BF350-3AA.

Tabla 4.1: Características de strain gauge TCAM BF350-3AA.

Resistencia [ $\Omega$ ]	Factor de galga -	Clase de precisión -	Límite de tensión [%]	Largo [mm]	Ancho [mm]
350	2,0-2,20	0,02	2,0	7,1	4,8

#### 4.1.2. Amplificador operacional

El circuito integrado LM324N de Texas Instruments (figura 4.2) es un dispositivo que consta de cuatro amplificadores operacionales independientes de alta ganancia con compen-

sación de frecuencia que están diseñados específicamente para operar desde una sola fuente o fuente dividida en un amplio rango de voltajes.

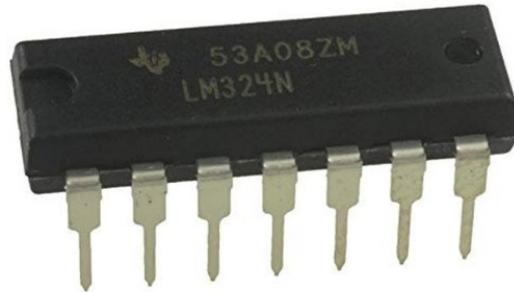


Figura 4.2: Amplificador Operacional cuádruple LM324N.

En la figura 4.3 se muestra la configuración de los pines utilizada por el chip.

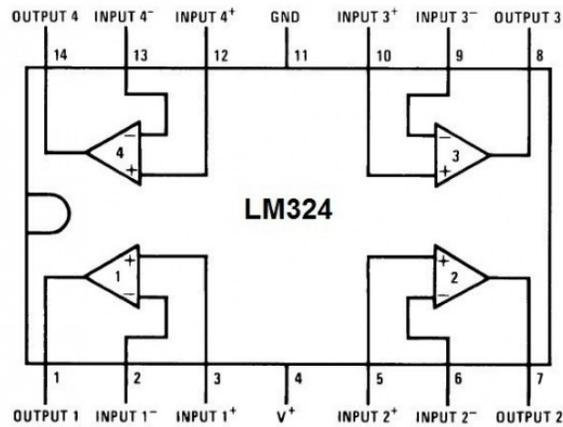


Figura 4.3: Amplificador Operacional cuádruple LM324N.

### 4.1.3. Osciloscopio

El sistema de adquisición utilizado en el equipo está basado en el software del osciloscopio HANTEK 6022BE, cuyo nombre es compartido entre software y osciloscopio. La Figura 4.5 muestra la interfaz del software a utilizar.



Figura 4.4: Osciloscopio HANTEK 6022BE



Figura 4.5: Interfaz de software HANTEK 6022BE

#### 4.1.4. Cronógrafo balístico

La medición de velocidad se realizará con el cronógrafo balístico X3200/E9800. Este cronógrafo funciona mediante dos fotointerruptores, cada uno conformado por un fotodiodo y cuatro fototransistores. Los fotointerruptores se encuentran ubicados a una distancia de 70 [mm] entre si. El equipo posee un anclaje para el cañón y una pantalla para la visualización de la medición de velocidad. Su rango de muestreo de velocidad se indica desde 1 a 999 [m/s].



Figura 4.6: Cronógrafo balístico X3200/E9800.

## 4.2. Conexiones de gas

Para la realización de los ensayos se ha determinado la utilización de gas de nitrógeno, debido a sus propiedades, disponibilidad y precio comercial. El nitrógeno es un gas incoloro, inodoro y sin sabor, no tóxico y no inflamable, cuyas propiedades se muestran en la tabla 4.2. [22]

Tabla 4.2: Propiedades físicas del nitrógeno.

Propiedad	Condición	Valor	Unidad
Gravedad específica	(0°C, 1 atm)	0,96	[kg/m <sup>3</sup> ]
Densidad del Líquido	(1 atm)	0,80	[kg/l]
Densidad del Gas	(15°C, 1 atm)	1,18	[kg/m <sup>3</sup> ]
Densidad del Gas	(0°C, 1 atm)	1,25	[kg/m <sup>3</sup> ]
Punto de Ebullición	(1 atm)	-195,80	[°C]
Presión Crítica		33,99	[bar]
Temperatura Crítica		-146,95	[°C]
Peso Molecular		28,01	[g/mol]

## Vástago regulador de gas

La conexión entre la columna de gas y la manguera se realiza mediante un vástago regulador de gas (figura 4.7), específico para las columnas de gas del proveedor.



Figura 4.7: Vástago regulador de gas.

## Manguera hidráulica

La manguera a utilizar debe soportar la carga de presión del gas. Para esto se selecciona una manguera hidráulica de 1,5 [m], cuya presión de diseño máxima alcanza 89,6 [MPa]. Esta conexión flexible le entrega libertad a la manipulación de la columna de gas.



Figura 4.8: Manguera hidráulica.

## Manómetro

El manómetro utilizado (figura 4.9) posee un rango de 0 a 6,89 [MPa] (0 a 1000 [psi] en sistema inglés), junto con un relleno de glicerina, destinado a evitar deterioros a causa de las rápidas caídas de presión al accionar el equipo.



Figura 4.9: Manómetro Winters PFQ Series Acero Inoxidable 304 0-1000 [psi].

## Válvula de salida

Para la selección de la válvula de salida de gas se consideran dos parámetros fundamentales: pérdida de carga y velocidad de accionamiento. Para disminuir las pérdidas de carga, se selecciona una válvula con un diámetro de 25,4 [mm], siendo la más cercana al diámetro interno del cañón (25 [mm]). Esta válvula posee una presión máxima de trabajo de 6,3 [MPa]. Respecto a la velocidad de accionamiento, se determina la utilización de un actuador neumático, accionado por una bobina solenoide, la cual permite al operador mantener distancia gracias al accionamiento remoto. Se selecciona la válvula de tres piezas marca Genebre con un actuador neumático con retorno por resorte (figura 4.10). El actuador requiere una presión de trabajo de 0,5 [MPa], mientras que la bobina solenoide se acciona con un voltaje de 12 [V]. [23][24]



Figura 4.10: Válvula de bola de tres piezas 25,4 [mm] con actuador neumático marca Genebre.

## Válvula de entrada

Para la válvula de entrada al estanque, se selecciona una válvula de la marca Genebre de dos piezas y diámetro 12,7 [mm], cuya presión máxima de trabajo corresponde a 6,3 [MPa] [25]. Esta válvula es de accionamiento manual, de manera de entregar un mayor control al momento de llenar el estanque.



Figura 4.11: Válvula de bola 12,7 [mm].

# Capítulo 5

## Construcción del equipo

A continuación, se especifican los detalles considerados durante la fabricación del equipo. En la figura 5.1, se muestra el resultado final de la construcción del equipo.



Figura 5.1: Fotografía general del equipo.

### 5.1. Fabricación y alineación del cañón

El cañón posee un largo total de 1000 [mm]. Se manufactura un hilo NPT para la conexión con la válvula de salida, además de incluir fresados laterales para la liberación de presión y un semi cilindro en la salida, destinado a permitir el reposo del proyectil luego de cada ensayo. Para la elaboración de los soportes, inicialmente se rectifican dos planchas de acero y luego se sujetan las caras rectificadas mediante dos pernos. Con ambas piezas unidas, se realiza

una perforación de 35 [mm] destinada a sujetar el cañón. Este procedimiento se realiza con ambos soportes simultáneamente, con el propósito de obtener un par completamente idéntico en dimensiones. Posteriormente se rectifica la cara orientada hacia la viga. En la figura 5.2 se muestra la marca de identificación entre el par base y abrazadera. Con esto se evitan errores en el montaje.

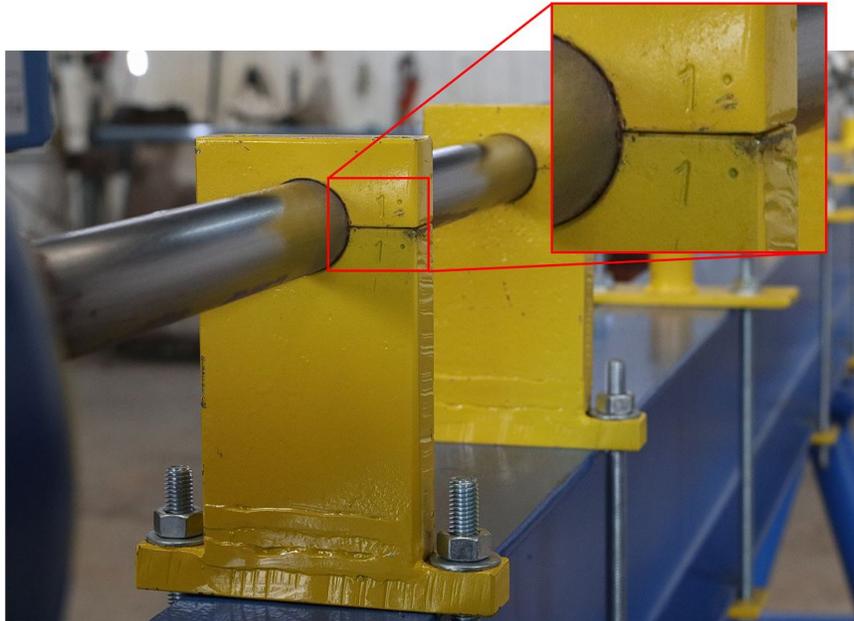


Figura 5.2: Identificación de base -abrazadera para un soporte de cañón.

En la figura 5.3 se muestra el par de soportes del cañón, sujetando al cañón y apernados mediante un par de hilo espárrago M12 de 333 [mm] de largo, a una placa perforada en la zona inferior de la viga.



Figura 5.3: Cañón de lanzamiento montado sobre sus soportes.

## 5.2. Construcción del estanque

El estanque es construido a partir de dos tapagorros y una cañería SCH40 de 300 [mm] de largo y diámetro interior 203,2 [mm] (8 pulgadas). Las juntas fueron realizadas utilizando un triple cordón de soldadura al arco con electrodo manual bajo hidrógeno. En las tapas se instala una tubería de 25,4 [mm] interior para la salida y una de 12,7 [mm] interior, con hilo BSP de acuerdo a la norma ISO 228-1. Además, se incluye una salida en la zona superior para el alojamiento del manómetro. En la figura 5.4 se muestra el resultado final de la manufactura del estanque.



Figura 5.4: Estanque de gas.

El estanque es apoyado sobre sus soportes y es ajustado a la altura del cañón mediante dos pletinas perforadas. Con esto se logra alinear el estanque con el cañón, evitando esfuerzos en la conexión. Para sujetar el estanque en su posición se utilizan cuatro pernos M12 de 60 [mm] de largo.

## 5.3. Alineación de las barras

La alineación de las barras se realiza utilizando un puntero láser y tapas con una perforación de 0,5 [mm], las cuales se ubican en los soportes de las barras, junto con una tapa con una cruz, la cual se ubica al interior del cañón (figura 5.5).

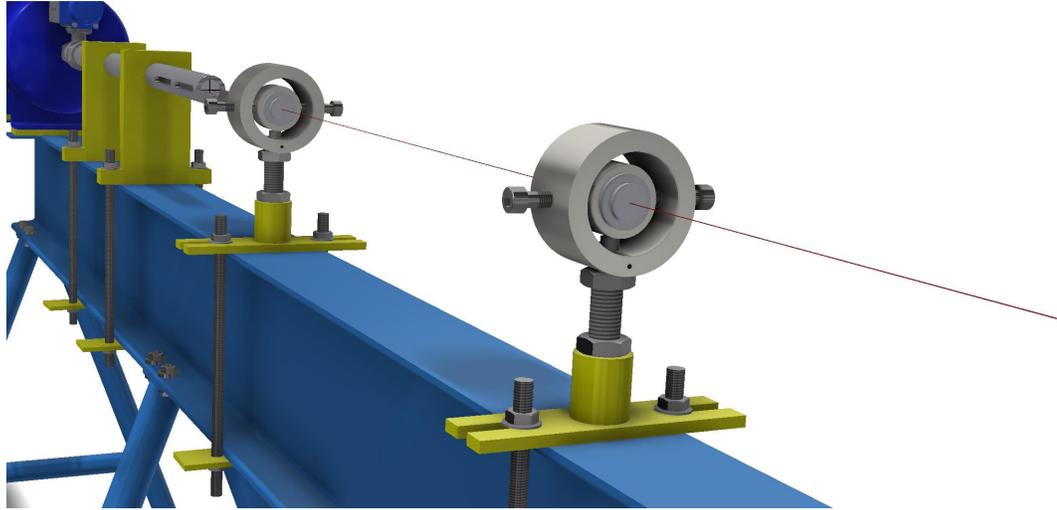


Figura 5.5: Alineación de las barras mediante puntero láser.

El procedimiento para alinear se inicia ajustando la base de los soportes. Este proceso también puede complementarse con el uso del puntero láser como guía. Luego se ajusta la altura girando el hilo y fijándolo con la tuerca inferior. Para realizar ajustes más finos de altura, se utiliza la tuerca superior. Una vez alcanzada la altura, se regula el desplazamiento lateral con los pernos laterales, hasta lograr visualizar el puntero en el centro de la cruz de la tapa del cañón. Para fijar la posición se aprietan los pernos laterales y se fija la rotación mediante el perno prisionero ubicado en la zona inferior del anillo exterior. Una vez revisado y apretado todos los pernos, se suelta el perno prisionero para poder montar las barras. Posteriormente, se vuelve a fijar el perno. El soporte ajustado y montado sobre el equipo se puede observar en la figura del apéndice C.1.

## 5.4. Montaje de *strain gages*

Una de las etapas delicadas del proceso corresponde al montaje de los *strain gages*. El primer paso consiste en la preparación del *strain gage*, para lo cual se utiliza una superficie de vidrio limpiada con acetona y secada con algodón en una única dirección. Luego se retira el *strain gage* de su envoltorio con pinzas previamente sanitizadas, y se ubica sobre el vidrio. Finalmente se recubre el *strain gage* con una tira de cinta adhesiva.

El siguiente paso corresponde a la limpieza de la superficie. Para esto, se procede a lijar con una almohadilla de lijado 7447 de la marca 3M Scotch Brite. Luego, se limpia la superficie utilizando acetona y algodón, repasando la zona en una única dirección para evitar la contaminación. Se recomienda cambiar el algodón para cada una de las últimas pasadas, hasta que este se muestre completamente limpio.

Posteriormente, se demarca la ubicación del *strain gage* utilizando lápiz grafito, se retira el *strain gage* de la superficie de vidrio, y se posiciona en su ubicación, con la ayuda de la cinta adhesiva. Una vez ubicado, se levanta la cinta hasta un par de milímetros por deba-

jo del *strain gage*, se pega el extremo levantado hacia atrás de la ubicación y se procede a aplicar una gota de superpegamento, como se muestra en la figura 5.6. A continuación, se vuelve a posicionar cuidadosamente el *strain gage* en su posición, y se aplica presión sobre este por dos minutos. Finalmente se retira la cinta adhesiva, dejando el *strain gage* adherido a la superficie de la barra.



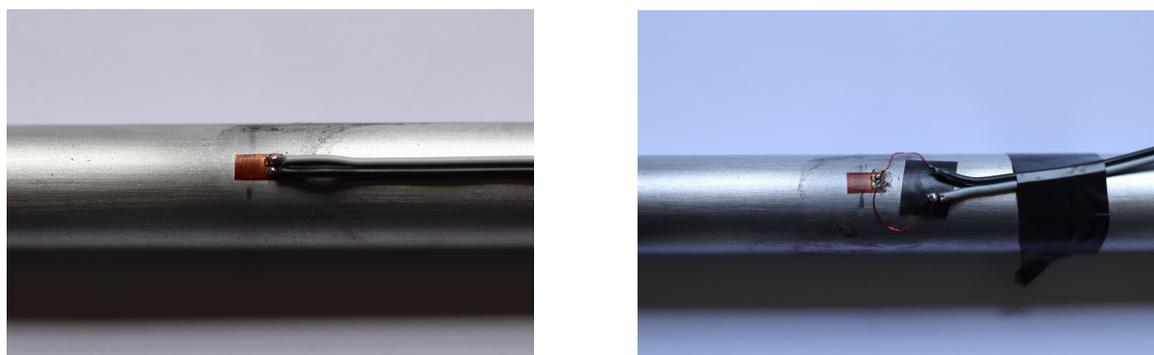
Figura 5.6: Adhesión del *strain gage* a la superficie de la barra.

El siguiente paso, consiste en la aplicación de soldadura de estaño en las almohadillas del *strain gage*. Es importante revisar que la resistencia del *strain gage* se mantenga intacta luego de aplicar la soldadura, como se muestra en la figura 5.7.



Figura 5.7: Verificación de la resistencia del *strain gage*.

En el último paso se procede a soldar los cables. Para esto, se debe pelar la punta de los cables y posteriormente aplicar una capa de soldadura sobre las puntas. Luego, se posicionan en la barra, se les aplica un doblé para que ejerzan presión sobre las zonas a soldar y se corta el exceso de cable. Finalmente, se sueldan en su posición. Dentro del análisis se implementan dos configuraciones para la soldadura de los cables al *strain gage* (figura 5.8), en donde, la imagen (a) muestra una conexión sin liberación de tensión, conectando los cables directamente al *strain gage*, mientras que (b) muestra la utilización de cables delgados en una disposición de liberación de tensión.



(a) Configuración de soldadura sin liberación de tensión (b) Configuración de soldadura con liberación de tensión.

Figura 5.8: Configuraciones de soldadura de cables utilizadas.

Finalmente, se recubren con un aislante, en este caso, Sikaflex 11FC [26], como se muestra en la figura 5.9. Es relevante volver a medir la resistencia del *strain gage*, ahora en el extremo libre de los cables.

Tabla 5.1: Propiedades SikaFlex -11FC+.

Densidad [kg/l]	Dureza Shore A	Resistencia a tracción [N/mm <sup>2</sup> ]	Elongación a rotura [%]	Temperatura de servicio [°C]
1,3	37	1,5	700	-40 a +80



Figura 5.9: *Coating* del *strain gage*.

Más fotografías del montaje de los *strain gages* se muestran en los apéndices C.8 y C.10.

## 5.5. Circuito de medición de onda

En la figura 5.10 se muestra el diagrama de bloques del circuito implementado en el equipo. El puente de Wheatstone utilizado es del tipo cuarto de puente, en el cual se implementa únicamente un *strain gage*. Para cada línea del puente se contempla una resistencia de  $550\ \Omega$ . Para esto, los brazos superiores utilizan una resistencia de  $330\ \Omega$  junto a una de  $220\ \Omega$ , mientras que, junto al *strain gage* ( $350\ \Omega$ ), se incluyen dos resistencias de  $100\ \Omega$ . La resistencia variable, encargada de equilibrar el sistema, posee un rango de  $0$  a  $1000\ \Omega$ . El circuito amplificador recibe la señal desde el puente de Wheatstone y la amplifica utilizando el chip amplificador operacional cuádruple LM324N de la marca Texas Instruments. Este chip se encarga de amplificar tanto el circuito de la barra incidente, como aquel de la barra de transmisión.

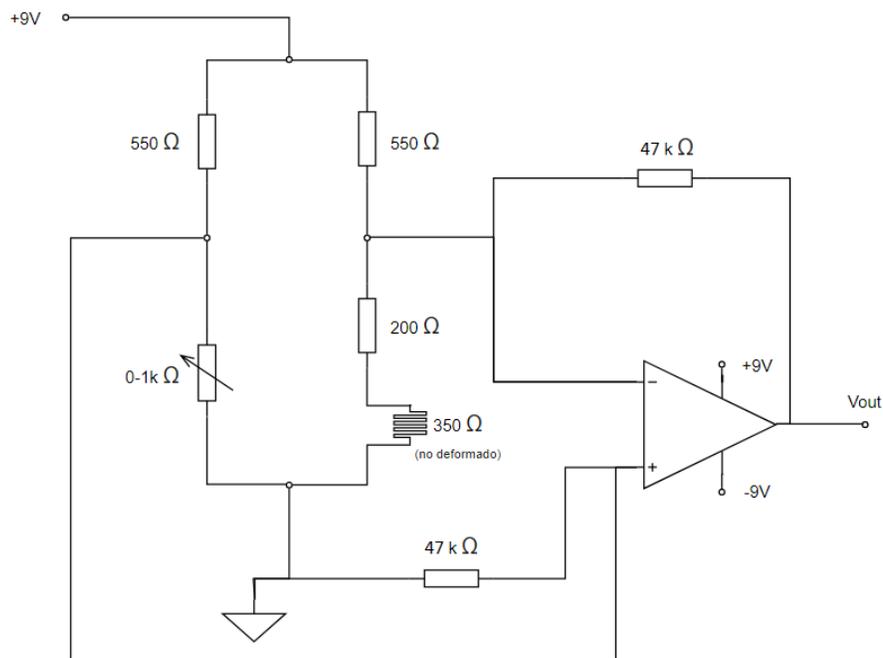


Figura 5.10: Diagrama de bloques de circuito de medición de onda implementado.

El circuito de medición de onda se introduce en una caja de plástico con el propósito de aislarla del entorno, y como medida de organización de las entradas y salidas, las cuales se muestran en la figura 5.11, en donde se identifica la entrada de voltaje positivo (+), la entrada de voltaje negativo (-), las conexiones a tierra, las conexiones de los *strain gages* de la barra incidente (**SG1-A** y **SG1-B**), las conexiones de los *strain gages* de la barra de transmisión (**SG2-A** y **SG2-B**), las salidas de medición de las barras incidente (**CH1**) y de transmisión (**CH2**), junto con dos accesos para el ajuste de las resistencias variables (**Rx-1** y **Rx-2**), encargadas de balancear los puentes de cada circuito.

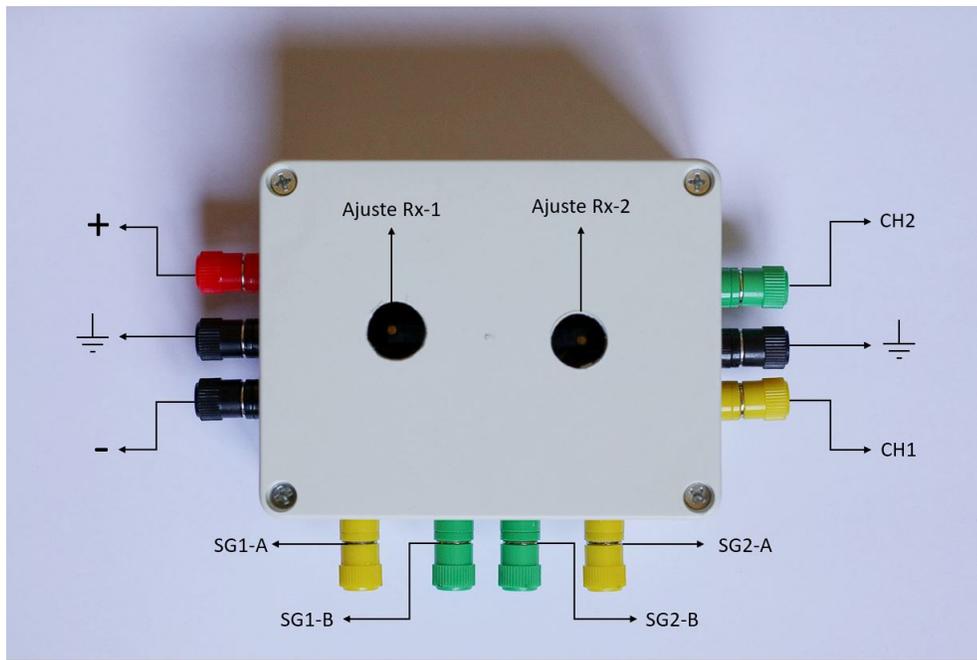


Figura 5.11: Diagrama de entradas y salidas para los circuitos de medición.

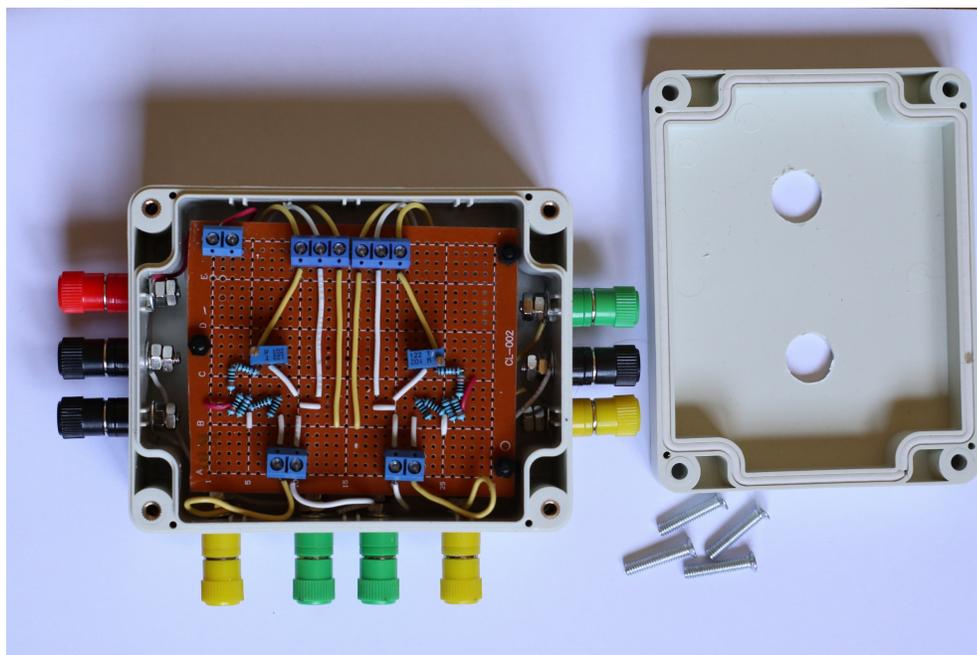


Figura 5.12: Interior del sistema de medición de onda.

## 5.6. Procedimiento de utilización

Este equipo presenta riesgo de proyección de fragmentos y ruidos que superan el límite máximo permisible (LMP) establecidos por el Ministerio de Salud (Minsal) [27], por lo que es de extrema necesidad el uso de elementos de protección tales como lentes, casco y protectores auditivos. La matriz de riesgos asociados al equipo se puede observar en el anexo E.

A continuación se detalla el procedimiento para la utilización del equipo, con el propósito de no comprometer la seguridad del operador.

1. Revisar que las válvulas de la columna de gas, de entrada al estanque y la válvula neumática de salida, se encuentren completamente cerradas.
2. Revisar que las resistencias de los *strain gages* correspondan con lo esperado.
3. Moldear la plastilina hasta obtener una masa homogénea para luego montarla en la copa de la trampa de momentum.
4. Cargar el proyectil en el cañón, utilizando una bayoneta flexible.
5. Posicionar la barra incidente en el borde del cañón.
6. Montar la muestra entre las barras, pretendiendo que quede lo más centrada posible.
7. Revisar que el sensor de velocidad esté funcionando correctamente.
8. En el software del osciloscopio, revisar que las señales se encuentren lo más centrado posible, ajustando las resistencias variables de cada circuito.
9. Establecer el *trigger* en el software del osciloscopio y fijar la opción *Trigger Sweep* en modo *Single*. Luego seleccionar el botón *Run* y revisar que en la parte superior del monitor indique *WAIT*. Si el monitor indica *STOP*, se debe reajustar el *trigger*.
10. Abrir la válvula del estanque seguida de la válvula de la columna de gas, hasta alcanzar la presión deseada, mostrada en el manómetro.
11. Cerrar la válvula de la columna de gas, seguida de la válvula de entrada al estanque.
12. Avisar al entorno de la realización del test, asegurando que todo el personal próximo tome las precauciones necesarias.
13. Abrir la válvula de salida para iniciar el ensayo.
14. Cerrar la válvula neumática de salida.
15. Guardar los datos de ambos canales registrados en el software, en formato '.txt'.

# Capítulo 6

## Evaluación del equipo

### 6.1. Curva de velocidad de proyectil

Para analizar el rendimiento del cronógrafo balístico, se registraron lanzamientos con y sin probeta. La verificación se realiza utilizando una curva teórica de velocidad, considerando el largo efectivo del cañón, el cual corresponde a la distancia desde la válvula en estado cerrado y el borde de la primera ranura de liberación de presión, como se muestra en la figura 6.1, alcanzando un total de 700 [mm].

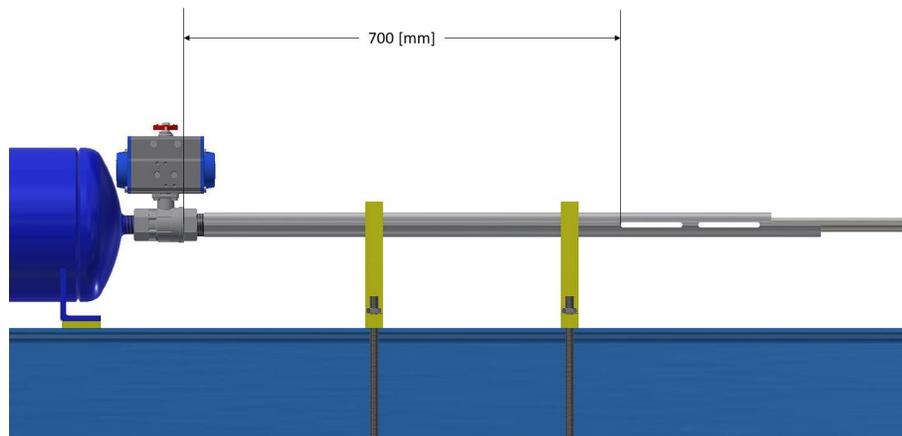


Figura 6.1: Largo efectivo del cañón.

En la figura 6.2 se muestra la comparación entre el ajuste de velocidad teórico y las mediciones experimentales. Para estas últimas, se incluye un ajuste polinómico de tercer orden. Es relevante mencionar que la temperatura afecta las mediciones de velocidad, debido al ajuste entre el buje y el cañón. El error calculado entre los datos obtenidos y el valor teórico corresponde a un 7 [%], mientras que el error entre la curva teórica y el ajuste polinómico se determina en 2,5 [%]. El cálculo del error se realiza únicamente en el tramo de presiones utilizados, es decir, entre 0 y 3172 [kPa].

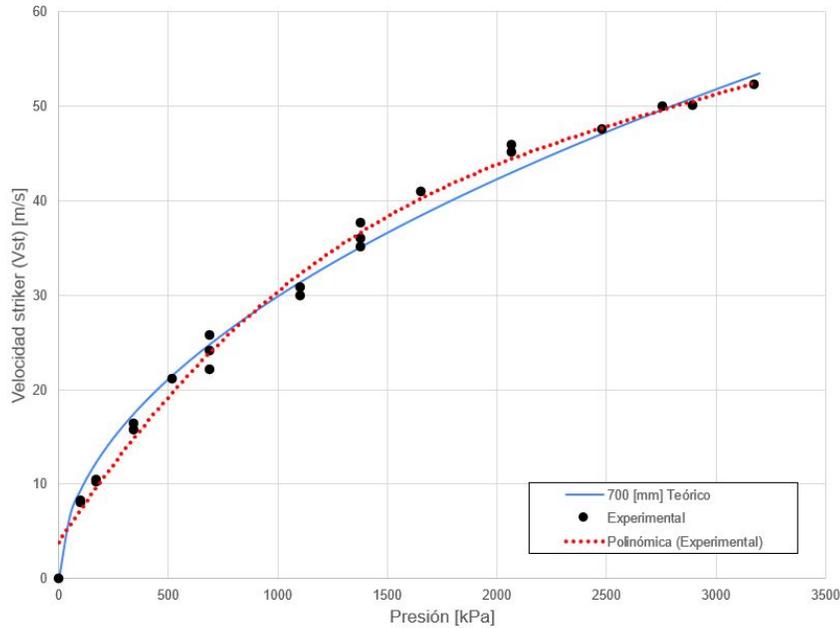


Figura 6.2: Comparativa de curvas velocidad-presión del *striker*.

## 6.2. Curvas características del material AA1100-H14

Debido a que el equipo posee barras de acero AISI 1020, es necesario analizar un material cuya ductilidad no comprometa la integridad de las barras, por lo que se determina utilizar un aluminio comercial AA1100-H14 para la realización de los ensayos. Para esto se manufacturan mediante torno, diez probetas de 10 [mm] de diámetro por 10 [mm] de largo. Las propiedades mecánicas de este material para una lámina de entre 0,2 y 25 [mm], se obtienen a partir de la norma ASTM B209M-14, las cuales se muestran en la tabla 6.1. [28]

Tabla 6.1: Propiedades mecánicas AA1100-H14.

Densidad	Módulo de elasticidad	Límite de fluencia	Resistencia a la tracción
[g/cm <sup>2</sup> ]	[GPa]	[Mpa]	[Mpa]
2,7	70	95	145

En la tabla 6.2 se muestran las dimensiones iniciales y finales de diez muestras, en conjunto con las velocidades y presiones utilizadas en el ensayo. Las probetas 8, 9 y 10 fueron ensayadas con la misma presión (172,37 [kPa]), de manera de registrar velocidades de impacto similares, y con el propósito de realizar una comparación para la obtención de los parámetros de Johnson-Cook a ese determinado *strain rate*.

Tabla 6.2: Mediciones experimentales de muestras de aluminio.

Probeta	$l_i$ [mm]	$d_i$ [mm]	$l_f$ [mm]	$d_f$ [mm]	$V_{st}$ [m/s]	$P$ [kPa]
-						
1	10,30	9,95	9,60	10,25	15,70	344,82
2	10,20	9,95	8,70	11,20	24,10	689,65
3	10,25	9,95	8,10	11,45	30,80	1103,44
4	10,20	9,95	7,75	12,00	35,10	1379,29
5	10,25	9,95	9,15	10,50	22,10	689,65
6	10,25	9,95	9,10	11,15	29,90	1103,44
7	10,30	9,95	7,95	12,00	36,00	1379,29
8	10,25	9,95	9,65	10,20	15,30	172,37
9	10,10	9,95	9,85	10,10	13,40	172,37
10	10,10	9,95	9,65	10,25	14,60	172,37

En las figuras 6.3, 6.4 y 6.5, se observan las probetas luego de ser ensayadas y se comparan con una muestra no ensayada, designada como probeta 0. Se logra apreciar la reducción del largo de las muestras, en conjunto con el abombamiento del cuerpo de la probeta, predominante en los ensayos con elevadas velocidades.

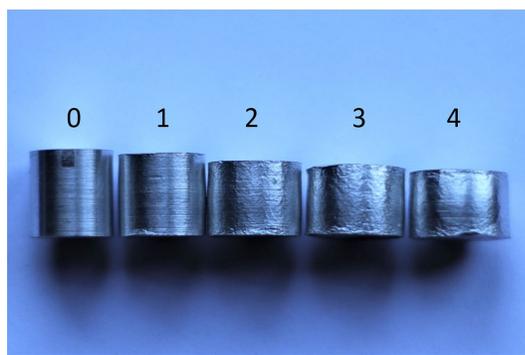


Figura 6.3: Probetas 1, 2, 3 y 4 luego del ensayo, comparadas con una probeta no ensayada (0).

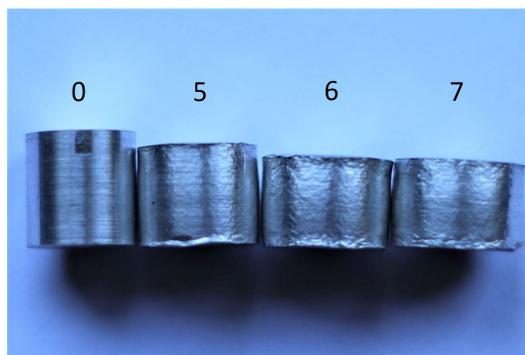


Figura 6.4: Probetas 5, 6 y 7 luego de ser ensayadas, comparadas con una probeta no ensayada (0).

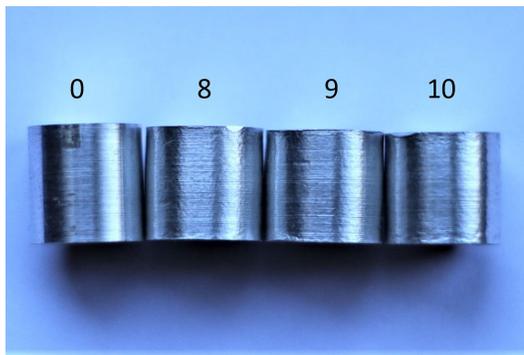


Figura 6.5: Probetas 8, 9 y 10 luego de ser ensayadas, comparadas con una probeta no ensayada (0).

En las figuras 6.6, 6.7 y 6.8, se aprecian las señales de barra incidente (azul) y barra de transmisión (naranja) registradas para las probetas 8, 9 y 10. En el apéndice D se encuentra el resto de las señales de las probetas, en donde algunas presentan falla de registro por desprendimiento o fractura de soldadura del *strain gage*.

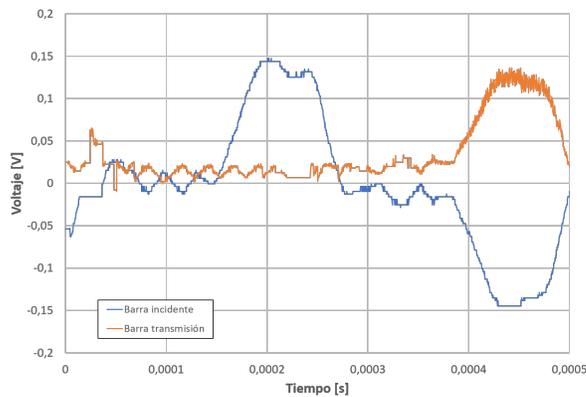


Figura 6.6: Señal registrada en barras incidente y de transmisión para probeta 8.

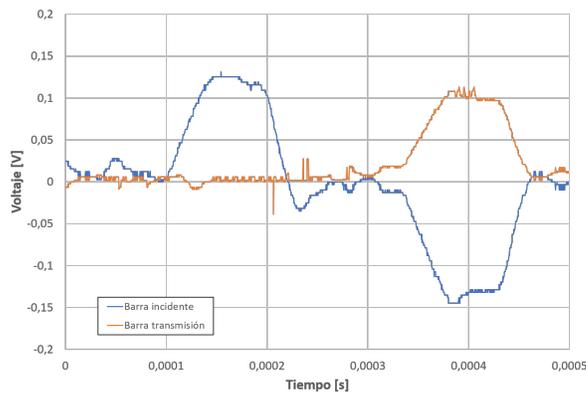


Figura 6.7: Señal registrada en barras incidente y de transmisión para probeta 9.

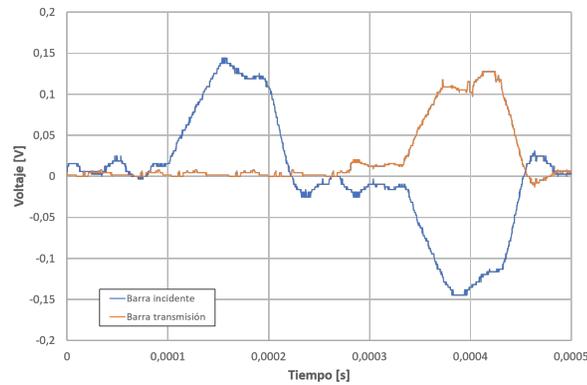


Figura 6.8: Señal registrada en barras incidente y de transmisión para probeta 10.

### 6.2.1. Curvas características

El procesamiento de las señales registradas se realiza mediante el software SURE-Pulse. Algunos de los parámetros ingresados se muestran en el apéndice D.

Las curvas de esfuerzo deformación de las probetas 8, 9 y 10 se muestran en la figura 6.9, en donde se aprecia un desfase en el esfuerzo inicial, el cual no se inicia en 0. Esto se identifica como una determinación tardía de la señal y puede deberse a un problema del sistema, o bien, a algún parámetro sensible a ajustar en el software de post-procesamiento SURE-Pulse. Según lo registrado, el límite de fluencia del material se encuentra en torno a 100 [MPa].

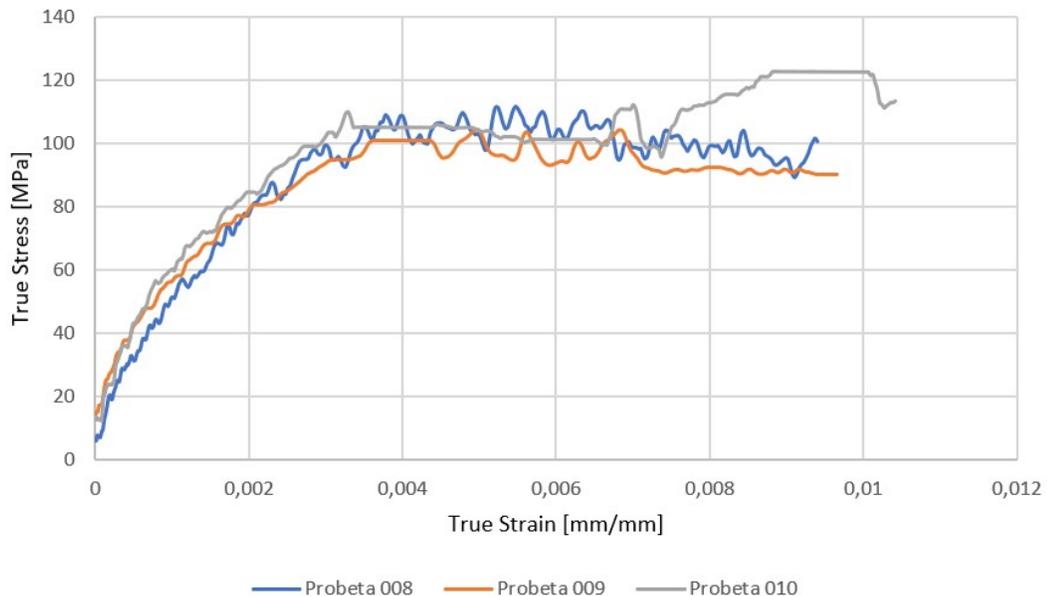


Figura 6.9: Curvas esfuerzo-deformación real de probetas 8, 9 y 10 con filtro numérico de 30 [kHz].

En la figura 6.10 se vuelve a observar la determinación tardía de la señal.

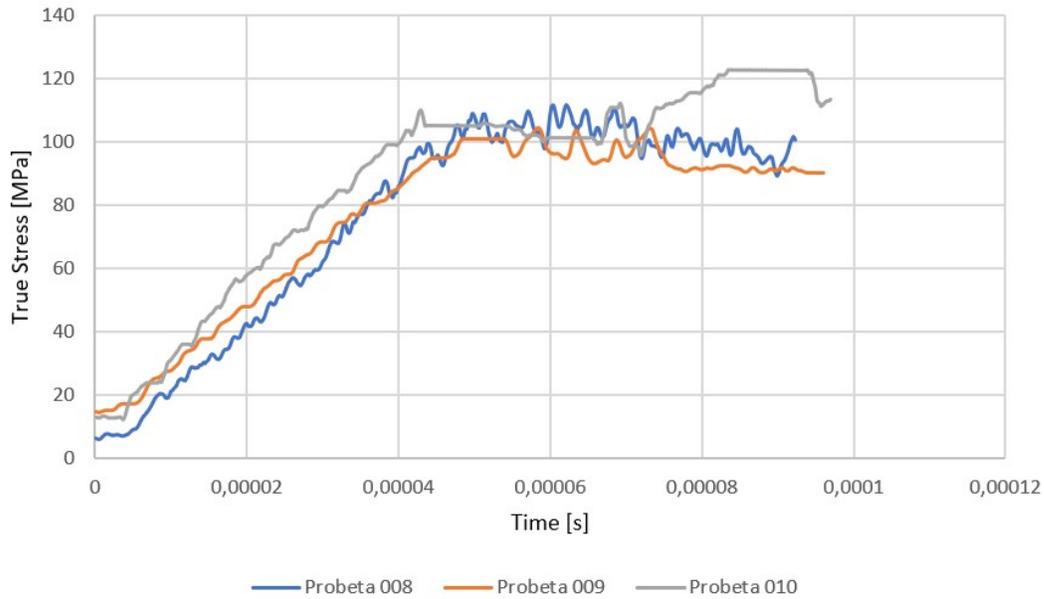


Figura 6.10: Curvas esfuerzo real en el tiempo de probetas 8, 9 y 10 con filtro numérico de 30 [kHz].

Las figuras 6.11 y 6.12 presentan un comportamiento similar para las tres probetas, en donde, el strain rate máximo se encuentra en torno a 134 y 144 [s<sup>-1</sup>].

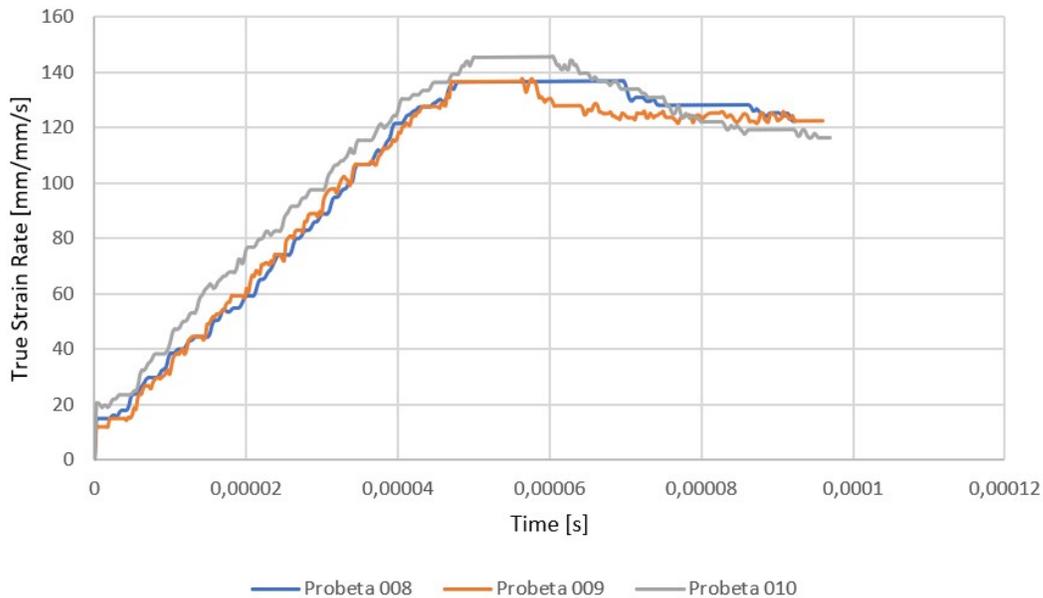


Figura 6.11: Curvas de tasa de deformación real en el tiempo de probetas 8, 9 y 10 con filtro numérico de 30 [kHz].

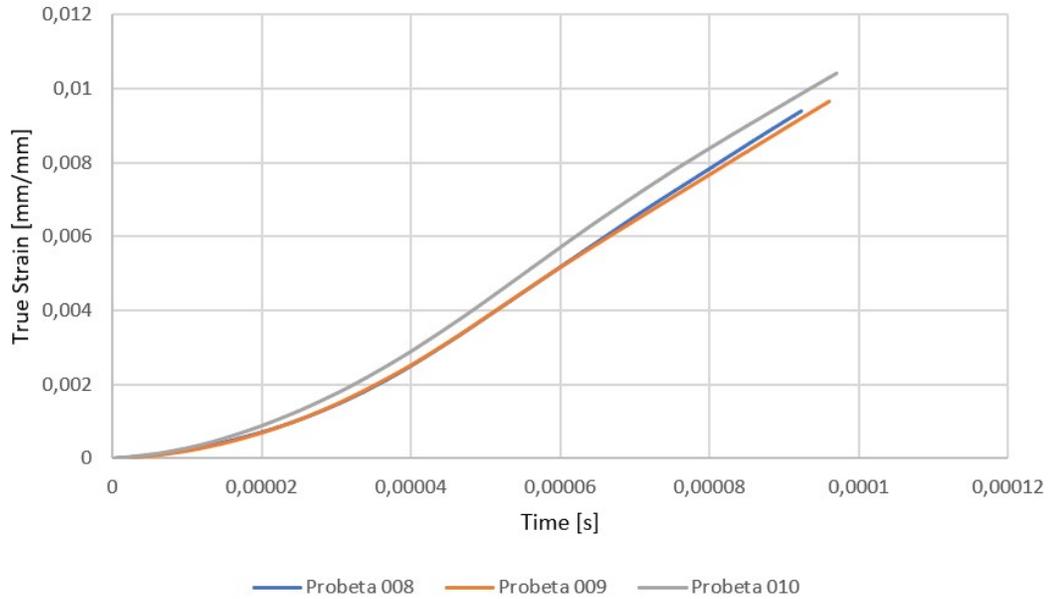


Figura 6.12: Curvas de deformación real en el tiempo de probetas 8, 9 y 10 con filtro numérico de 30 [kHz].

## 6.2.2. Parámetros de Johnson-Cook

Los parámetros de Johnson-Cook se determinan mediante la herramienta *Solver* de Excel, ingresando las curvas de esfuerzo-deformación real de las probetas 8, 9 y 10, considerando un *strain rate* de referencia de  $0,01 \text{ [s}^{-1}\text{]}$ . En esta ocasión las variables de temperatura no son consideradas, debido a que la de referencia y la del ensayo son la misma.

El parámetro  $A$  corresponde al límite de fluencia del material, este se determina en  $101,5 \text{ [MPa]}$ .

El coeficiente de endurecimiento por deformación ( $B$ ) representa la pendiente de la zona plástica y alcanza un valor de  $24 \text{ [MPa]}$ . Este valor de pendiente es bajo, mostrando un comportamiento casi horizontal. Lo anterior se justifica principalmente por la historia del material, identificada por la denominación H14, que en aluminios corresponde a un endurecimiento por deformación de término medio.

El parámetro  $n$  es el exponente de endurecimiento por deformación y se utiliza para representar la forma (curva o lineal) de la zona plástica, el cual obtiene un valor de  $0,024$ , que se traduce en una línea levemente curva.

El último parámetro determinado corresponde al coeficiente de endurecimiento por tasa de deformación ( $C$ ), encargado de reflejar el efecto en el esfuerzo debido al *strain rate*. Este coeficiente adquiere un valor de  $0,002$ , lo que implica que el material no presenta una gran

variación en el esfuerzo a medida que se aumenta la tasa de deformación. Esto último se plasma en el estudio realizado por los autores Naoki Takata et al. [29], en donde se aprecia que el límite de fluencia para los aluminios de la serie AA1100 recién comienza a verse afectado de manera considerable cuando la tasa de deformación se aproxima a  $10^3$  [s<sup>-1</sup>]. Los valores de  $A$ ,  $B$ ,  $n$  y  $C$  se resumen en la tabla 6.3, donde también se incluyen parámetros utilizados por los autores M. A. Iqbal et al. [30]. Es relevante mencionar que estos últimos corresponden a parámetros supuestos a partir del aluminio AA1100-H12.

Tabla 6.3: Parámetros de Johnson-Cook calculados a un strain rate de  $100$  [s<sup>-1</sup>] del material AA1100-H14.

Variable	Valor obtenido [Mpa]	Valor referencial [MPa]
A	101,5	102,82
B	24	49,79
n	0,4	0,197
C	0,002	0,001

La figura 6.13 muestra una predicción de los rangos plásticos del material analizado para distintos *strain rates*, utilizando los parámetros de Johnson-Cook.

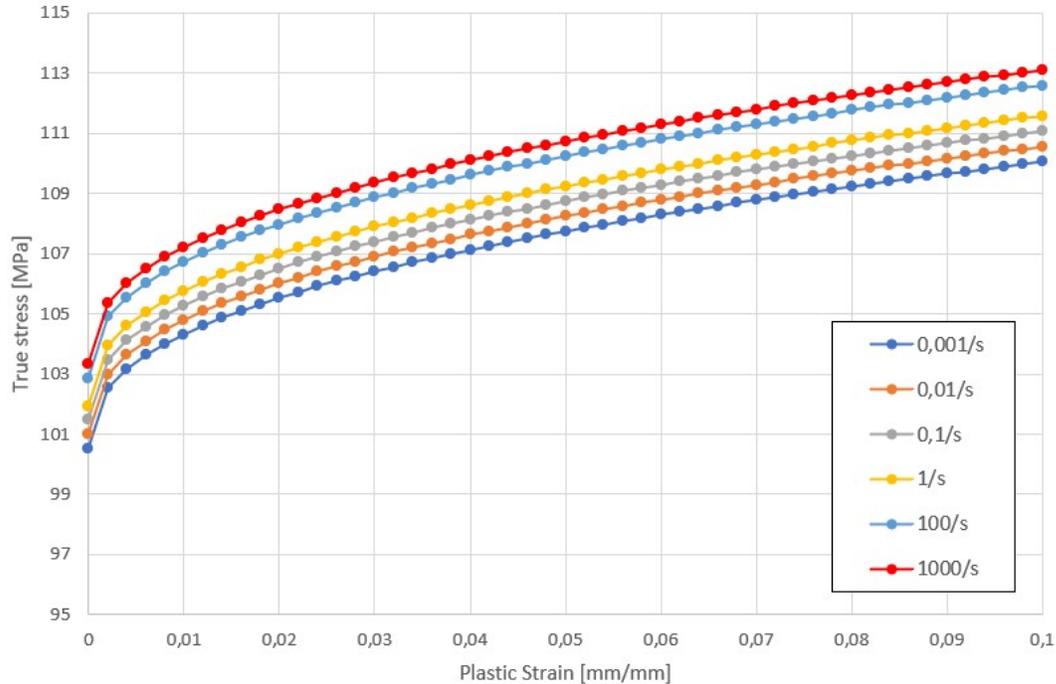


Figura 6.13: Rango plástico analítico del aluminio AA1100-H14 determinado con los parámetros de Johnson-Cook.

# Capítulo 7

## Conclusiones

En este trabajo de título se ha logrado diseñar, construir y evaluar una barra de compresión de Hopkinson, destinada al estudio de materiales a altas tasas de deformación, mediante el impacto de un proyectil impulsado por un sistema neumático.

El sistema construido registra consistentemente velocidades por sobre 1 [m/s], en conjunto con tasas de deformación promedio superiores a 100 [ $s^{-1}$ ]. La alineación del cañón, el *striker*, la barra incidente y la barra de transmisión, se considera adecuada, mostrando una reducción en la fricción entre los soportes y las barras. Por otra parte, la herramienta *trigger* del osciloscopio mostró un correcto funcionamiento para el registro de las señales de impacto, logrando así, series de datos cuya frecuencia de muestreo se encuentra desde 1 a 8 [MHz], según la configuración ingresada.

Con respecto a los componentes comerciales, se optó por la selección de componentes estándar, con el propósito de poder modificar sin mayor dificultad en caso de observar alguna falla, deterioro, o bien, si es que se desea realizar un análisis con otra configuración del equipo.

Durante la realización de los ensayos se experimentaron dificultades como el desprendimiento de la soldadura de los *strain gages* la cual se explica principalmente por la habilidad personal de soldadura con estaño. Este problema puede solucionarse mediante la adquisición de *strain gages* previamente soldados. También se observó el efecto de la temperatura en la velocidad alcanzada por el proyectil, en donde, a medida que se realizaban ensayos era más fácil cargar el proyectil y las mediciones se volvían más estables. Se recomienda realizar una serie de ensayos de calibración para lograr estabilidad en el muestreo. Sin embargo, todas las problemáticas de medición fueron resueltas exitosamente para la obtención de los datos.

En lo que respecta al procesamiento de señales, se logran caracterizar las curvas del material AA1100-H14, las cuales se encuentran dentro de los ordenes de magnitud esperado. Los parámetros de Johnson-Cook obtenidos reflejan de maneja general el comportamiento del material, representando la tendencia y pudiendo entregar curvas referenciales para tasas de deformación adicionales a las utilizadas en los ensayos.

Finalmente, se concluye que se cumplen de manera satisfactoria todos los objetivos propuestos para este trabajo de título.

# Capítulo 8

## Mejoras y estudios aplicables al proyecto

A continuación se describen mejoras y estudios aplicables al proyecto, en base a lo propuesto y observado experimentalmente.

- La mejora más relevante consiste en el reemplazo del material de las barras incidente, de transmisión y el proyectil, por uno cuyas propiedades mecánicas respondan de mejor manera a mayores velocidades de ensayo. Para esto se propone la utilización de aceros martensíticos, tales como el C300 o C350.
- A modo de complemento al análisis, se propone la realización de ensayos de granulometría, de manera de poder analizar el comportamiento del tamaño de grano para distintas tasas de deformación.
- Se recomienda ampliamente cambiar el osciloscopio utilizado por uno de mejor calidad, con el propósito de disminuir el ruido en la señal.
- Una de las mejoras sencillas a realizar, corresponde al cambio de configuración de soldadura de los *strain gages* a tres cables, según se muestra en la figura 8.1. Con esto se logra evitar la variación del cero, así como también, que la temperatura sobre los *strain gages* no tengan efecto sobre las mediciones. Esta mejora no supone ningún cambio para el sistema de medición de onda presentado en este trabajo.
- Una mejora necesaria a implementar corresponde a la utilización de *strain gages* con cables presoldados, con el propósito de disminuir la falla por desprendimiento de soldadura, ampliamente observada durante los ensayos.
- Un potencial análisis a realizar, consiste en la fabricación y evaluación del efecto sobre la señal para distintos *pulse shapers*. Estos dispositivos permiten minimizar la dispersión de la señal, filtrando las altas frecuencias en el pulso incidente, disminuyendo la necesidad de filtrar la señal numéricamente.
- Adicionalmente, es posible analizar muestras sometidas a temperatura, para lo cual es necesario poder calentar la muestra sin afectar las barras. Para esto se propone la fabricación de un calentador de muestra inductivo. Este calentador debe permitir ser

retirado rápidamente, además de dejar la muestra lista y posicionada para el ensayo.

- El roce de las barras con los bujes de los soportes también puede alterar levemente la señal, con lo que se propone realizar un estudio al efecto de diferentes lubricantes aplicados en estas zonas.
- Otro estudio aplicable al proyecto considera el análisis de distintas configuraciones de barras, las cuales pueden variar tanto su largo como su diámetro, o bien, su material. Con esto se puede analizar la influencia del material de las barras sobre la señal obtenida. A esto también se suma la modificación en la posición de los *strain gages*, identificando su distancia hasta la muestra.

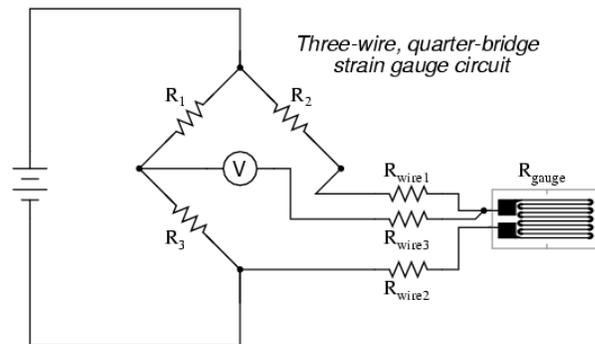


Figura 8.1: Configuración de 3 cables para *strain gages* puente de Wheatstone.

# Bibliografía

- [1] R. W. Armstrong and S. M. Walley. High strain rate properties of metals and alloys. *International Materials Reviews*, 53(3):105–128, 2008.
- [2] R. L. Sierakowski. Strain rate behavior of metals and composites. *Convegno IGF XIII Cassino 1997*, pages 1–28, 1997.
- [3] K Ahn, H Huh, and L Park. Comparison of Dynamic Hardening Equations for Metallic Materials with the Variation of Crystalline Structures. *Proceedings of 5th international conferene on High Speed Forming*, pages 165–176, 2012.
- [4] Weinong Chen and Bo Song. *Split Hopkinson (Kolsky) Bar Design, Testing and Applications*. 2011.
- [5] Shawn Michael Lang. Design of a Split Hopkinson Bar Apparatus for use with Fiber Reinforced Composite Materials. *All Graduate Theses and Dissertations* <https://digitalcommons.usu.edu/etd/1284>, page 44, 2012.
- [6] Michael Adam Kaiser. Advancements in the Split Hopkinson Bar Test. *Mechanical Engineering*, page 94, 1998.
- [7] H. Kolsky. An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at very High Rates of Loading. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, pages 676–700, 1949.
- [8] EF Megyesy. Manual de recipientes a presión. Diseño y cálculo, 1992.
- [9] Miguel Ángel Herrero Benavies. Diseño de un Lanzador Neumático de Alta Energía. pages 126–128, 2014.
- [10] S A Gebremeskel, N Asija, A Priyanshu, H Chouhan, and N Bhatnagar. Design Customization and Development of Split Hopkinson Pressure Bar for Light and Soft Armour Materials. *Global Jr. of Researchers in engineering*, XIV(VII):62–75, 2014.
- [11] Woo Jin An, Min A Woo, Hak Gon Noh, Beom Soo Kang, and Jeong Kim. Design and Fabrication of Split Hopkinson Pressure Bar for Acquisition of Dynamic Material Property of Al6061-T6. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 33(7):587–594, 2016.
- [12] Micro-Measurements. Installing Gages with Option P2. pages 1–3, 2010.

- [13] Micro-Measurements. Installing Gages with Option P Gages. *Application Note*, page 2, 2010.
- [14] Thomas L. Floyd. *Dispositivos Electrónicos*. 2008.
- [15] Walt Kester. What the Nyquist Criterion Means to Your Sampled Data System Design. *Analog Devices*, 2009.
- [16] Kevin Young. Development of a Tensile Split Hopkinson Pressure Bar Testing Facility. *Electronic Theses and Dissertations*, Paper 5513:163, 2015.
- [17] Jr. William D. Callister. *Materials Science and Engineering An Introduction*, volume 29. 2007.
- [18] Rulemanes de Mayo. Anillos Seeger Para Ejes Anillos de Retención. Technical report, DIN 471.
- [19] M. Vural and D. Rittel. An educational visualization technique for Kolsky (split Hopkinson) bar. *Experimental Techniques*, 27(6):35–39, 2003.
- [20] Harrison Hertlein, Nathan Thomas Siegel, Jacob Wilson, and Marysol Zamaniego Cuahonte. Quasi-Static and Dynamic Testing of Composite Materials. 2019.
- [21] AGS-TECH Inc. Coding System of Strain Gauges. pages 1–8, 2019.
- [22] INDURA. Ficha de producto Nitrógeno Gaseoso 8.5 M3. 2020.
- [23] GENE BRE. ARTICULO : 2025 Válvula de esfera paso total 3 piezas Inoxidable Stainless steel full port ball valve , 3 pieces. 2018.
- [24] GENE BRE. Art . 5800 ACTUADOR NEUMATICO DE ALUMINIO - GNP Art . 5800 PNEUMATIC ACTUATORS IN ALUMINIUM – GNP OPERATING INSTRUCTIONS. 2017.
- [25] GENE BRE. ARTICULO : 2014 Válvula de esfera paso total 2 piezas Inoxidable Stainless steel full port ball valve , 2 pieces. 2017.
- [26] SIKA. Ficha de Producto Sikaflex ® -11 FC +. 2017.
- [27] Instituto de Salud Pública. Protocolo Para La Medición Del Ruido Impulsivo En Los Lugares De Trabajo. 2012.
- [28] ASTM Standard. B209M-14: Standard Specification for Aluminum and Aluminum Alloy Sheet and Plate. *ASTM International*, (November):1–26, 2014.
- [29] Naoki Takata, Yoshitaka Okitsu, and Nobuhiro Tsuji. Dynamic deformation behavior of ultrafine grained aluminum produced by ARB and subsequent annealing. *Journal of Materials Science*, 43(23-24):7385–7390, 2008.
- [30] M. A. Iqbal, S. H. Khan, R. Ansari, and N. K. Gupta. Experimental and numerical

studies of double-nosed projectile impact on aluminum plates. *International Journal of Impact Engineering*, 54:232–245, 2013.

# Apéndice A

## Memoria de cálculo

### A.1. Frecuencia de muestreo

La frecuencia de muestreo ( $f_s$ ) está dada según el criterio de Nyquist:

$$f_s > 2 * f_{max} \quad (\text{A.1})$$

En donde  $f_{max}$  depende del tiempo de carga, como se mostró en la ecuación 1.29. El tiempo de carga  $T$  se define como:

$$T = \frac{\lambda}{C} \quad (\text{A.2})$$

donde:

- $\lambda$  corresponde al doble del largo del proyectil, equivalente a 0,4 [m].
- $C$  es la velocidad del sonido en el material de las barras, el cual corresponde a [m/s].

Dando como resultado:

$$T = 83,3[\mu m] \quad (\text{A.3})$$

Con lo que se obtiene la frecuencia máxima:

$$f_{max} = 12[kHz] \quad (\text{A.4})$$

Por lo que la frecuencia de muestreo requerida para la visualización de la señal se determina en:

$$f_s = 2 * 12[kHz] = 24[kHz] \quad (\text{A.5})$$

## A.2. Espesor de pared

Para el espesor de pared en casco cilíndrico del estanque ( $t_e$ ) se utiliza la ecuación 1.24. En donde  $P$  es la presión de diseño establecida en 6 [MPa],  $R$  es el diámetro interno de la tubería determinado en 101,6 [mm],  $S$  es la resistencia del material ASTM A-234 WPB identificada como 6,894 [kPa] y  $E$  es la eficiencia de la soldadura, en este caso asumida como 1 debido al triple cordón implementado.

Con esto se obtiene que el espesor de pared mínimo del casco cilíndrico del estanque corresponde a:

$$t_e = 6,858[mm] \quad (A.6)$$

Similarmente, para el cálculo del espesor de las tapas, identificadas como cabezas elipsoidales, se utiliza la ecuación A.7

$$t_t = \frac{PD}{2SE - 0,2P} \quad (A.7)$$

Donde  $P$ ,  $S$  y  $E$ , son los mismos de la ecuación 1.24 y  $D$  corresponde al diámetro interno, determinado en 203,2. Con esto se obtiene:

$$t_t = 6,667[mm] \quad (A.8)$$

## A.3. Caída de presión

El cálculo de la caída de presión se realiza utilizando la ecuación 1.25. En donde el volumen inicial corresponde al estanque, mientras que el volumen final corresponde a la suma del volumen del estanque y el volumen del cañón.

El volumen del estanque ( $V_e$ ) considera el casco cilíndrico y dos cabezas elipsoidales, dando como resultado:

$$V_e = 11,37[lt] \quad (A.9)$$

Considerando un diámetro de 35 [mm] y un largo de 700 [mm] para el cañón, el volumen final ( $V_f$ ) resultante del estanque junto con el cañón resulta:

$$V_f = V_{e+c} = 12,04[lt] \quad (A.10)$$

Con estos valores, se determina la presión final en:

$$P_f = 5,7 * 10^6[Pa] \quad (A.11)$$

Finalmente, la caída de presión resulta:

$$\Delta P \% = 7,74 \% \quad (\text{A.12})$$

## A.4. Velocidad máxima del material

Para el cálculo de la velocidad máxima a la que se puede someter el material, se utiliza directamente la ecuación 1.27, dando como resultado:

$$v_{stmax} = 17,66[m/s] \quad (\text{A.13})$$

## A.5. Puntos de apoyo de las barras

Las posiciones de los apoyos se determinan mediante la utilización de la ecuación 1.28, con lo que, considerando un largo de barras de 1200 [mm] y dos apoyos, se obtiene:

$$A_{barras} = 692,8[mm] \quad (\text{A.14})$$

La misma ecuación se utiliza para los bujes de teflón del proyectil, con lo que se determina:

$$A_{st} = 115,5[mm] \quad (\text{A.15})$$

## A.6. Fuerza sobre trampa de momentum

Para la estimación de una fuerza estática debido al proyectil, se requiere la masa del proyectil y su aceleración. Primeramente se utiliza la ecuación A.16, considerando una velocidad final de 100 [m/s], una velocidad inicial de 0 [m/s] y un largo de cañón sobrestimado de 1000[mm].

$$V_f^2 = V_i^2 + 2aL \quad (\text{A.16})$$

Despejando la aceleración  $a$ , se obtiene:

$$a = \frac{V_f^2 - V_i^2}{2L} \quad (\text{A.17})$$

Reemplazando los valores resulta:

$$a_{st} = \frac{100^2 - 0^2}{2 * 1000} = 4032[m/s^2] \quad (\text{A.18})$$

La masa del proyectil ( $m_{st}$ ) se determinó experimentalmente, como se muestra en la figura C.7.

$$m_{st} = 0,509[kg] \quad (\text{A.19})$$

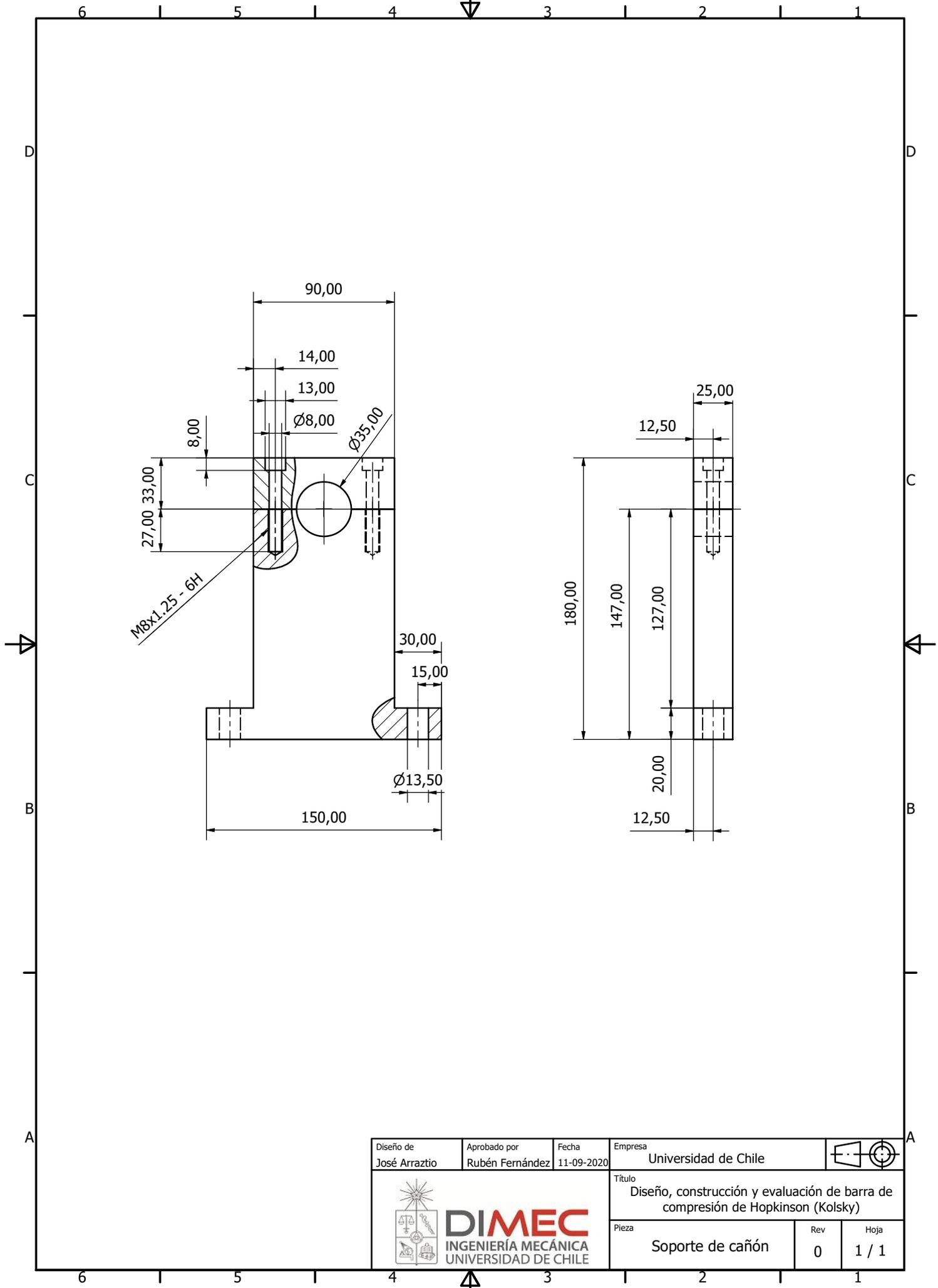
Finalmente, la fuerza en la trampa de momentum resulta:

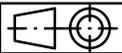
$$F_{impacto} = m_{st} * a_{st} = 0,509 * 4032 = 2052,28[N] \quad (\text{A.20})$$

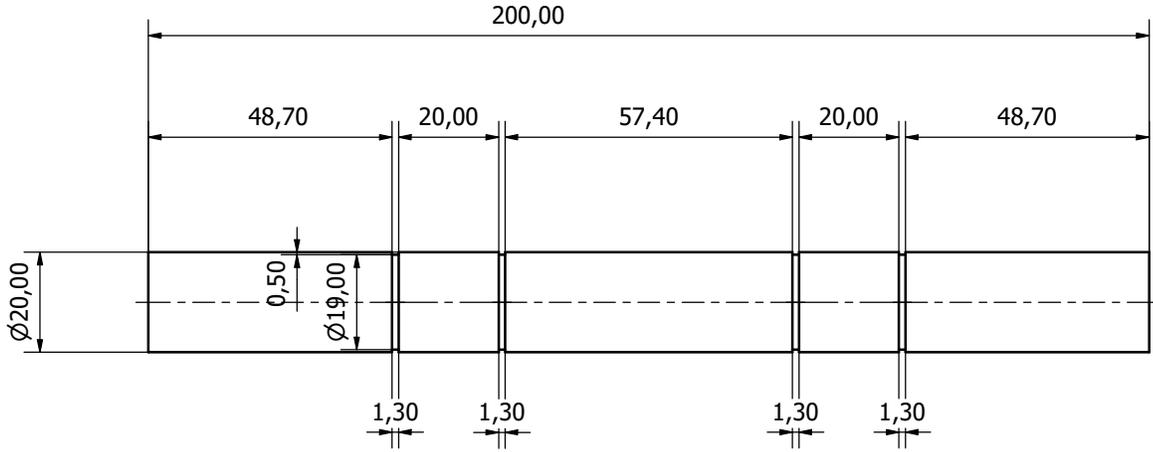
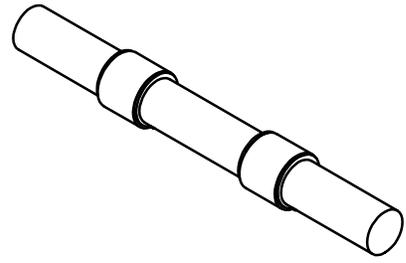
# Apéndice B

## Planos

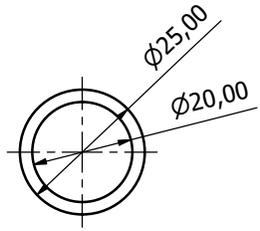
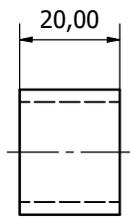
Página intencionalmente dejada en blanco.



Diseño de José Arraztio	Aprobado por Rubén Fernández	Fecha 11-09-2020	Empresa Universidad de Chile	
 <b>DIMEC</b> INGENIERÍA MECÁNICA UNIVERSIDAD DE CHILE			Título Diseño, construcción y evaluación de barra de compresión de Hopkinson (Kolsky)	
			Pieza Soporte de cañón	Rev 0



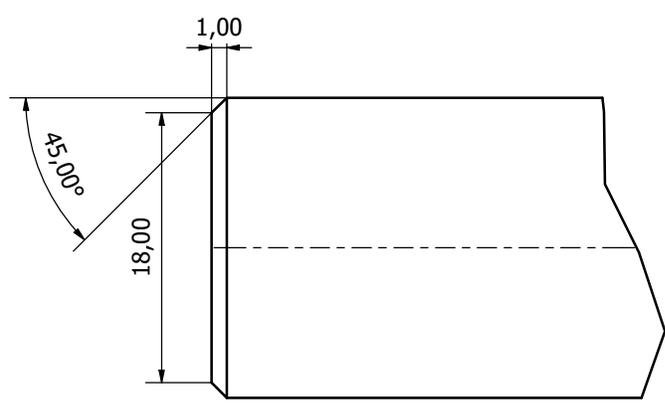
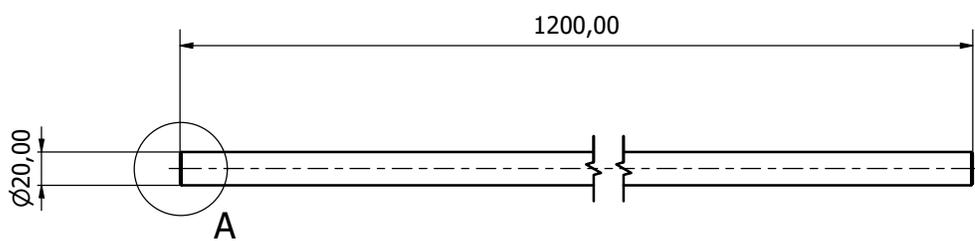
BARRA DEL PROYECTIL  
ESCALA 1:1



SOCKET DE TEFLÓN  
ESCALA 1:1

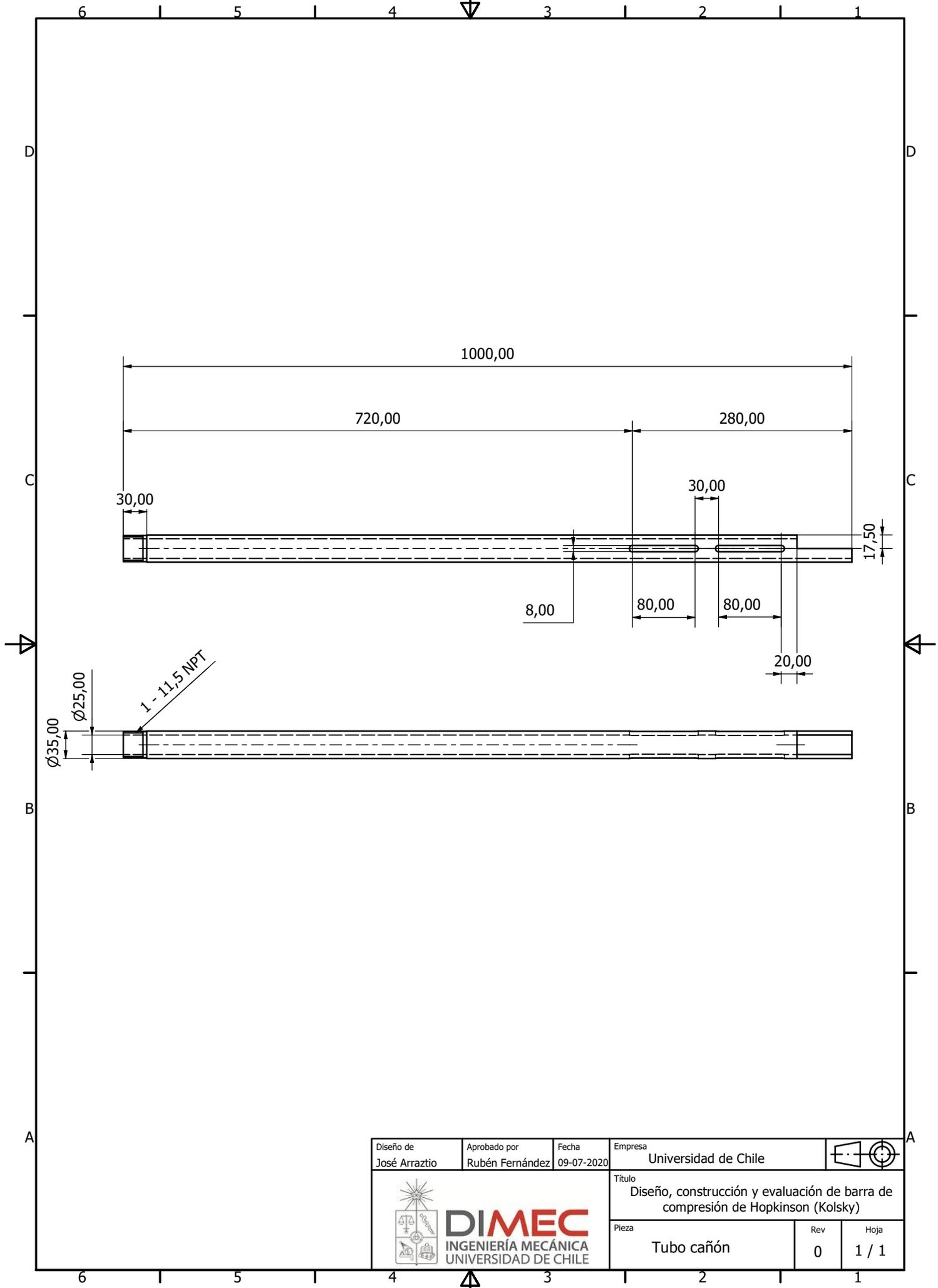
Diseño de José Arraztio	Aprobado por Rubén Fernández	Fecha 11-09-2020	Empresa Universidad de Chile	
			Título Diseño, construcción y evaluación de barra de compresión de Hopkinson (Kolsky)	
Pieza Proyectil			Rev 0	Hoja 1 / 1

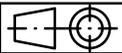


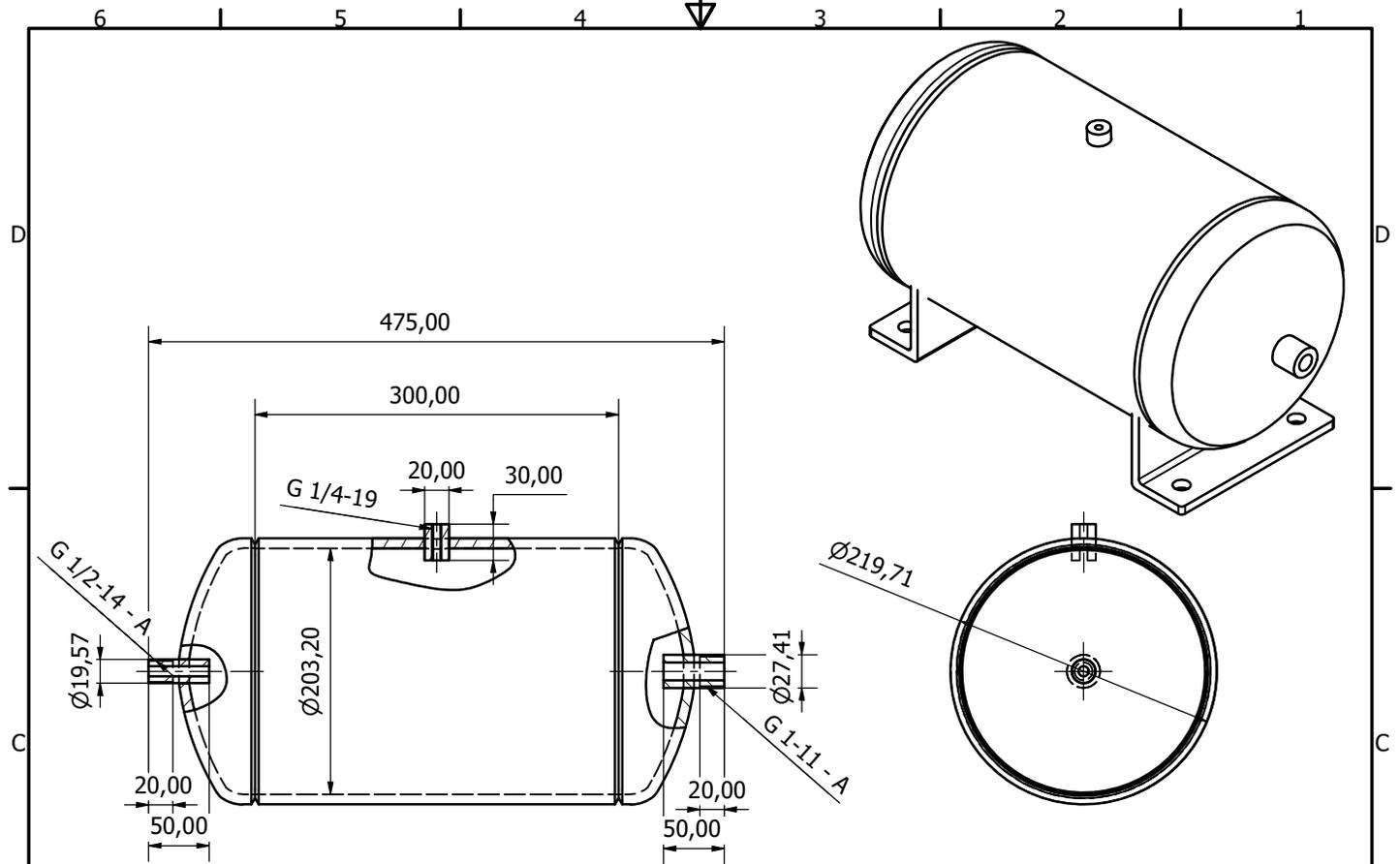


A ( 3 : 1 )

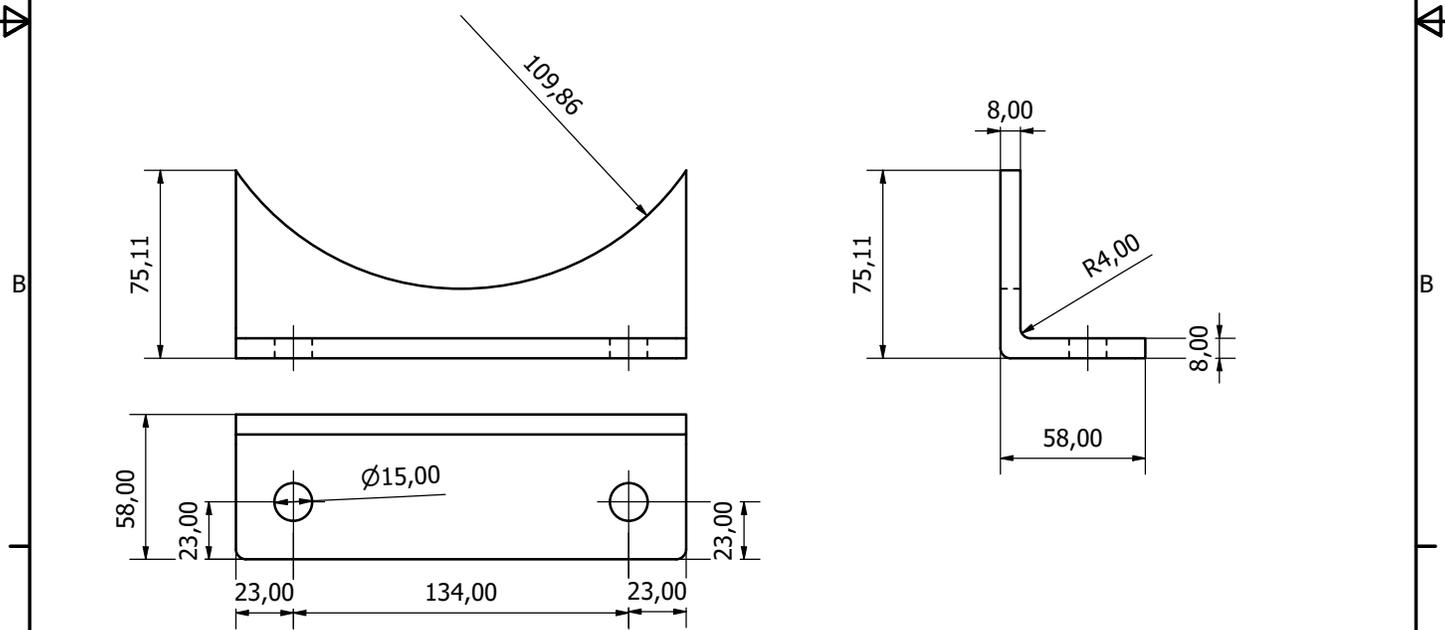
Diseño de José Arraztio	Aprobado por Rubén Fernández	Fecha 12-09-2020	Empresa Universidad de Chile	
			Título Diseño, construcción y evaluación de barra de compresión de Hopkinson (Kolsky)	
			Pieza barra	Rev 0



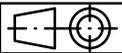
Diseño de José Arraztio	Aprobado por Rubén Fernández	Fecha 09-07-2020	Empresa Universidad de Chile	
 <b>DIMEC</b> INGENIERÍA MECÁNICA UNIVERSIDAD DE CHILE			Título Diseño, construcción y evaluación de barra de compresión de Hopkinson (Kolsky)	
			Pieza Tubo cañón	Rev 0

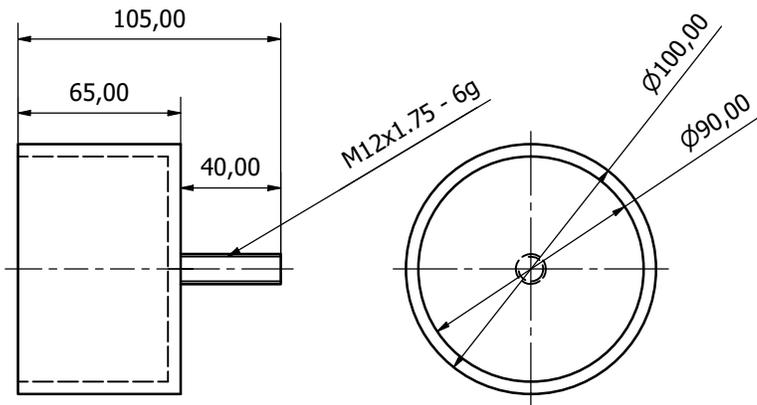


ESTANQUE  
ESCALA 1:4

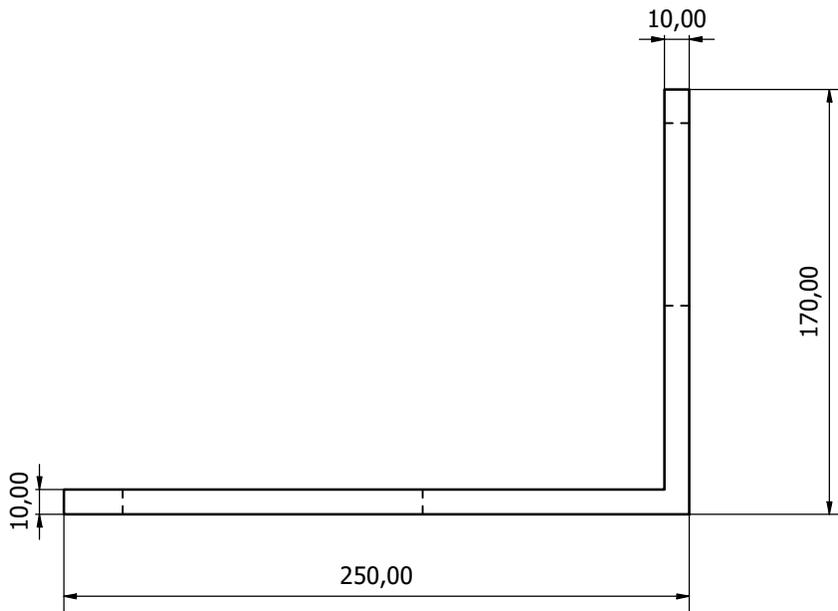
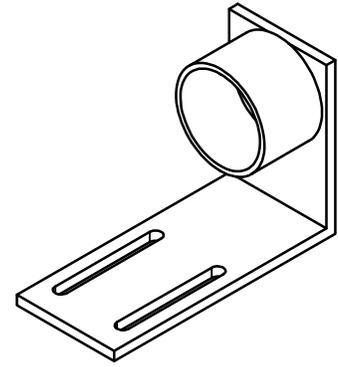


SOPORTE ESTANQUE  
ESCALA 1:2

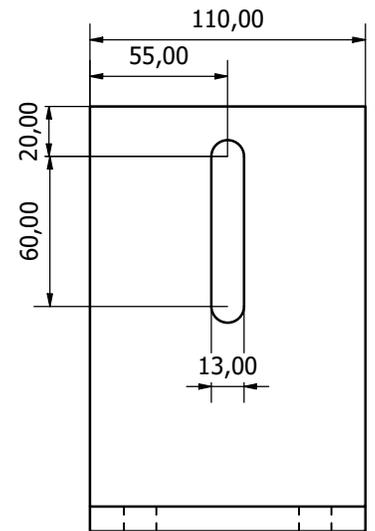
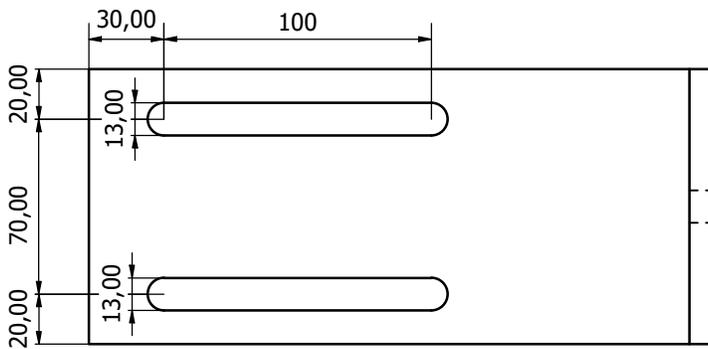
Diseño de José Arraztio	Aprobado por Rubén Fernández	Fecha 12-09-2020	Empresa Universidad de Chile		
 <b>DIMEC</b> INGENIERÍA MECÁNICA UNIVERSIDAD DE CHILE			Título Diseño, construcción y evaluación de barra de compresión de Hopkinson (Kolsky)		



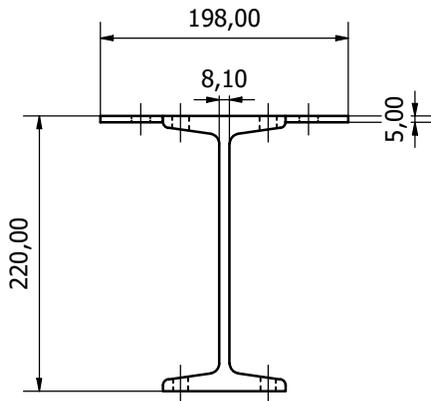
COPA  
ESCALA 1:2



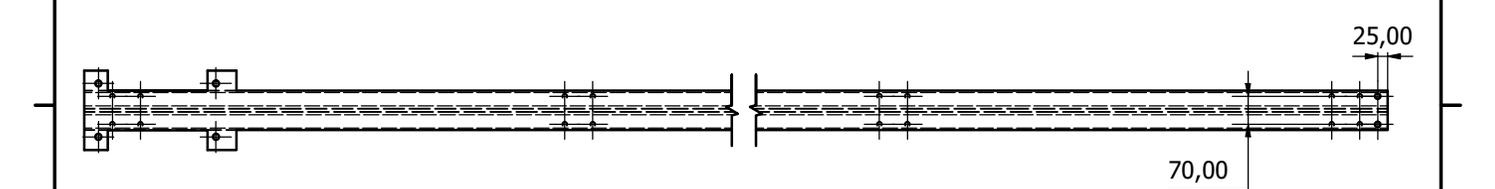
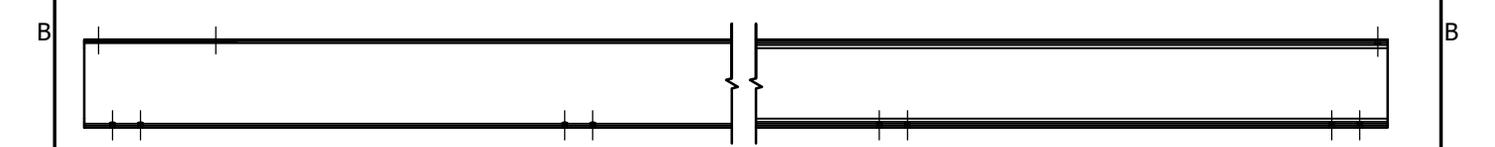
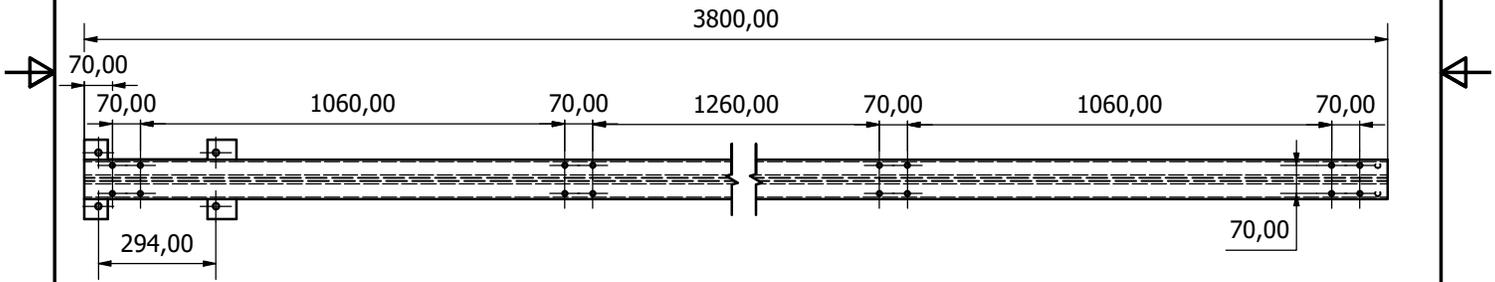
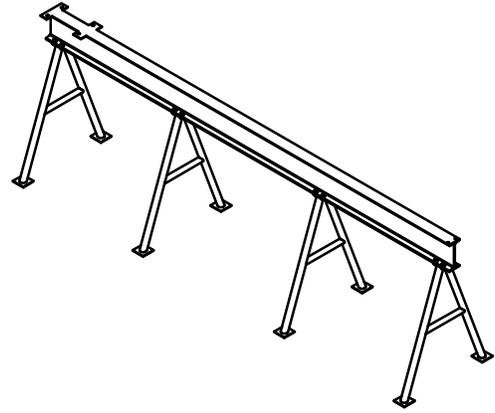
BASE TRAMPA  
ESCALA 1:2

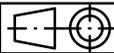


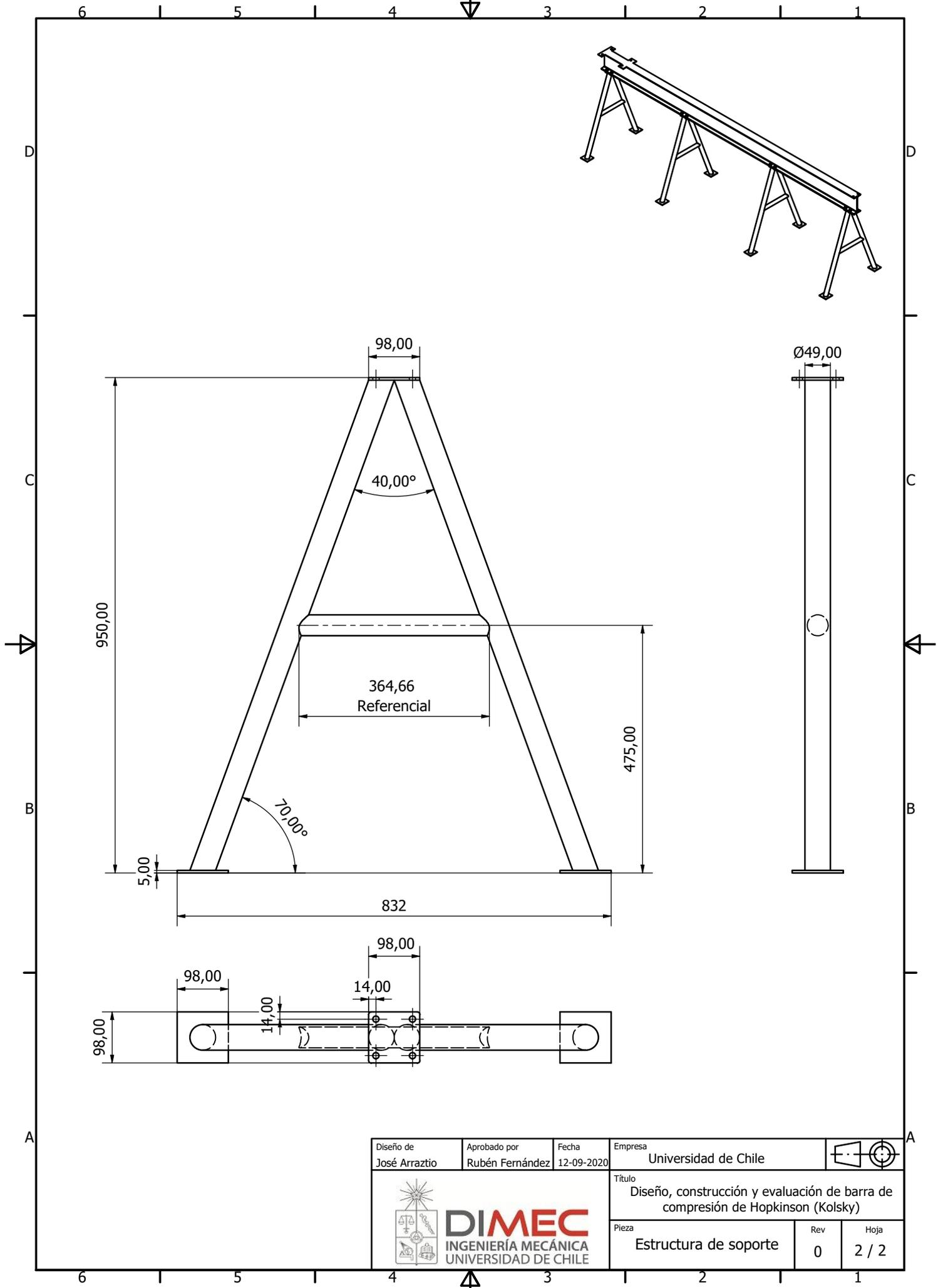
Diseño de José Arraztio	Aprobado por Rubén Fernández	Fecha 12-09-2020	Empresa Universidad de Chile		
			Título Diseño, construcción y evaluación de barra de compresión de Hopkinson (Kolsky)		
			Pieza Ensamblaje trampa	Rev 0	Hoja 1 / 1

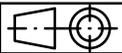


VISTA LATERAL  
ESCALA 1:4



Diseño de José Arraztio	Aprobado por Rubén Fernández	Fecha 12-09-2020	Empresa Universidad de Chile		
 <b>DIMEC</b> INGENIERÍA MECÁNICA UNIVERSIDAD DE CHILE			Título Diseño, construcción y evaluación de barra de compresión de Hopkinson (Kolsky)		



Diseño de José Arraztio	Aprobado por Rubén Fernández	Fecha 12-09-2020	Empresa Universidad de Chile		
 <b>DIMEC</b> INGENIERÍA MECÁNICA UNIVERSIDAD DE CHILE			Título Diseño, construcción y evaluación de barra de compresión de Hopkinson (Kolsky)		
			Pieza Estructura de soporte		

# Apéndice C

## Fotografías

Página intencionalmente dejada en blanco.

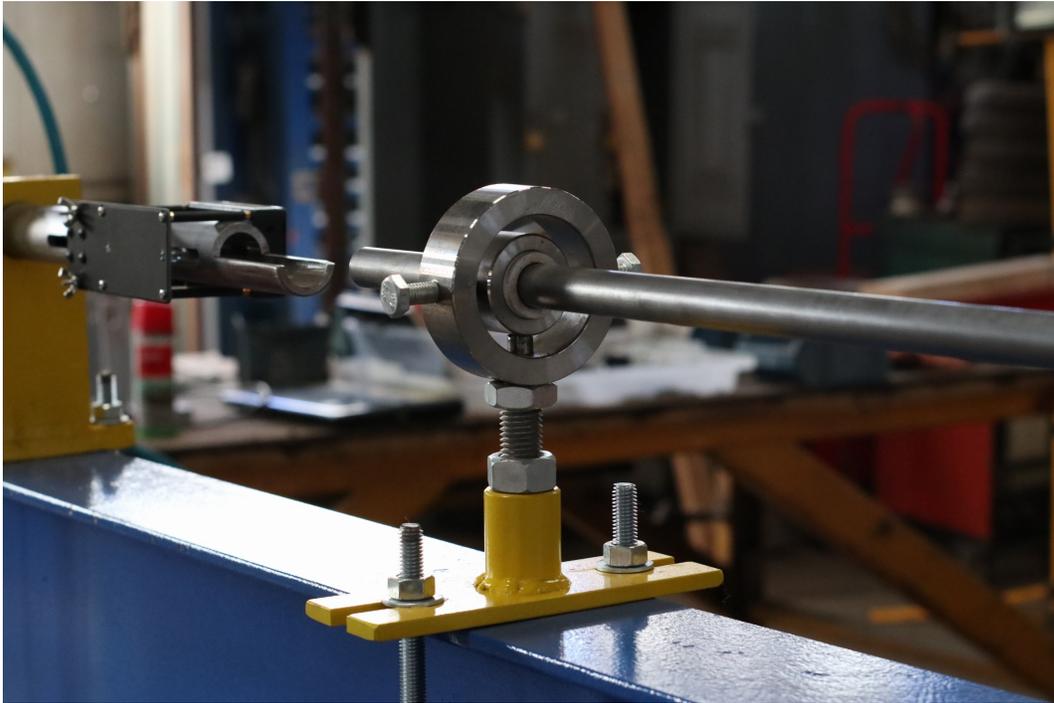


Figura C.1: Soporte de barra incidente montado en el equipo.

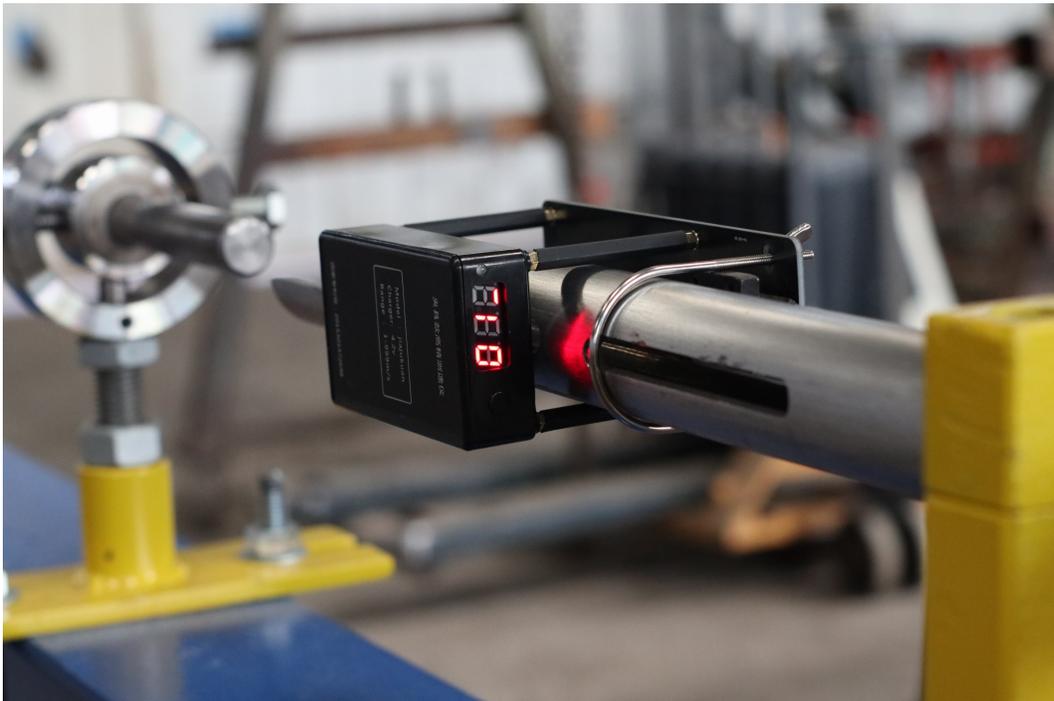


Figura C.2: Cronógrafo balístico X3200/E9800 montado sobre el cañón de lanzamiento.

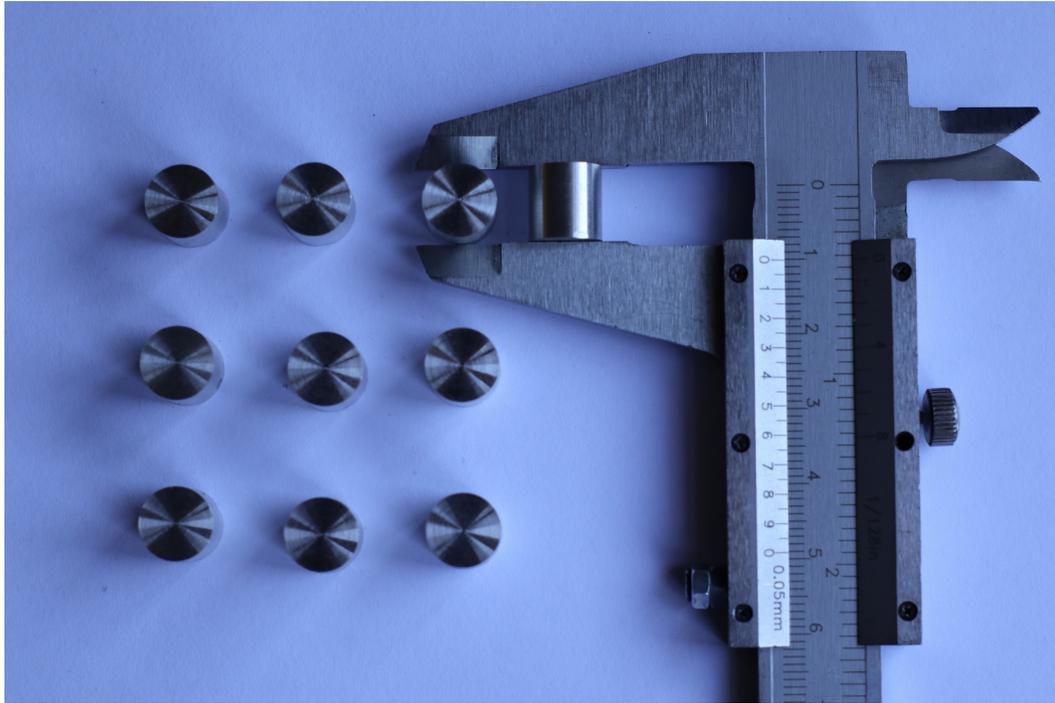


Figura C.3: Probetas de aluminio analizadas.

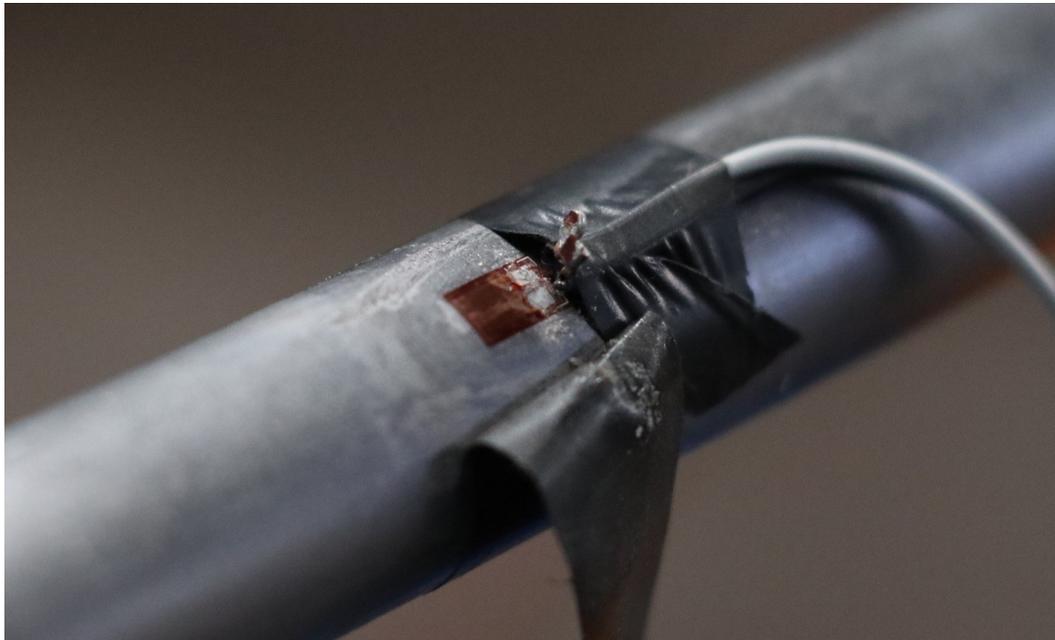


Figura C.4: Desprendimiento de cables soldados en configuración sin liberación de tensión.



Figura C.5: Trampa de momentum con barra impactada sobre plastilina.

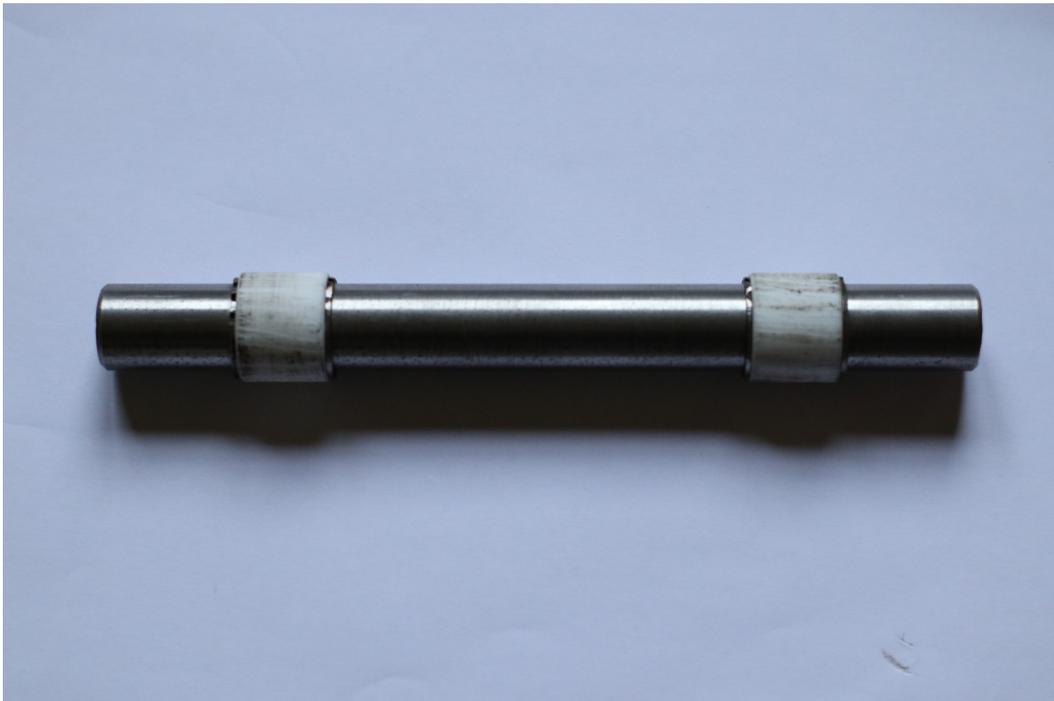


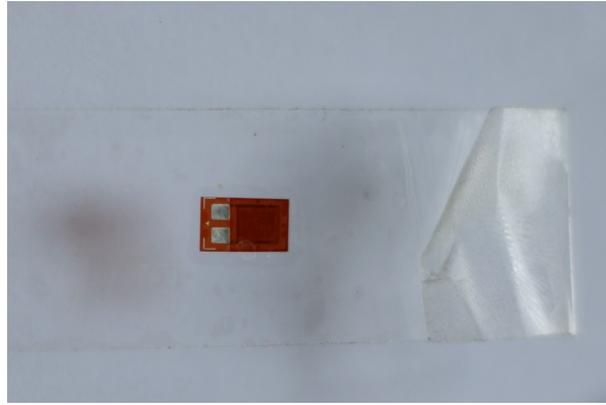
Figura C.6: *Striker* de acero SAE 1020 con bujes de teflón.



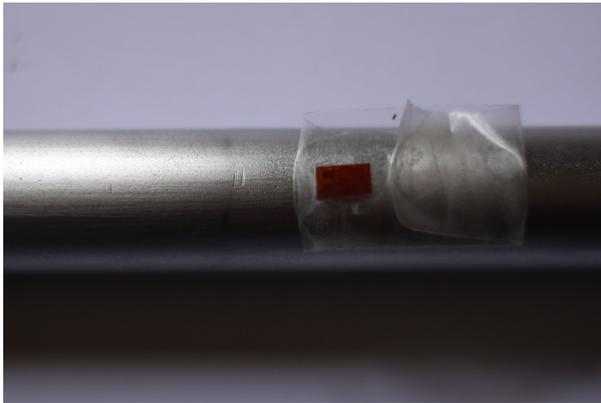
Figura C.7: Medición de masa del *striker*.



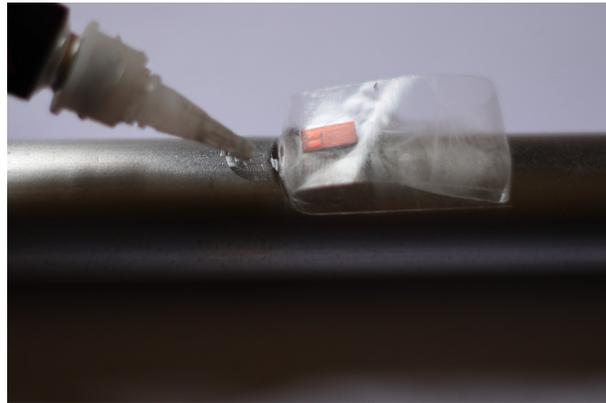
(a) Demarcación de posición.



(b) Preparación del *strain gage*.

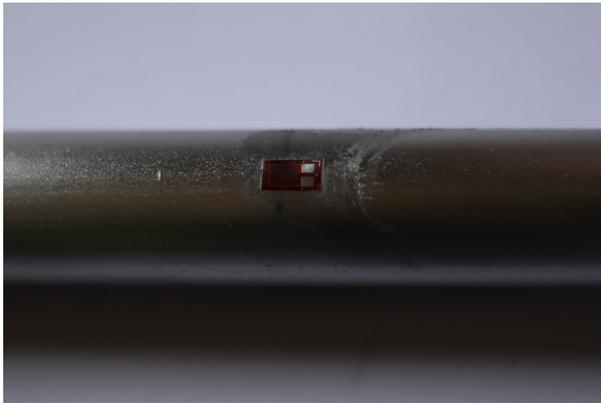


(c) Posicionamiento del *strain gage*.



(d) Adhesión del *strain gage*.

Figura C.8: Montaje del *strain gage*.



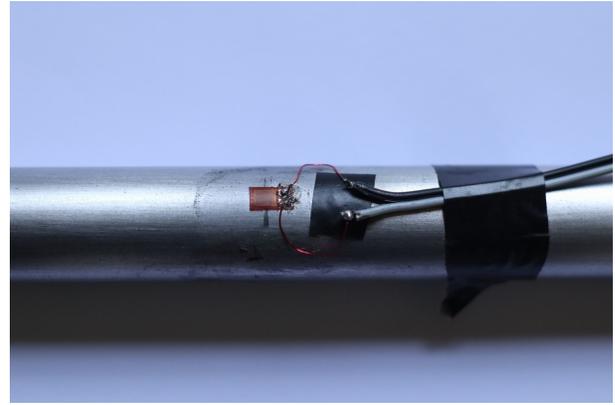
(a) Retiro de cinta adhesiva.



(b) Presoldadura de las pestañas del *strain gage*.



(a) Revisión de resistencia.



(b) Soldadura de los cables.



(c) Recubrimiento del *strain gage*.

Figura C.10: Montaje de *strain gages* (continuación).

# Apéndice D

## Procesamiento de señales

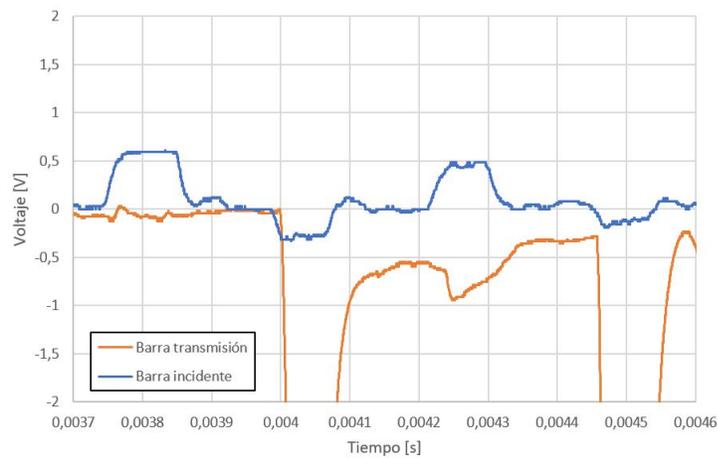


Figura D.1: Señal de onda de probeta 1 con falla de *strain gage* en barra de transmisión.

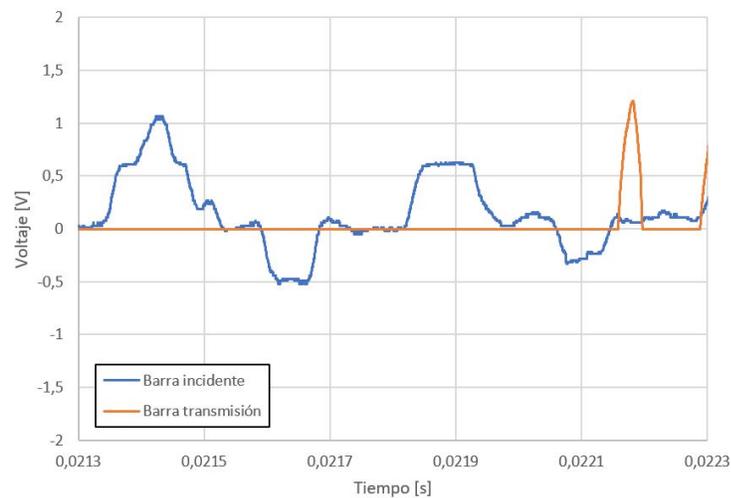


Figura D.2: Señal de onda de probeta 2 con falla de *strain gage* en barra de transmisión.

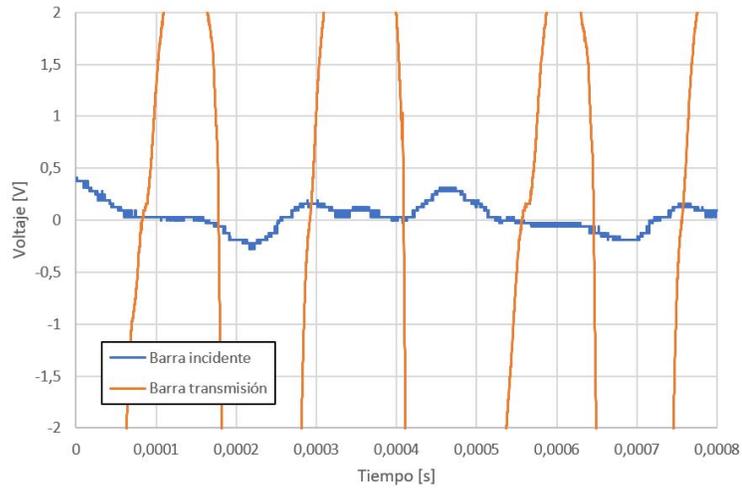


Figura D.3: Señal de onda de probeta 3 con falla de *strain gage* en barra de transmisión.

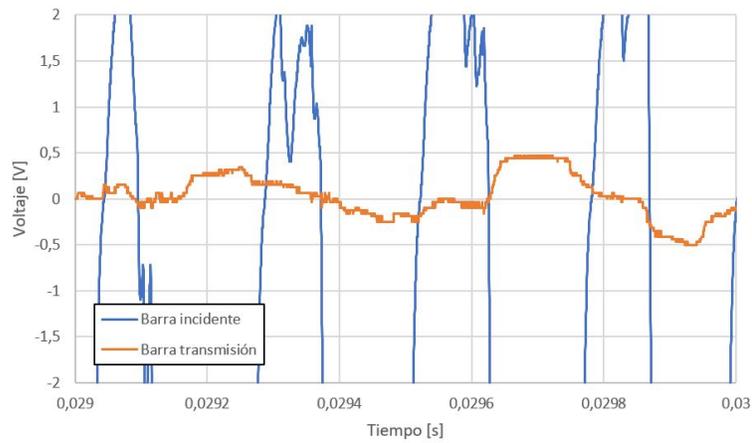


Figura D.4: Señal de onda de probeta 4 con falla de *strain gage* en barra incidente.

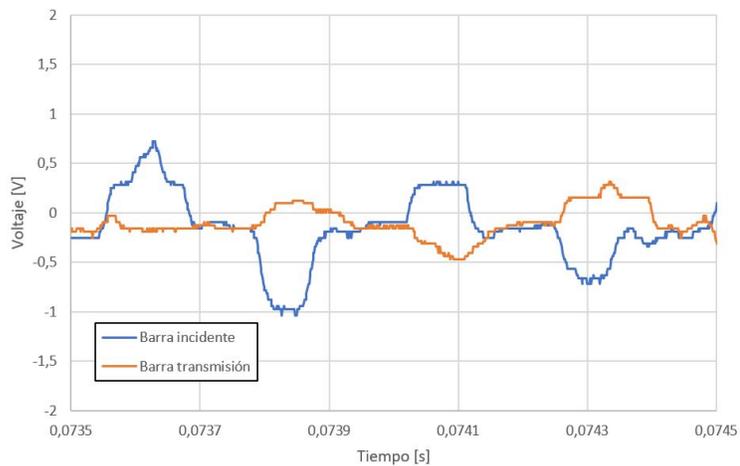


Figura D.5: Señal de onda de probeta 5.

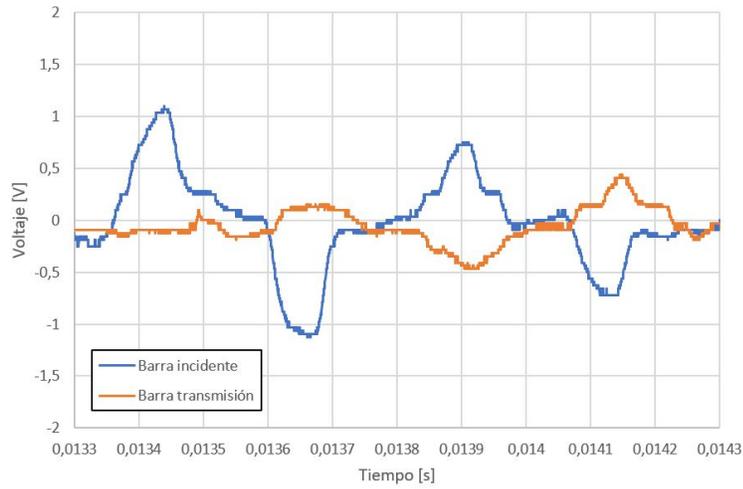


Figura D.6: Señal de onda de probeta 6.

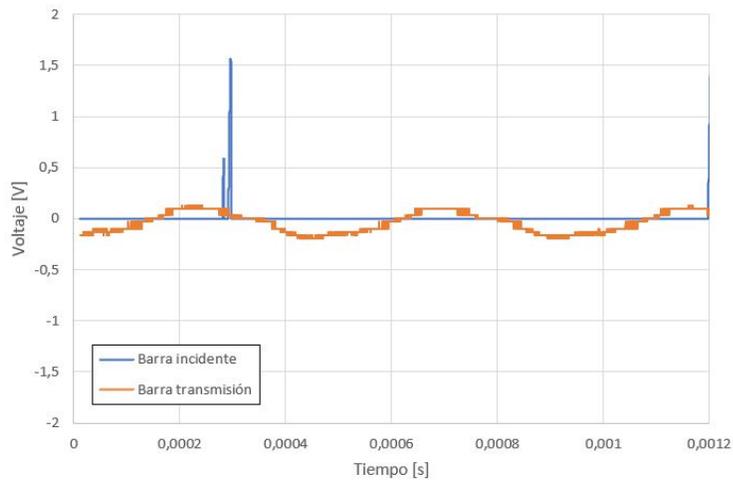


Figura D.7: Señal de onda de probeta 7 con falla de *strain gage* en barra incidente.

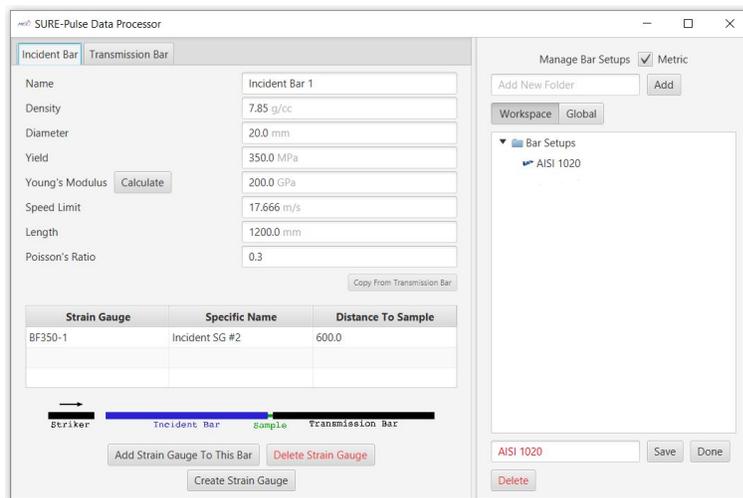


Figura D.8: Creación de espacio de trabajo en software SURE-Pulse.

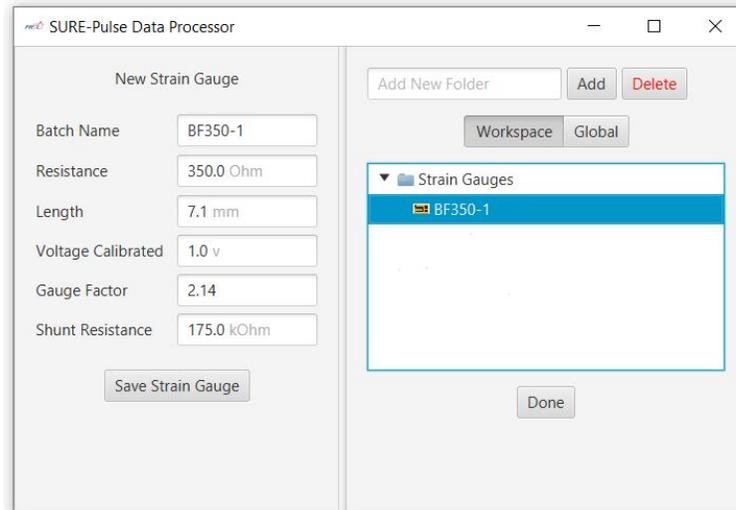


Figura D.9: Creación de nuevo *strain gage* en software SURE-Pulse.

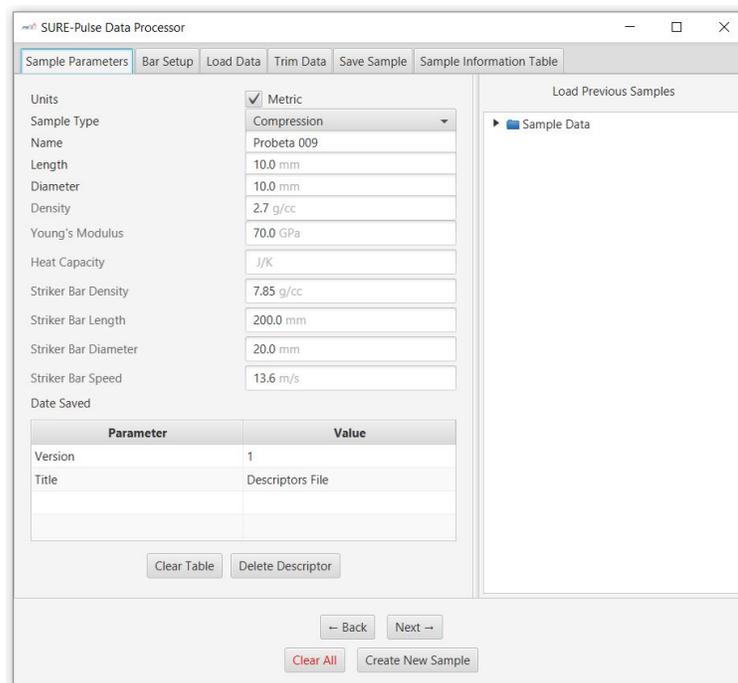


Figura D.10: Creación de nueva muestra en software SURE-Pulse.

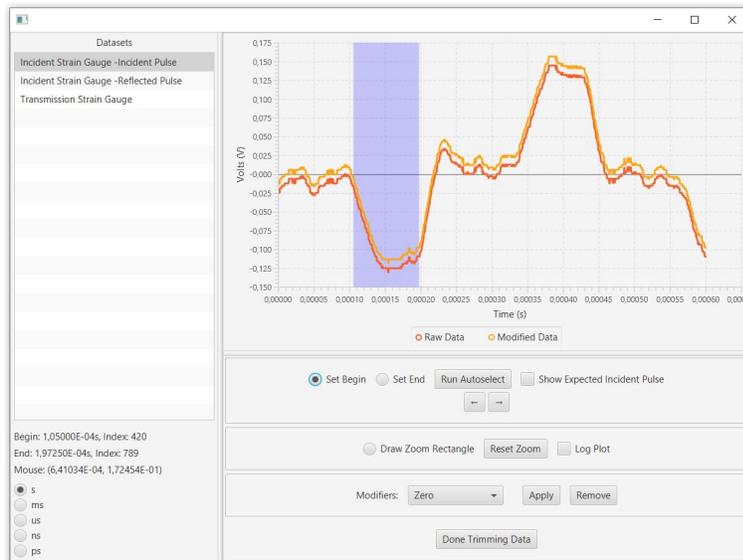


Figura D.11: Recorte de datos de señal en barra incidente en software SURE-Pulse.

# Apéndice E

## Matriz de riesgo

Página intencionalmente dejada en blanco.

Riesgo	Agente	Equipos	Causas	Probabilidad	Sistema de prevención existente /medidas preventivas	Observaciones	Consecuencia
Ruido	Gas	Sistema de lanzamiento	Propulsión de proyectil	Siempre	Equipo de protección personal, pared de contención.	El ruido causado por el sistema de lanzamiento es de gran magnitud, puede provocar sordera momentánea.	Moderada
Eléctrico	Voltaje, corriente	Fuente de poder de válvula neumática	Descuido al realizar actividades.	improbable	Revisión de conexiones	Revisar que la conexión se encuentre en buen estado antes de utilizar el equipo	Moderada
Aplastamiento	Impacto de proyectil	Sistema de lanzamiento, sistema de barras.	Manipulación del equipo cuando se encuentra cargado de presión	posible	Procedimiento de utilización	Al manipular la muestra y las barras se debe tener cuidado de no tener el estanque con presión.	Catastrófica
Fuga de gas	Gas	Conexiones y estanque de gas	Exceso de presión. Mal montaje de conexiones.	improbable	Equipo de protección personal, pared de contención.	Se debe asegurar de utilizar los implementos y mantener una distancia adecuada.	Mayor
Golpes	Desprendimiento de componentes o muestras. Explosión del estanque de gas	-	Sobrepresión del estanque. Mal montaje del equipo. Distancia inadecuada del ensayo.	Posible	Equipo de protección personal, pared de contención.	-	Catastrófica

Escala de Consecuencia	
Catastrófica	
Mayor	
Moderada	
Menor	
Insignificante	

Escala de Probabilidad	
Siempre	
Probable	
Posible	
Improbable	
Raro	