



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

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL Y NUMÉRICA DE BARRA DE COMPRESIÓN DE
HOPKINSON (KOLSKY)

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

DANIEL ESTEBAN HEVIA TORRES

PROFESOR GUÍA:
RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

MIEMBRO DE LA COMISIÓN:
VIVIANA MERUANE NARANJO
ALI AKBARIFAKHRABADI

SANTIAGO DE CHILE
2023

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: DANIEL ESTEBAN HEVIA TORRES
FECHA: 2023
PROF. GUÍA: RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL Y NUMÉRICA DE BARRA DE COMPRESIÓN DE HOPKINSON (KOLSKY)

Cold Spray es un proceso de manufactura aditivo en el que se realizan impactos a altas velocidades con polvo metálico hacia una matriz donde finalmente el polvo genera enlaces del tipo mecánicos con la matriz mejorando así las propiedades mecánicas; este método tiene usos en industrias de gran relevancia, entre ellas se encuentra la aeronáutica y aeroespacial. Para aportar a este proceso de manufactura con gran potencial es que se establece validar la configuración experimental denominada "Barra de compresión Hopkison", SHPB (por sus siglas en inglés) de ahora en adelante, de manera experimental y numérica, ubicada en el taller Mecánico de la Universidad de Chile. Tema abordado en memorias previas del departamento de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile donde se construyó y se modificó el montaje experimental. Sin embargo, la adquisición de datos no ha sido posible. Para lograr lo anterior es que se modifica el circuito y sus las incertidumbres eléctricas de manera de obtener resultados válidos para los ensayos. Para validar la máquina se realizan simulaciones numéricas del experimento en el software *Abaqus CAE* para aluminio 2017 y cobre C1100 utilizando el modelo de deformación a altas velocidades Johnson-Cook. De las simulaciones se extraen curvas de deformación en el tiempo las que permiten predecir el comportamiento de la SHPB y así guiar el trabajo experimental. Se procede a la experimentación con los materiales utilizados en la simulación, extrayendo datos en forma de voltaje en el tiempo con muestras de aluminio 2017 y cobre C1100 que son cilindradas y refrentadas a partir de barras de mayor largo y diámetro a 10[mm] de diámetro y 10 [mm] de alto. Las curvas en el tiempo simuladas y experimentales pasan por un software de post procesamiento *SURE-pulse* el que permite obtener curvas de esfuerzo deformación. Las curvas se les hace un ajuste Johnson-Cook con el software *Excel*, usando la herramienta *solver* para un problema de optimización no lineal para extraer los parámetros Johnson-Cook. La desviación de estos parámetros respecto a los valores de la literatura indica la precisión de la instrumentación y de las simulaciones. Finalmente se repite la metodología experimental para obtener parámetros Johnson-Cook para la aleación de titanio Ti6Al4V. Los resultados experimentales muestran una clara tendencia hacia las simulaciones, en particular los parámetros Johnson-Cook tienen un bajo error porcentual en comparación a la literatura, validando el montaje experimental para estudios futuros.

*Para mi mamá, papá,
hermano,
mi nani y tía Vero.
Los artífices de este proceso.*

Agradecimientos

Este trabajo y este proyecto de 6 años no podría haber sido posible sin la influencia de mis padres Elizabeth y Juan, quienes lo dieron todo y más por lograr que sus hijos alcanzaran más, guiando los pasos a través de los años con amor y disciplina. Me gustaría que me vieras llevar tu sueño hecho realidad papá.

Mi hermano Eleazar quien con su personalidad siempre haya la manera de sacar un sonrisa y hacer la vida más llevadera. Mi nani y mi tía Vero, mis segundas madres que siempre estuvieron ahí en todo momento de mi crecimiento y que siempre me impulsaron a llegar a más.

Victor Manríquez, mi profesor y amigo quien siempre me dió el consejo de sabiduría para afrontar la vida como un adulto responsable.

Mis amigos entrañables Matias, Darwin, Ariel, Javier y Felipe, por los momentos que hemos vividos todos estos años y los que vendrán. Los quiero.

Gracias a la gente que estuvo en este proceso universitario: Jota, Joaco, Joche, Tomás N, Paulita, Vincko, Tomás B, Arturo, Daniel y Carlos. Quienes llegaron a mi vida por simple convivencia en la universidad y se convirtieron en parte de mi familia. A todos quienes fueron partícipes del grupo 4 ternas y aportaron su granito los primeros años para hacer la universidad una instancia no tan solo de estudio, muchas gracias.

A Rubén por su paciencia infinita estos últimos 10 meses, gracias por darme la oportunidad de desarrollar este trabajo y el apoyo para poder terminarlo.

Y gracias a mi, por no rendirme bajo ninguna circunstancia que se me presenta en la vida y siempre creer en mi.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. General	2
1.2.2. Específicos	2
1.3. Alcances	2
2. Antecedentes	4
2.1. Comportamiento de materiales a altas tasas de deformación	4
2.1.1. Modelo de deformación Johnson-Cook	6
2.2. Fundamentos de la barra de compresión Hopkinson	6
2.2.1. Descripción de un sistema barra de compresión Hopkinson	7
2.2.2. Sistema de lanzamiento	7
2.2.3. Sistema de barras	8
2.2.4. Sistema de adquisición	8
2.2.5. Muestras	8
2.3. Fundamentos de la SHPB	8
2.4. Descripción de la configuración experimental SHPB existente	11
2.4.1. Componentes mecánicos	12
2.4.1.1. Estanque de aire comprimido	12
2.4.1.2. Cañón de aire comprimido	13
2.4.1.3. Proyectoil y barras	13
2.4.1.4. Trampa de momentum	15
2.4.1.5. Estructura de soporte	15
2.5. Estimación de la velocidad de impacto	16
2.5.1. Velocidad máxima admisible del sistema	16
2.5.2. Pérdida de carga durante el lanzamiento	16
2.5.3. Modelo de estimación de la velocidad de impacto	17
2.6. Método de elementos finitos	19
2.6.1. Mallado	20
2.6.2. Método de solución explícita	21
3. Metodología	22
3.1. General	22
3.2. Mejoras de la adquisición de datos	23
3.3. Pruebas en la SHPB en aluminio y cobre	23
3.4. Simulación numérica para aluminio y cobre para la SHPB	23

3.5.	Extracción y contraste de resultados experimentales y simulados	26
3.6.	Determinación de parámetros Johnson-Cook de aleación de titanio (Ti6Al4V)	30
4.	Mejoras del equipo	32
4.1.	Mejoras de la adquisición de datos	32
4.1.1.	Circuito de adquisición de onda	32
4.1.2.	PCB del circuito	34
4.1.3.	Resultado de las mejoras	35
4.2.	Instrumentación de trabajo	37
4.2.1.	Suministro eléctrico	37
4.2.1.1.	Obtención de datos	37
5.	Resultados y análisis	39
5.1.	Simulación numérica para aluminio y cobre para la SHPB	39
5.1.1.	Análisis de sensibilidad de malla	40
5.2.	Pruebas en la SHPB en aluminio y cobre	41
5.3.	Obtención de curvas esfuerzo deformación y extracción de parámetros Johnson-Cook	43
5.3.1.	Curvas de esfuerzo deformación	43
5.3.2.	Extracción de parámetros Johnson-Cook	47
5.4.	Determinación de parámetros Johnson-Cook aleación de titanio (Ti6Al4V) .	50
5.4.1.	Ensayos	50
5.4.2.	Curva esfuerzo deformación y extracción de parámetros Johnson-Cook	51
6.	Conclusiones y recomendaciones	53
	Bibliografía	54
	Anexos	56
A.	<i>Checklist</i> para la realización de ensayos [16]	56
B.	Curvas deformación en el tiempo simuladas	59
B.1.	Simulación Aluminio 2017	59
B.2.	Simulación cobre C1100	61
C.	Curvas deformación experimentales	63
C.1.	Ensayos aluminio 2017	63
C.2.	Ensayos cobre C1100	65
C.3.	Ensayos titanio Ti6Al4V	67

Índice de Tablas

2.1.	Propiedades mecánicas acero 4340.	14
3.1.	Parámetros ingresados en <i>Abaqus CAE</i>	25
3.2.	Propiedades galgas extensiométricas insertadas en SURE-pulse.	27
3.3.	Propiedades barras acero 4340 insertadas en SURE-pulse.	27
3.4.	Propiedades proyectil insertadas en SURE-Pulse.	27
3.5.	Propiedades muestras introducidas en SURE-pulse.	28
3.6.	Parámetros Johnson-Cook iniciales[18].	30
4.1.	Amplitud del ruido de circuito previo y modificado	37
5.1.	Comparación parámetros Johnson-Cook de la literatura (Lit) con las simulaciones (Sim) y experimentales (Exp) con sus respectivos errores porcentuales[18].	47
5.2.	Parámetros Johnson-Cook aleación de titanio	51

Índice de Ilustraciones

1.1.	Esquematación del proceso de Cold spray	1
2.1.	Esfuerzo en función de tasas de deformación y su relación con eventos en metales [5].	5
2.2.	Aspectos dinámicos de ensayos mecánicos [5].	5
2.3.	Diagrama SHPB [8].	7
2.4.	Diagrama de propagación onda de deformación [8].	9
2.5.	Esquema de la zona de ensayo [8].	10
2.6.	Representación ideal de la onda de deformación [9].	11
2.7.	Disposición general del sistema SHPB.	12
2.8.	Sistema construido y ensamblado.	12
2.9.	Estanque de aire comprimido[9].	13
2.10.	Compresor PROMaker PRO-CP50.	13
2.11.	Cañón de aire comprimido[9].	13
2.12.	Disposición barra con soportes [9].	14
2.13.	Proyectil [9].	14
2.14.	Soportes [9].	15
2.15.	Diseño trampa de momentum [9].	15
2.16.	Estructura de soporte [9].	16
2.17.	Secuencia de la presión dentro del sistema de lanzamiento [11].	17
2.18.	Diagrama general simplificado del movimiento del proyectil [12].	18
2.19.	Modelo de presión [12].	18
2.20.	Comportamiento de la presión respecto al proyectil [12].	18
2.21.	Análisis de elementos finitos aplicado a un cilindro y una fuerza externa aplicada de manera horizontal.	20
2.22.	Tipos de mallado en Abaqus [14].	21
2.23.	Refinado de malla.	21
3.1.	Procedimiento de trabajo.	22
3.2.	Elementos de la simulación.	24
3.3.	Ensamble simulación SHPB.	24
3.4.	Malla refinada en barras.	25
3.5.	Pulso de deformación barra incidente simulación.	26
3.6.	Selección de pulso reflejado en barra incidente.	29
3.7.	Curva esfuerzo deformación extraído a través de los pulsos de deformación.	29
3.8.	Diagrama del modelo de optimización de parámetros.	30
4.1.	Galgas extensiométricas BF350-3AA con filamentos previamente soldados [16]	32
4.2.	Potenciómetro de precisión Bourns 3590S [16]	33
4.3.	Amplificador operacional LM324N [21]	33
4.4.	Circuito integrado TC7662A	34

4.5.	Esquematación del circuito mejorado	34
4.6.	PCB del sistema de adquisición	35
4.7.	Ensayo de aluminio 2017 a 24.1[m/s].	36
4.8.	Ensayo de aluminio 2017 a 24.8[m/s].	36
4.9.	Fuente de poder ele-tech modelo HY60-06	37
4.10.	Osciloscopio Atten ADS1102CAL	38
5.1.	Análisis axisimétrico con muestra de aluminio deformada a 20[m/s]	39
5.2.	Pulso de deformación simulado aluminio 20[m/s].	40
5.3.	Análisis de sensibilidad de malla simulación Cobre C1100 a 20[m/s].	41
5.4.	Muestras de aluminio 2017 ensayadas.	42
5.5.	Muestras de cobre C1100 ensayadas.	42
5.6.	Pulso de deformación voltaje versus cantidad de datos para aluminio ensayado a 29.5[m/s].	43
5.7.	Curva esfuerzo deformación simulada aluminio.	44
5.8.	Curva esfuerzo deformación experimentada aluminio.	45
5.9.	Curva esfuerzo deformación simulada cobre.	45
5.10.	Curva esfuerzo deformación experimentada cobre.	46
5.11.	Curvas esfuerzo deformación simulada (20[m/s]) versus experimental (20.1[m/s]) ensayo en aluminio	46
5.12.	Curva esfuerzo deformación simulada del aluminio 2017 con ajuste Johnson-Cook.	48
5.13.	Curva esfuerzo deformación experimental del aluminio 2017 con ajuste Johnson-Cook.	48
5.14.	Curva esfuerzo deformación simulada del cobre C1100 con ajuste Johnson-Cook.	49
5.15.	Curva esfuerzo deformación experimental del cobre C1100 con ajuste Johnson-Cook.	49
5.16.	Muestras de titanio Ti6Al4V ensayadas	50
5.17.	Onda de deformación en voltaje versus cantidad de datos para titanio ensayado a 25.1[m/s]	50
5.18.	Curvas esfuerzo deformación experimental del titanio	51
5.19.	Curvas esfuerzo deformación experimental de titanio con ajuste Johnson-Cook	52
B.1.	Curva de deformación simulada aluminio 2017 a 20[m/s]	59
B.2.	Curva de deformación simulada aluminio 2017 a 25[m/s]	59
B.3.	Curva de deformación simulada aluminio 2017 a 30[m/s]	60
B.4.	Curva de deformación simulada aluminio 2017 a 30[m/s]	60
B.5.	Curva de deformación simulada cobre C1100 a 20[m/s]	61
B.6.	Curva de deformación simulada cobre C1100 a 25[m/s]	61
B.7.	Curva de deformación simulada cobre C1100 a 30[m/s]	62
B.8.	Curva de deformación simulada cobre C1100 a 35[m/s]	62
C.1.	Curva deformación experimental aluminio 2017 a 20.1[m/s]	63
C.2.	Curva deformación experimental aluminio 2017 a 24.8[m/s]	63
C.3.	Curva deformación experimental aluminio 2017 a 29.5[m/s]	64
C.4.	Curva deformación experimental aluminio 2017 a 33.9[m/s]	64
C.5.	Curva deformación experimental cobre C1100 a 19.6[m/s]	65
C.6.	Curva deformación experimental cobre C1100 a 25.0[m/s]	65
C.7.	Curva deformación experimental cobre C1100 a 29.5[m/s]	66
C.8.	Curva deformación experimental cobre C1100 a 34.8[m/s]	66
C.9.	Curva deformación experimental titanio Ti6Al4V a 20.3[m/s]	67

C.10.	Curva deformación experimental titanio Ti6Al4V a 25.1[m/s]	67
C.11.	Curva deformación experimental titanio Ti6Al4V a 29.2[m/s]	68
C.12.	Curva deformación experimental titanio Ti6Al4V a 34.1[m/s]	68

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Cold Spray es un proceso de manufactura desarrollada en los años 80, usada originalmente como forma de revestimiento. En este proceso se usan gases comprimidos a altas temperaturas que funcionan como propulsores para acelerar polvo, usualmente metálico, a velocidades supersónicas los cuales impactan a una matriz la cuál queda cubierta por una capa de polvo metálico. Este polvo metálico queda unido a la matriz por enlaces del tipo mecánico dada a las grandes velocidades que se usan [1]. Actualmente es usado como un proceso de manufactura aditiva que tiene gran potencial para el área aeronáutica y aeroespacial.

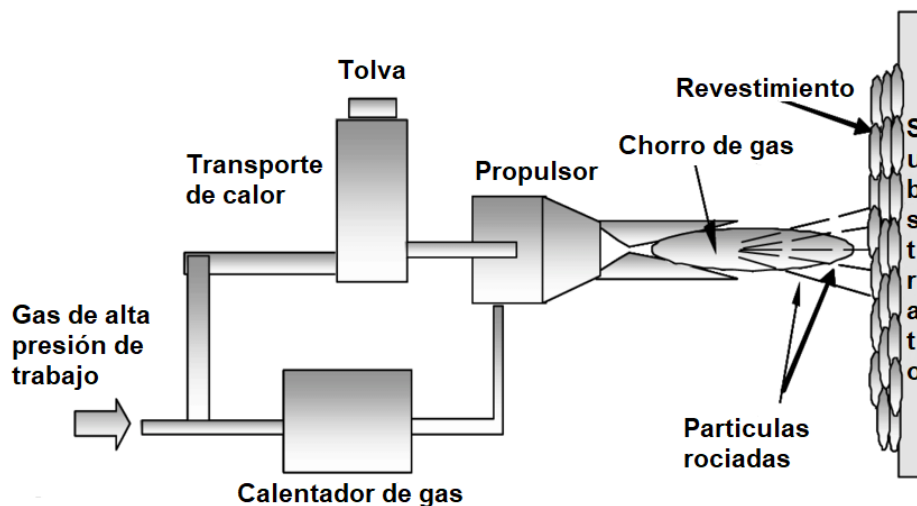


Figura 1.1: Esquemmatización del proceso de Cold spray

Para entender el funcionamiento de este proceso de manufactura hay que tener entendimiento de que cómo funciona a nivel micro. El modelo de Johnson-Cook permite lo anterior ya que es un modelo de deformación a altas velocidades dónde se usan parámetros propios del material, deformación, tasas de deformación y temperaturas. Con un entendimiento más completo de qué es lo ocurre a nivel micro para materiales a los que se les realiza Cold spray se espera una refinación del proceso en el corto-mediano plazo. Mencionado lo anterior es que este trabajo busca añadir un aporte teórico y práctico al estudio del proceso de manufactura

mencionado, que tiene un potencial importante para años venideros.

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Evaluar y validar una Barra de Compresión Hopkinson mediante métodos numéricos y experimentales para determinar parámetros Johnson-Cook.

1.2.2. Específicos

Para realización del objetivo principal de este trabajo de título es que el trabajo se divide en 5 objetivos específicos, los cuales son:

- Realizar mejoras al sistema de adquisición de datos.
- Simular, obtener curvas de esfuerzo deformación y extraer parámetros Johnson-Cook para aluminio 2017 y cobre C1100 utilizando parámetros provenientes de la literatura.
- Determinar experimentalmente parámetros Johnson-Cook para aluminio 2017 y cobre C1100.
- Validar la instrumentación, comparando parámetros Johnson-Cook experimentales y simulados.
- Obtener parámetros Johnson-Cook para aleación de titanio Ti6Al4V.

1.3. Alcances

Los alcances del presente trabajo de título se presentan en la siguiente lista:

- El entorno del trabajo experimental se realiza con la instrumentación ubicada en el taller mecánico del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile. Se usa la barra de Compresión Hopkinson para obtener curvas de deformación en forma de voltaje a través del tiempo.
- El modelo que se utiliza para el cálculo de las deformaciones es el de Johnson-Cook, cuyas variables que se controlan son las relacionadas con las constantes propias del material, la deformación, tasa de deformación y no con la temperatura.
- Los materiales sometidos a las pruebas corresponden a aluminio (Al 2017), cobre (Cu C1100) y una aleación de titanio (Ti6Al4V); los dos primeros son materiales estudiados para el modelo de Johnson-Cook y el tercero es un material que ha sido vagamente estudiado y para el que se busca obtener resultados consolidados. Se trabajan con muestras de 10 [mm] de diámetro y 10[mm] de alto cilindradas y rectificadas a partir de barras de mayor largo y diámetro.
- Para las simulaciones con métodos numéricos se trabaja mediante el método de elementos finitos en 2 dimensiones axisimétrico con el software comercial *Abaqus CAE* [2], se trabaja en conjunto a la Universidad de Ottawa para tener el acceso al programa.

- El post-procesamiento de las señales obtenidas tanto de las simulaciones y experimentos se realiza en el software gratuito *SURE-pulse* [3].
- La extracción de parámetros Johnson-Cook se realiza mediante la herramienta *Solver* de *Excel*[4] donde se realiza un ajuste de curva mediante la ecuación Johnson-Cook, este ajuste se realiza en el rango de deformación de 0 a 0.01[mm/mm].

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Comportamiento de 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.

La variación de la resistencia del material con una tasa de deformación aplicada es una consideración importante en el diseño de tipos de materiales a usar en estructuras sometidas a cargas aplicadas de manera instantánea. Se ha observado que para muchos materiales que el esfuerzo crece rápidamente con la tasa de deformación para una carga aplicada de manera repentina. En la Figura 2.1 se representa la importancia física del evento relacionado con la tasa de deformación de metales y el tipo de esfuerzo a que se someten y sus cambios. [5].

Adicionalmente a lo anterior, el tipo de forma de estudio de las tasas de deformación a rangos de tiempos de carga característicos se muestran en la figura 2.2 definiendo entre otras cosas el método de carga, régimen de velocidad de deformación y la dinámica de los sucesos que tienen que considerarse para realizar pruebas en el régimen especificado.

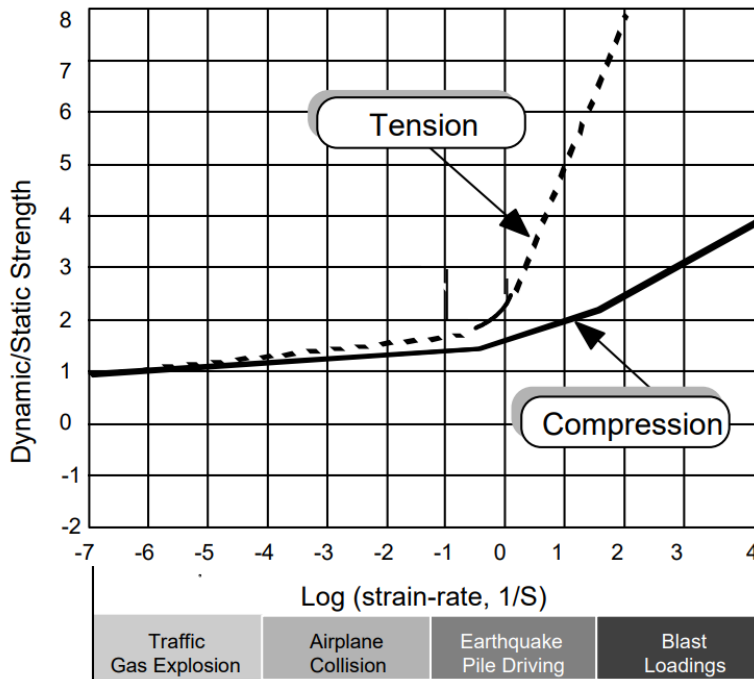


Figura 2.1: Esfuerzo en función de tasas de deformación y su relación con eventos en metales [5].

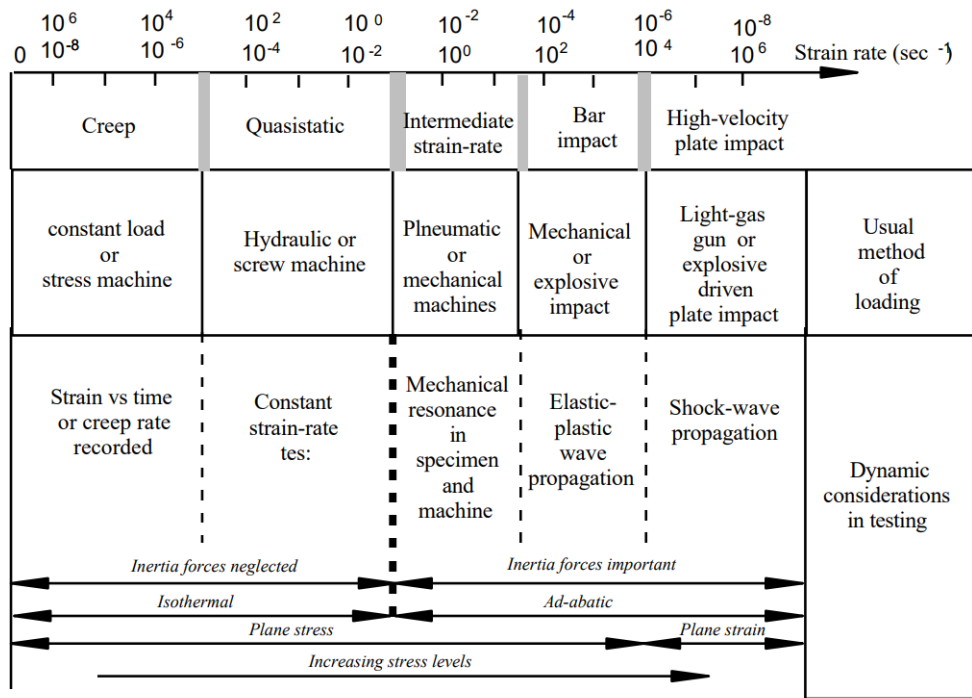


Figura 2.2: Aspectos dinámicos de ensayos mecánicos [5].

Lo anterior es un resultado importante ya que valida el método de estudio aplicado a la SHPB ya que las tasas de deformación a que se estudian van desde los 10^2 y 10^4 [seg⁻¹].

2.1.1. Modelo de deformación Johnson-Cook

Este modelo de deformación a altas velocidades fue propuesto para representar el efecto de la deformación, tasa de deformación y temperatura en una onda de esfuerzo en materiales metálicos. La ecuación que relaciona los concepto anterior se presentan en ecuación 2.1, donde ε es la deformación plástica equivalente, $\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ es la tasa de deformación adimensional aplicado para $\dot{\varepsilon}_0 = 1/s$, T_r y T_m son la temperatura ambiente y de fusión respectivamente [6].

$$\sigma = [A + B \cdot \varepsilon^n] \left[1 + C \cdot \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \frac{T - T_r}{T - T_m} \right]^m \quad (2.1)$$

La primera parte de la ecuación entrega el esfuerzo en función de la deformación para $\dot{\varepsilon}_0 = 1/s$ y $T = T_r$. La segunda parte representa el efecto de la tasa de deformación y la tercera muestra las consecuencias de la temperatura. La simplicidad de este modelo es el por qué se utiliza de gran manera, pero tiene algunos inconvenientes al momento de representar las características del endurecimiento para todos los tipos de materiales. El término de la tasa de deformación de endurecimiento de la segunda parte de la ecuación es expresada como una función lineal del logaritmo de la tasa de deformación, esta expresión no puede representar de manera precisa el límite elástico inicial a diferentes tasas de deformación. Dada la expresión la deformación de endurecimiento en la primera parte de la ecuación 2.2, el límite plástico inicial es predicho con el cambio del logaritmo de la tasa de deformación, tal como se aprecia en la segunda parte de la Ecuación 2.2. Es importante tener en consideración que lo anterior no es válido para todos los tipos de materiales metálicos en general [6].

Las constantes del modelo A, B, n, C y m se pueden extraer dependiendo del material que se esté trabajando; la constante A corresponde al límite de fluencia del material, B es la pendiente de la zona plástica de la curva real de esfuerzo deformación, n es el exponente de endurecimiento por deformación y representa la forma de la zona plástica (curva o lineal), C es el coeficiente de endurecimiento por tasa de deformación y es el encargado de reflejar el efecto en el esfuerzo dada una tasa de deformación [6]. Para el caso de este trabajo de título la constante que determinar el efecto de la temperatura (m) no es considerado ya que las condiciones experimentales dentro del taller mecánico permiten realizar un control riguroso de esta. Debido a lo anterior es que la ecuación 2.2 muestra la expresión simplificada que se utiliza para este trabajo.

$$\sigma = [A + B \cdot \varepsilon^n] \left[1 + C \cdot \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \quad (2.2)$$

2.2. Fundamentos de la barra de compresión Hopkinson

La barra de compresión Hopkinson (*SHPB* por sus siglas en inglés), es una configuración experimental que permite realizar estudios en materiales a altas tasas de deformación que se encuentra en el rango de $10^2 - 10^4$ [s] [7], las cuales dependen de las condiciones bajo las cuales se realiza el ensayo.

2.2.1. Descripción de un sistema barra de compresión Hopkinson

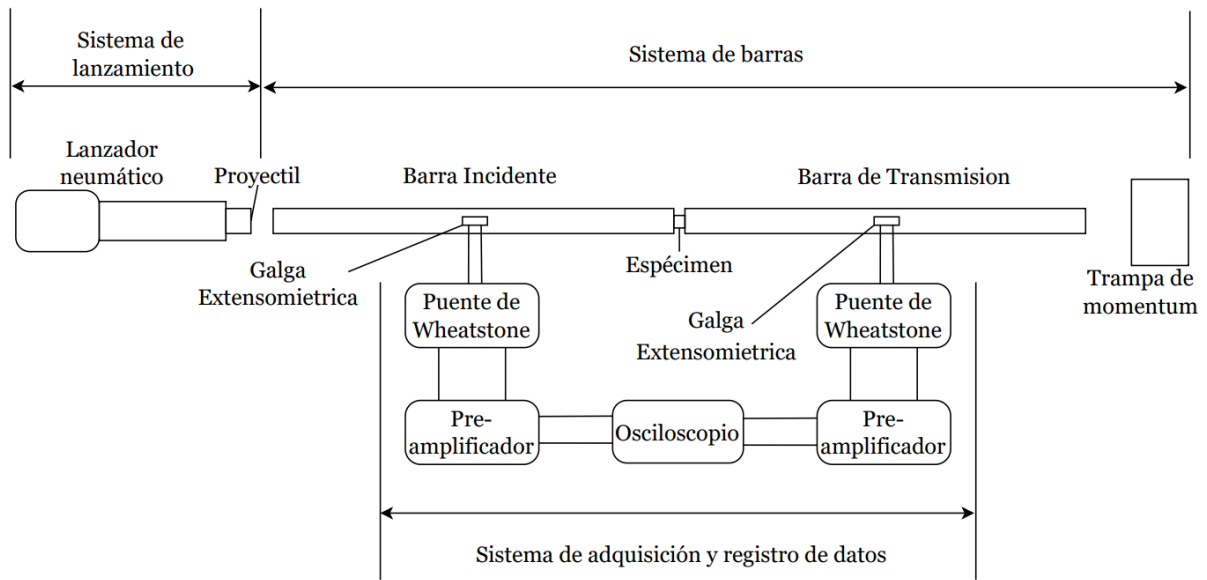


Figura 2.3: Diagrama SHPB [8].

La configuración experimental consiste en la deformación de un espécimen que se ubica entre un sistema de barras de gran longitud que se deforman dado el golpe de un proyectil a altas velocidades, como se muestra en la figura 2.3[8].

La dinámica del experimento es la siguiente: se dispara el proyectil a una alta velocidad el cual golpea la barra de incidente (figura 2.3) donde la energía es transmitida en forma de una onda de deformación la cual recorre toda la barra para luego deformar el espécimen y es aquí donde la onda de deformación se divide, una parte de ella continua a deformando la barra de transmisión donde se disipa la energía, y la otra parte de la deformación se refleja hacia la barra de incidente para finalmente disiparse[7].

La muestra al deformarse es lo que le da características específicas a la onda, es posible extraer propiedades específicas del material. Siempre se busca deformar la muestra con un onda de deformación que supere al esfuerzo de fluencia del material.

2.2.2. Sistema de lanzamiento

El objetivo del sistema de lanzamiento es de asegurar el impulso necesario al proyectil para alcanzar la velocidad requerida para el ensayo. En los primeros modelos de SHPB, la fuente del lanzamiento era la de activar una carga explosiva; el problema fundamental de esta manera es la inconsistencia para realizar ensayos a velocidades específicas.

La manera actual del sistema de lanzamiento para la SHPB es la de accionar un pistón neumático mediante un gas que se encuentra comprimido en un estanque. Es importante mencionar que esta manera de realizar el lanzamiento permite obtener ensayos más homogéneos, ya que el error de la velocidad para ciertos niveles de presión son bajos

2.2.3. Sistema de barras

El diseño del sistema consiste en 2 barras cilíndricas de igual longitud y dimensión. El principal requisito de estas barras es que su fluencia no sea superada por la deformación que ocurre en los ensayos y así la onda de deformación se propague de manera lineal a través del material.

Las barras permanecen alineadas mediante un sistema de soporte el que no tan solo permite lo anterior, sino que asegura que la fricción sea el mínimo posible. La energía transmitida a través de las barras es disipada de manera última con una trampa de momentum, cuyo diseño permite un freno seguro de la barra de transmisión evitando cualquier daño en el sistema.

Los ensayos son realizados colocando la muestra entre las 2 barras alineadas, incidente y de transmisión

2.2.4. Sistema de adquisición

La adquisición de los datos ocurre mediante el uso de galgas extensiométricas ubicadas en simétricamente en las barras incidentes y de transmisión, estos sensores envían la señal hacia un cuarto de puente *Wheatstone* el que permite medir las variaciones de voltaje; es importante destacar que la perturbación realizada por la deformación es de muy bajo rango, por lo que se requiere una amplificación.

2.2.5. Muestras

Dadas por la definiciones del sistema hechos por Arraztio [9] las muestras son del tipo cilíndricas y su fluencia tiene que ser menor a las barras incidente y de transmisión.

2.3. Fundamentos de la SHPB

La SHPB consiste en una onda de esfuerzo generada por el impacto de un proyectil. El frente de ondas producido se muestra en la figura 2.4.

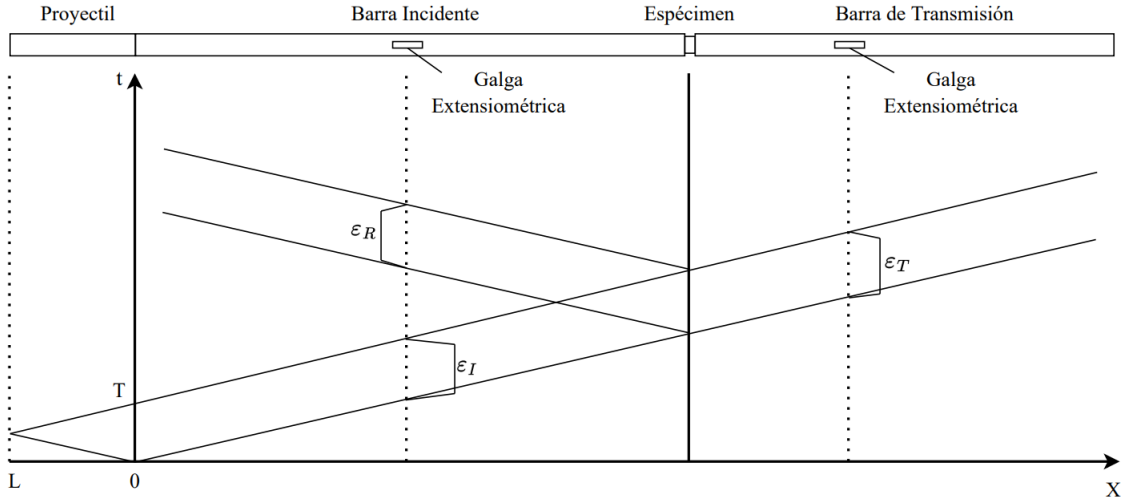


Figura 2.4: Diagrama de propagación onda de deformación [8].

La onda es generada por la deformación del choque realizada por el proyectil con la barra incidente, es transmitida por todo el largo de esta y se encuentra con la muestra, que es deformada y permite que la onda de deformación se divida en una parte reflejada a la barra incidente y la otra continúa a la barra de transmisión. La duración de la carga T es una función determinada por el largo del proyectil L (ecuación 2.3). [8]

$$T = \frac{2L}{C_{st}} \quad (2.3)$$

Donde C_{st} es la velocidad del sonido del proyectil. Dado que comúnmente el material del proyectil y de las barras son iguales, se tiene $C_B = C_{st}$.

La caracterización de la propagación de la onda, depende principalmente del tipo de material que se está utilizando para el sistema de barras. Para ello, se utiliza la definición de la velocidad de onda unidimensional para vibraciones libres (ecuación 2.4).

$$C_B = \sqrt{\frac{E_B}{\rho_B}} \quad (2.4)$$

Donde C_B es la velocidad del sonido del material, ρ_B densidad del material y E_B es el módulo de Young del material respectivo.

Si el material y el diámetro del proyectil es el mismo que el de las barras del sistema es posible estimar a partir de la velocidad del proyectil justo antes del impacto (v_{st}), la amplitud del esfuerzo de la barra incidente (σ_I) tal como se puede apreciar en la ecuación 2.5.

$$\sigma_I = \frac{1}{2} \cdot \rho_B \cdot C_B \cdot v_{st} \quad (2.5)$$

La ecuación 2.5 puede ser reordenada según la deformación de la barra incidente ε_I , tal como se muestra en la ecuación 2.6.

$$\varepsilon_I = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_{st}}{C_B} \quad (2.6)$$

La tasa de deformación sobre la muestra de ensayo, se puede obtener de la ecuación 2.7. [7]

$$\frac{d\varepsilon_s}{dt} = -\frac{2 \cdot C_B}{L_s} \cdot \varepsilon_R \quad (2.7)$$

La ecuación anterior muestra la tasa de deformación instantánea, donde L_s es el largo de la muestra, ε_R es la amplitud del pulso de deformación reflejado desde la interfaz entre la muestra y la barra incidente en dirección hacia esta última. El signo opuesto proviene de que la deformación nace de un pulso de compresión, mientras que impulso reflejado es uno de tensión.

Se puede obtener una primera aproximación a la tasa de deformación estimada para el ensayo, suponiendo que se puede acotar superiormente ε_R en la ecuación 2.7 por el comportamiento de ε_I tal como se define en la ecuación. 2.6

$$\varepsilon_R = -\varepsilon_I = -\frac{1}{2} \cdot \frac{v_{st}}{C_B} \quad (2.8)$$

Dado lo anterior es posible determinar una aproximación a la tasa de deformación de la muestra de ensayo con la ecuación 2.9.

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{v_{st}}{L_s} \quad (2.9)$$

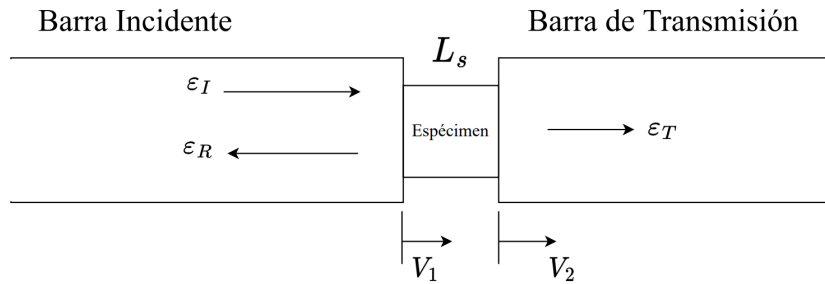


Figura 2.5: Esquema de la zona de ensayo [8].

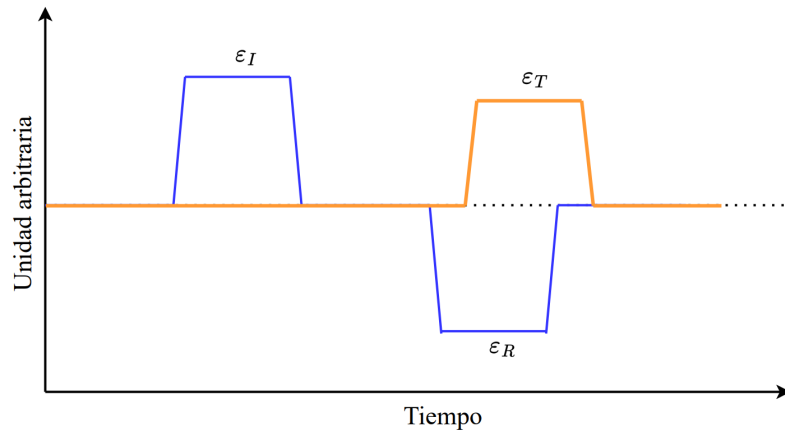


Figura 2.6: Representación ideal de la onda de deformación [9].

La figura 2.6 muestra el comportamiento ideal de la onda de deformación que pasa por las galgas extensiométricas, y estas tienen esta forma ya que en una primera instancia el proyectil golpea la barra incidente (línea azul) ocurriendo un único primer pulso en el tiempo, luego este frente de onda golpea la zona de ensayo, habiendo 3 tipos de deformación diferente, tal como que puede apreciar en la figura 2.5 donde luego que la onda afecta la muestra, esta se deforma dividiendo la primera deformación en 2 frente de ondas, uno reflejado a la barra incidente y otro transmitido a la barra de transmisión.

2.4. Descripción de la configuración experimental SHPB existente

El sistema SHPB ubicado en el taller mecánico de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, diseñado y construido por Arraztio [9]. La siguiente figura 2.7 muestra la disposición general del sistema y de los subsistemas de manera simulada, mientras que la figura 2.8 muestra el equipo ensamblado.

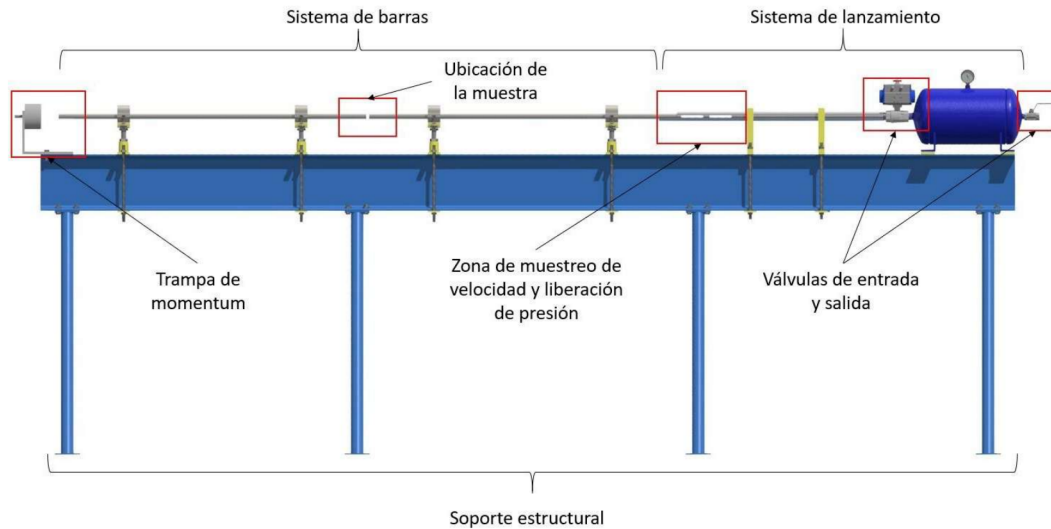


Figura 2.7: Disposición general del sistema SHPB.



Figura 2.8: Sistema construido y ensamblado.

2.4.1. Componentes mecánicos

2.4.1.1. Estanque de aire comprimido

El estanque del sistema de lanzamiento (figura 2.9) es de material ASTM A-234 WPB, consta de una tubería y tapas de diámetro $203.3[mm]$ SCH40, el cual posee un valor de esfuerzo máximo a $6.89[MPa]$ de presión estática, de $95[MPa]$. Consta con tres conexiones: una de $12.7[mm]$ para la entrada de gas, una de $24.5[mm]$ para la salida de gas y una apertura de $6.35[mm]$ en la zona superior donde se ubica un manómetro [9].

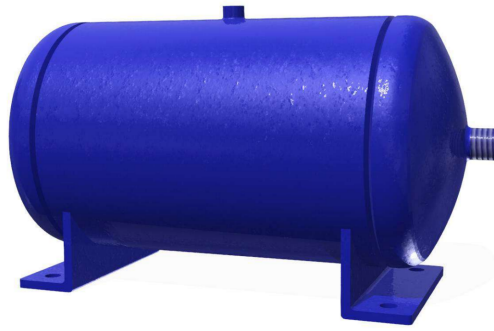


Figura 2.9: Estanque de aire comprimido[9].

El estanque se llena con el compresor PROMaker PRO-CP50 de 50[L] de capacidad y una presión máxima de operación de 8[bar] (figura 2.10).



Figura 2.10: Compresor PROMaker PRO-CP50.

2.4.1.2. Cañón de aire comprimido

El diseño del cañón, ilustrado en la figura 2.11, tiene 25[mm] de diámetro interno, lo cual da suficiente holgura para los bujes de teflón del proyectil. El material corresponde a acero SAE 1045 con una presión máxima de trabajo estimada en 88.25[MPa]. En su extremo posterior posee un hilo de 25.4[mm] para la conexión al estanque y cuenta con ranuras en el otro extremo para la liberación de presión y medición de la velocidad del proyectil[9].



Figura 2.11: Cañón de aire comprimido[9].

2.4.1.3. Proyectil y barras

El sistema está diseñado para que tanto las barras como el proyectil tengan un diámetro de 20[mm]. Las barras incidente y de transmisión tengan un largo de 1200[mm] (figura 2.12),

dado lo anterior es que se cumple con una tasa de L/D de 60, por lo que se puede considerar el pandeo de la operación es marginal. [9]

El material corresponde a acero SAE 4340 cuyas propiedades mecánicas de interés se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Propiedades mecánicas acero 4340.

Propiedad	Valor
Densidad [kg/m^3]	7850
Módulo de elasticidad [GPa]	210
Límite de fluencia [MPa]	588-725.6
Coefficiente de Poisson	0.29
Velocidad del sonido, C_B	5172.2

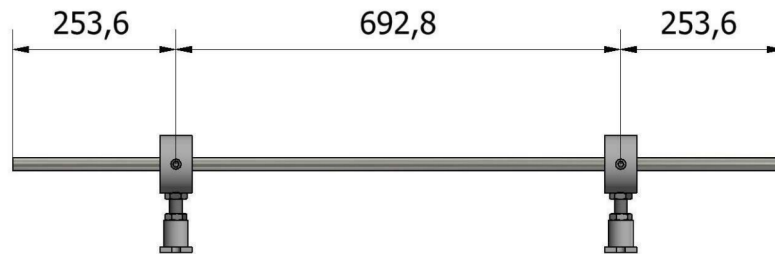


Figura 2.12: Disposición barra con soportes [9].

El proyectil (figura 2.13) tiene un largo de $200[mm]$ y esta dotado de bujes de teflón fijados con seguros seager DIN 471 a una distancia de $115.5[mm]$ entre centros y a $42.3[mm]$ desde los centros hasta los extremos del proyectil[9].



Figura 2.13: Proyectil [9].

Los soportes de la figura 2.14 tienen la función de soportar y alinear el sistema, el ajuste se puede realizar en 3 direcciones lo que permite que las barras permanezcan lo más alineadas posible. Adicionalmente estos soportes cuenta con un buje de teflón del mismo tipo que cuenta el proyectil cuyos coeficientes de roce estático (μ_e) y dinámico (μ_d) son de 0.04 [9].

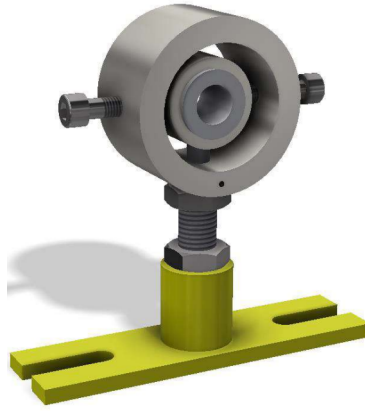


Figura 2.14: Soportes [9].

2.4.1.4. Trampa de momentum

Esta formada de una placa con una copa que detiene completamente el movimiento de la barra de transmisión luego del ensayo. Dentro de la copa se ubica una masa de plastilina el cual permite la disipación de energía de manera mas efectiva y disminuye el riesgo de que la barra se deforme por el impacto[9].

El montaje de la trampa de momentum es permitido por un sistema de anclaje el cual realiza la sujeción sobre el riel del extremo opuesto de la estructura de soporte del sistema de lanzamiento 2.15. El diseño realizado por Arraztio [9] tiene un esfuerzo máximo de operación de $114.5[MPa]$, con un factor de seguridad mayor 2.



Figura 2.15: Diseño trampa de momentum [9].

2.4.1.5. Estructura de soporte

La estructura consiste de una viga IPN de alma de $120[mm]$, con un largo de $3850[mm]$ con cuatro apoyos ubicados a $1635[mm]$ entre sí. Estos apoyos elevan la cara superior de la viga a una altura de $1170[mm]$ desde el nivel del piso (figura 2.16)[9].



Figura 2.16: Estructura de soporte [9].

2.5. Estimación de la velocidad de impacto

2.5.1. Velocidad máxima admisible del sistema

El sistema se encuentra limitado a una velocidad máxima que se puede lanzar el proyectil, de forma tal que este no sufra deformación plástica.

La ecuación 2.10 muestra a condición que tiene que cumplir la amplitud del esfuerzo resultante, el cual tiene que ser menor al límite de fluencia.

$$\sigma(v_{st}) < S_y \quad (2.10)$$

La ecuación 2.11 se muestra la expresión de la velocidad límite (v_{stmax}) bajo la cual la amplitud de la onda de esfuerzo debido al impacto, es igual al esfuerzo de fluencia del material, lo que podría resultar en la deformación plástica de las barras, afectando las mediciones con los sensores.

$$v_{stmax} = \frac{2 \cdot S_{yB}}{\rho_B \cdot C_B} \quad (2.11)$$

2.5.2. Pérdida de carga durante el lanzamiento

Dado que al iniciar el lanzamiento ocurre la expansión del gas comprimido, se puede estimar la presión final P_f que se alcanza al final del cañón en el lanzamiento mediante la Ley de Boyle Mariotte. Esta ley relaciona los estados finales e iniciales del sistema (ecuación 2.12) [10].

$$P_f = P_i \cdot \frac{V_i}{V_f} \quad (2.12)$$

Donde P_f y P_i son presión final e inicial, V_f y V_i son volumen final e inicial respectivamente.

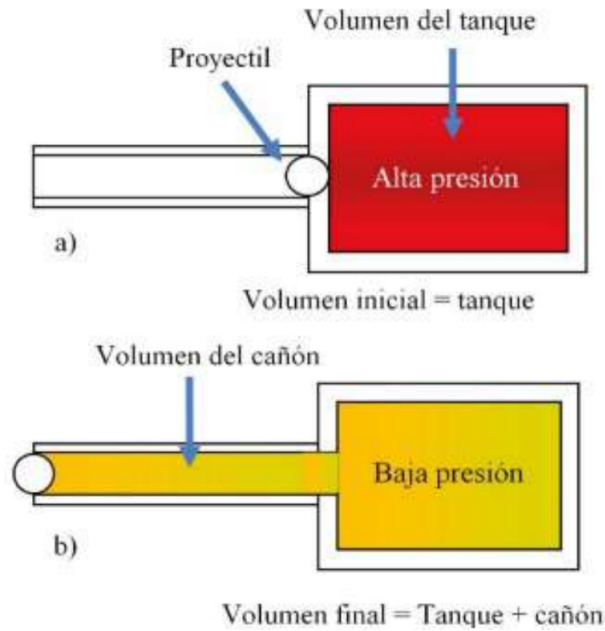


Figura 2.17: Secuencia de la presión dentro del sistema de lanzamiento [11].

En la figura 2.17 se muestra el diagrama del comportamiento de la presión una vez se realiza el disparo del proyectil. La pérdida de carga porcentual se puede obtener con la ecuación 2.13.

$$\Delta P \% = 100 - \frac{P_f \cdot 100}{P_i} \quad (2.13)$$

Para el sistema de lanzamiento construido, se incurre en una pérdida de carga porcentual de un 2.76 %.

2.5.3. Modelo de estimación de la velocidad de impacto

La velocidad a la que se realiza el impacto, viene dada por la velocidad que tiene el proyectil a la salida del cañón, donde se encuentran las ranuras de alivio que permiten la liberación de la presión remanente.

Seigel [12] muestra un modelo simplificado de propulsión de proyectil, el que consiste en un proyectil de masa M cuya posición en el cañón es x_p , propulsionado por una diferencia de presión P_p a través de un cañón de área de sección transversal A y largo L .

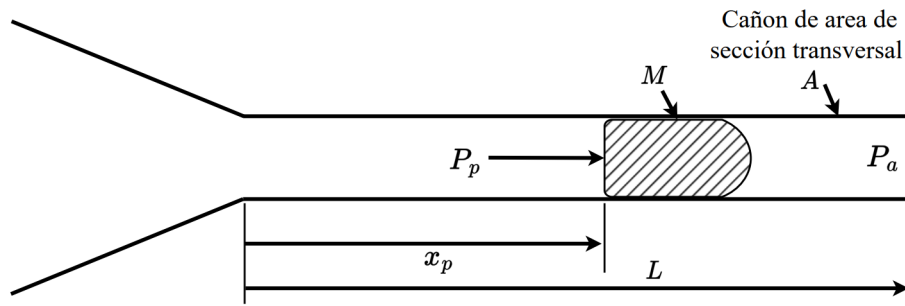


Figura 2.18: Diagrama general simplificado del movimiento del proyectil [12].

La ecuación de movimiento para este proyectil se describe mediante la ecuación 2.14, donde u_p es definida como la velocidad del proyectil

$$M \frac{du_p}{dt} = M u_p \frac{du_p}{dx_p} = P_p A \quad (2.14)$$

Los lanzamientos de los ensayos pueden ser aproximados como un proyectil sometido a propulsión constante debido a una diferencia de presión P_0 uniforme en el tiempo [12]. Para lo anterior es que se considera nulo el efecto de la presión atmosférica.

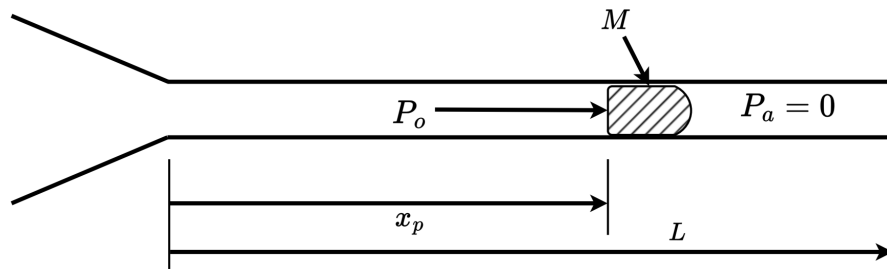


Figura 2.19: Modelo de presión [12].

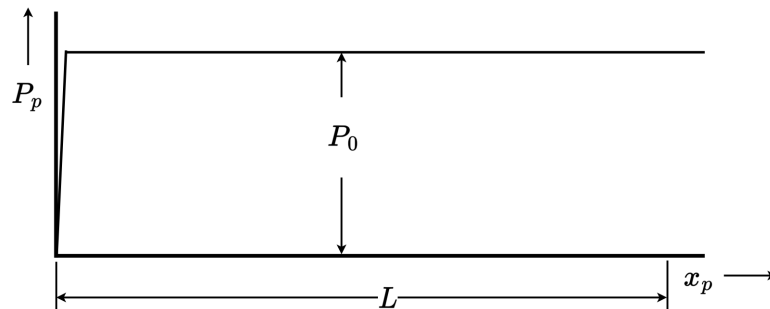


Figura 2.20: Comportamiento de la presión respecto al proyectil [12].

El modelo simplificado propuesto se ilustra en las figuras 2.19 y 2.20, donde se muestran las variables.

Retomando la ecuación 2.14 y se toma P_0 como presión de propulsión constante, se obtiene la ecuación 2.15 .

$$Mu_p \frac{u_p}{dx_p} = P_0 A \quad (2.15)$$

Integrando la expresión anterior con respecto a x_p se obtiene la ecuación 2.16

$$u_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot P_0 \cdot A \cdot L}{M}} \quad (2.16)$$

El resultado se puede interpretar como la velocidad máxima obtenible a partir de las condiciones establecidas de lanzamiento.

Utilizando esta estimación para los parámetros del sistema de ensayos, donde $u_0 = v_{st}$ y $P_0 = P$ corresponde a la presión del estanque, tomando en cuenta la geometría y propiedades físicas del proyectil, definidas en las ecuaciones 2.17 ,2.18 y 2.19, es posible obtener 2.20.

$$M = \rho_{st} \left(\pi \frac{D_{st}^2}{4} L_{st} \right) \quad (2.17)$$

$$A = \pi \frac{D_c^2}{4} \quad (2.18)$$

$$L = L_c \quad (2.19)$$

$$v_{st} = \left[\frac{2 \cdot P \cdot L_c}{\rho_{st} \cdot L_{st}} \right]^{1/2} \quad (2.20)$$

Es importante destacar que el subíndice c son las propiedades relativas al cañón y el subíndice st corresponde a las del proyectil. Notar que el diámetro del proyectil es el mismo que el diámetro interno del cañón.

Finalmente si se añade las pérdidas de carga, el modelo se robustiza; obteniendo la ecuación de estimación de velocidad de impacto del proyectil respecto a la presión interna del estanque a gas presurizado (ecuación 2.21)

$$v_{st_{mod}} = \left[\frac{2P(1 - \Delta P)}{\rho_{st}} \frac{L_c}{L_{st}} \right]^{1/2} \quad (2.21)$$

2.6. Método de elementos finitos

El método de elementos finitos permite discretizar problemas continuos, mediante la división del continuo en una cantidad finita de elementos cuyo comportamiento es especificado por un número finito de parámetros y la solución completa del sistema es la del ensamble de esta cantidad finita de elementos donde cada elemento tiene condiciones de borde que permite el que todo se entrelace y así aproximar lo más posible a lo que ocurre realmente dentro del sólido. Claramente la aproximación real al sólido dependerá del número de discretizaciones que se haga y de la forma de la malla. [13].

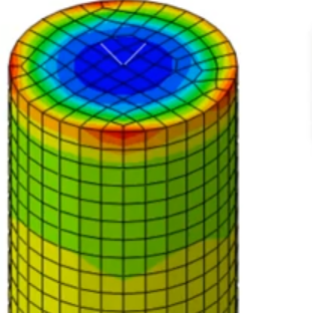


Figura 2.21: Análisis de elementos finitos aplicado a un cilindro y una fuerza externa aplicada de manera horizontal.

En la figura 2.21 se observa un análisis por medio de elementos finitos aplicado a un cilindro donde se denota la discretización del sólido al cuál se le aplica una carga de compresión a una de sus caras; lo estudiado por este método son los esfuerzos internos que ocurren dentro del cilindro una vez que la fuerza hace su efecto, simulando como se deforma el material y siendo la gama de colores el valor de estos esfuerzos donde la concentración de esfuerzos más grandes se encuentran en los bordes del cilindro (color rojo).

La uso de este método es para simular el comportamiento de la SHPB en la vida real.

2.6.1. Mallado

La malla es una red formada por celdas y nodos. Puede tener cualquier forma en cualquier tamaño y es usado para resolver ecuaciones en derivada parcial. Cada celda de la malla representa una solución individual de la ecuación, la que queda guardada en ese lugar para ese instante de tiempo. Lo anterior permite analizar sólidos complejos con diferentes formas y tamaños, ya que en vez, por ejemplo de integrar un sólido con muchas imperfecciones los hace muy complicado de manera analítica y computacional, por lo que usar la malla para discretizar este sólido mas grande y permite simplificar el problema en ecuaciones menos complicadas de resolver.

El resultado de usar una malla es que el problema queda discretizado y dependiendo de cada proyecto es el número de discretizaciones que permitirán analizar de mejor manera. El refinado de malla puede tener un gran impacto dentro en los resultados, ya sea haciéndolos más precisos o generando problemas en estos. Lo anterior depende del balance entre tamaño de malla e incremento de tiempo a la cual se está simulando.

Dependiendo de la geometría del sólido a estudiar, algunas geometrías de mallado son mejores que otras. Como el problema de este trabajo consiste el de elementos con ejes de simetría ya que se tratan de cilindros, la mejor manera de aproximar el problema es con cuadriláteros regulares (figura 2.22).

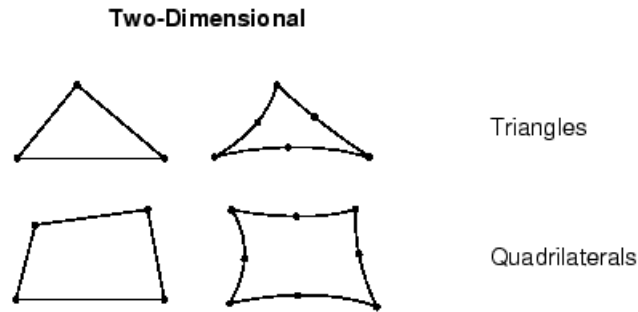


Figura 2.22: Tipos de mallado en Abaqus [14].

El refinado de malla de malla usualmente se realiza en lugares de interés de estudio, usualmente son puntos críticos donde se requiere realizar un análisis más profundo. En la figura 2.23 se aprecian diferentes refinados de malla a un mismo problema. Esta estrategia es de utilidad al trabajo realizado ya que la SHPB tiene dimensiones muy grandes en comparación a lo que se requiere analizar, por lo que realizar una simulación mediante elementos finitos con un mallado fino a través de toda la estructura es contraproducente, por lo que refinar la malla en el lugar de interés es una mejor forma de abordar el problema.

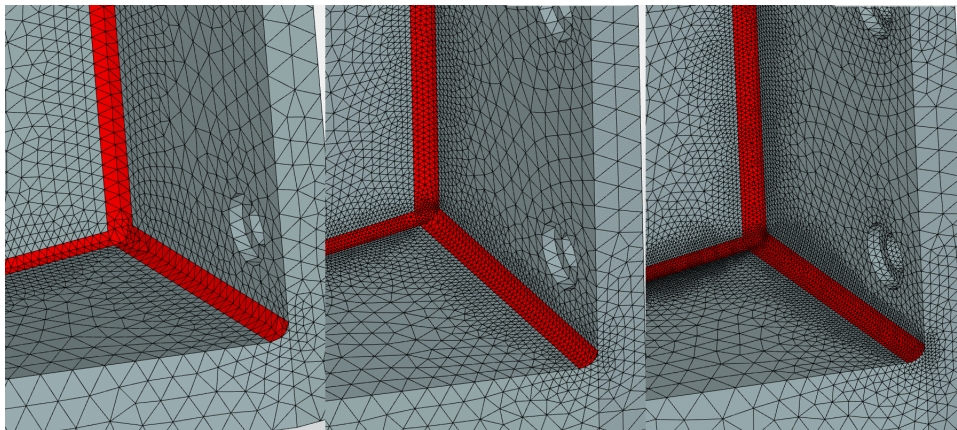


Figura 2.23: Refinado de malla.

2.6.2. Método de solución explícita

El método de solución explícita corresponde a un tipo de acercamiento a la solución en elementos finitos donde la ecuaciones de movimiento para un sistema que se perturba son integradas a través del tiempo. Los elementos de posición, velocidad y aceleración son calculados a partir del estado anterior y los nodos con que estos puntos interactúan por cada paso de tiempo (incrementos). Lo mencionado lo hace altamente eficiente en el tiempo y costo computacional. [14]

El método explícito es usado principalmente en la solución de problemas dinámicos, ya que su alta eficiencia permite resolver problemas no lineales en el tiempo cuyas soluciones mediante iteraciones son complejas. Este método es condicionalmente estable ya que si no hay suficiente pasos de tiempo se pierde información de la perturbación, usualmente la cantidad de incrementos van desde $10^{-8}[s]$ a $10^{-5}[s]$. [15]

Capítulo 3

Metodología

3.1. General

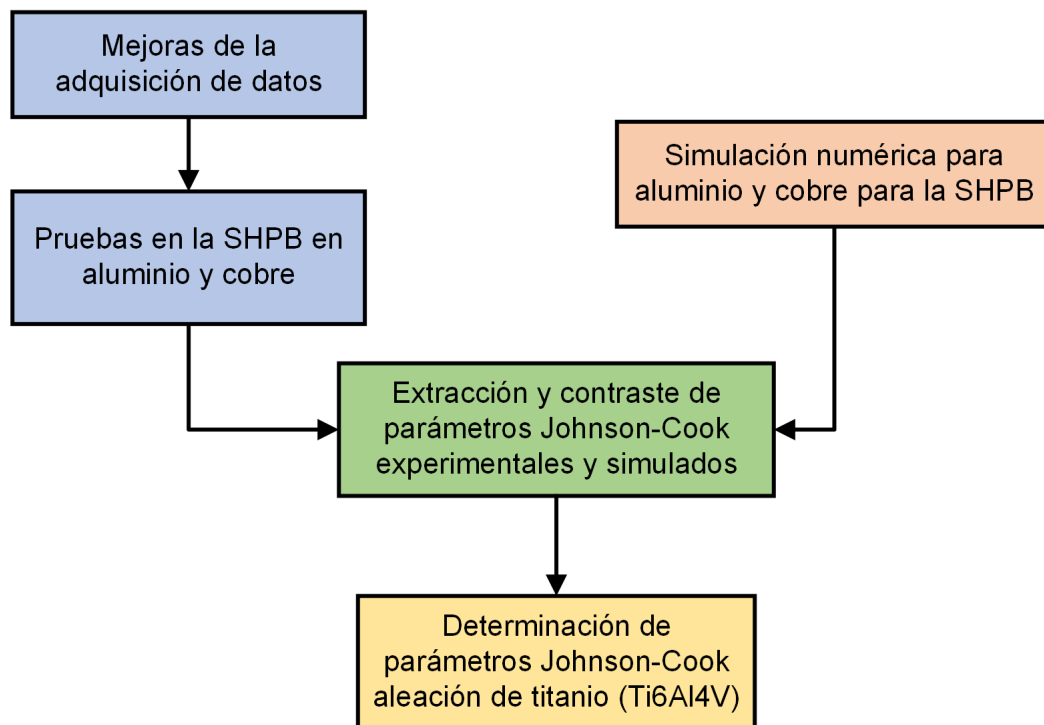


Figura 3.1: Procedimiento de trabajo.

La figura 3.1 muestra el proceso en el cual se abordará el presente trabajo de título, donde tanto lo experimental y lo simulado convergen a un bloque en común. Es importante destacar que previo a la validación de la SHPB en los experimentos es requerido un trabajo técnico con el objetivo de asegurar que la máquina se encuentra en condiciones de tomar los datos de interés.

3.2. Mejoras de la adquisición de datos

El estado inicial en que se recibe la SHPB ubicada en el taller mecánico no permite realizar pruebas de manera satisfactoria ya que la adquisición de datos no es la adecuada; por lo cual se realizan trabajos técnicos en la máquina, específicamente en el sistema del circuito de onda. Dicho lo anterior, las mejoras se concentran en los siguientes ejes:

1. Circuito de adquisición.
2. Instrumentación de trabajo.

El primer punto se enfoca principalmente en realizar cambios que disminuyan las incertidumbres eléctricas al circuito de adquisición de datos, ya que se presenta un sistema en un circuito de prueba *protoboard* lo cual no es conveniente para los tipos de experimentos. El circuito adquiere una onda que no permite realizar ningún análisis. Se contempla la realización de una tarjeta electrónica con elementos soldados y conexiones tipo macho que asegura que las variaciones de voltajes provenientes de cables de cobre sean menores.

Para el segundo punto, el foco es utilizar instrumentación apropiada para el tipo de experimentos que se realizan. Rojas Salinas [16] implementa la alimentación del circuito mediante 2 baterías de 9[V] el que entrega energía a un *rail splitter* que permite la formación de una tierra falsa. Esta configuración permite la visualización de diferencias de voltaje. Al poner el marcha el sistema se observa una generación de ruido de alta frecuencia lo que se asocia con el uso de baterías, que si bien entrega energía en forma de corriente continua (DC), el voltaje en sí no lo es [17]. La razón a lo anterior es que no son baterías teóricas y la reacción electroquímica del litio dentro de estas no es continua en los rangos mas pequeños de voltaje.

3.3. Pruebas en la SHPB en aluminio y cobre

Una vez haya certeza que los datos que se pueden tomar de la SHPB son útiles para el análisis se procede a realizar la pruebas en aluminio 2017 y cobre C1100 que han sido ampliamente estudiados con el modelo de deformación a altas velocidades Johnson-Cook y con los cuales se busca validar el funcionamiento de la máquina. Se preparan la muestras cilindrandolas y refrentándolas a partir de barras de mayor largo y diámetros de tal forma que tengan una forma cilíndrica de 10[mm] de diámetro y 10[mm] de alto.

Previo al uso de la máquina se toman todas las medidas de seguridad y el *check list* (anexo A) de la forma de operar la SHPB definidas por Rojas Salinas [16], se realizan 4 pruebas por material buscando alcanzar 4 velocidades diferentes: 20[m/s], 25[m/s], 30[m/s] y 35[m/s]. Los datos que se obtienen en las pruebas son curvas de variación de voltaje en el tiempo, las que pasan por un post-procesamiento para obtener los resultados de interés.

3.4. Simulación numérica para aluminio y cobre para la SHPB

En el software Abaqus CAE se realiza una simulación en elementos finitos del experimento, mediante el método ABAQUS/EXPLICIT. La simulación considera el conjunto de barras

incidente, de transmisión, el proyectil y la muestra a deformar. Como estos comparten en común la forma cilíndrica se opta por realizar una simulación axisimétrica en 2 dimensiones (figura 3.2) en la cual se traza un eje al centro de los cilindros y solo se ensamblan las piezas que generen el sistema mediante una revolución de 360 grados.



Figura 3.2: Elementos de la simulación.

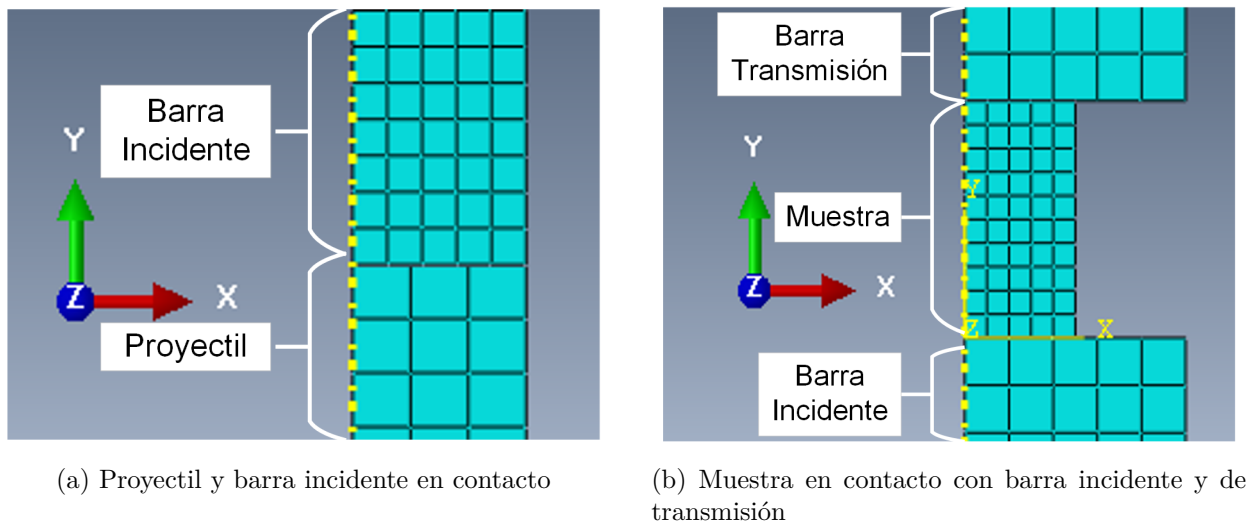


Figura 3.3: Ensamble simulación SHPB.

Notar que la figura 3.3 muestra los puntos de contacto, las dimensiones del ensamble está en relación 1:1 con la máquina SHPB construida y los contactos son del tipo *surface to surface*. El sistema está a temperatura ambiente y está configurado para que la perturbación sea generada inmediatamente en la simulación ya que el proyectil se encuentra en contacto con la barra incidente, se realizan 4 simulaciones a 4 velocidades por material: $20[m/s]$, $25[m/s]$, $30[m/s]$ y $35[m/s]$.

Se establece un refinado de mallado en los puntos de interés que permite el estudio de la deformación, estos puntos son donde se encuentran los sensores (a 600[mm] de la muestra) y la muestra (entre la barra incidente y de transmisión). Ingresando propiedades de comportamiento de la probeta (tabla 3.1)[18], en particular los parámetros Johnson-Cook de aluminio 2017 y cobre C1100 y la ecuación de estado Mie-Grüneisen la cual permite determinar la presión en un sólido comprimido a altas velocidades[14] (a partir de 10^{-1} [s] [19]).

Tabla 3.1: Parámetros ingresados en *Abaqus CAE*.

Propiedades	Aluminio 2017	Cobre C1100
Densidad [kg/m^3]	$2.79 \cdot 10^3$	$8.89 \cdot 10^3$
Módulo de corte [GPa]	27	44.7
Conductividad Térmica [$W/m \cdot K$]	237.2	388
Calor específico [$J/kg \cdot K$]	898.2	383
Velocidad del sonido, $c[m/s]$	5292	3940
Pendiente curva U_s versus U_p , s	1.34	1.49
Coefficiente Grüneisen, Γ_0	2.14	2.02
Esfuerzo de fluencia, $A[MPa]$	148.4	92
Constante de dureza, $B[MPa]$	345.5	292
Exponente de dureza, n	0.183	0.31
Constante de tasa de deformación, C	0.001	0.025
Exponente de ablandamiento térmico, m	0.895	1.09
Temperatura de fusión, $T_m[K]$	916	1356
Temperatura de referencia, $T_0[K]$	293	293

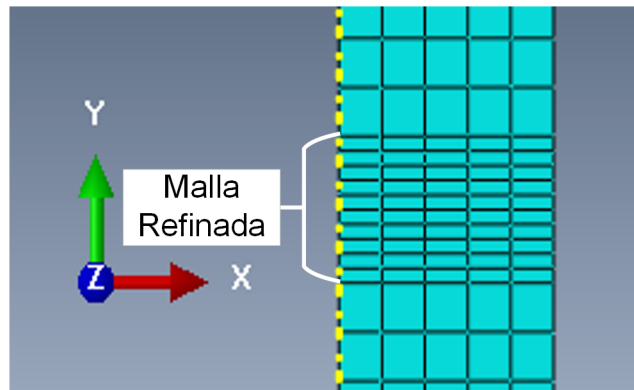


Figura 3.4: Malla refinada en barras.

Los resultados a extraer es la deformación en el tiempo que ocurre específicamente en la posición de los sensores a 600[mm] desde el contacto de la barra a la probeta, y lo que se hace es tomar un conjunto de elementos de la malla en la posición descrita en la figura 3.4 a los que se les extrae la deformación nominal en la dirección 22, y con lo anterior se obtienen una serie de curvas que pertenecen al conjunto de elementos de malla (figura 3.5),

se procede a tomar el promedio de las curvas que es posible realizarla en el mismo software. Posteriormente se extrae la base de datos de la curva promediada para poder realizar el post-procesamiento de la onda. Es importante notar que se toman para la barra incidente los dos primeros pulsos y en la barra de transmisión el primer pulso que se llega a observar.

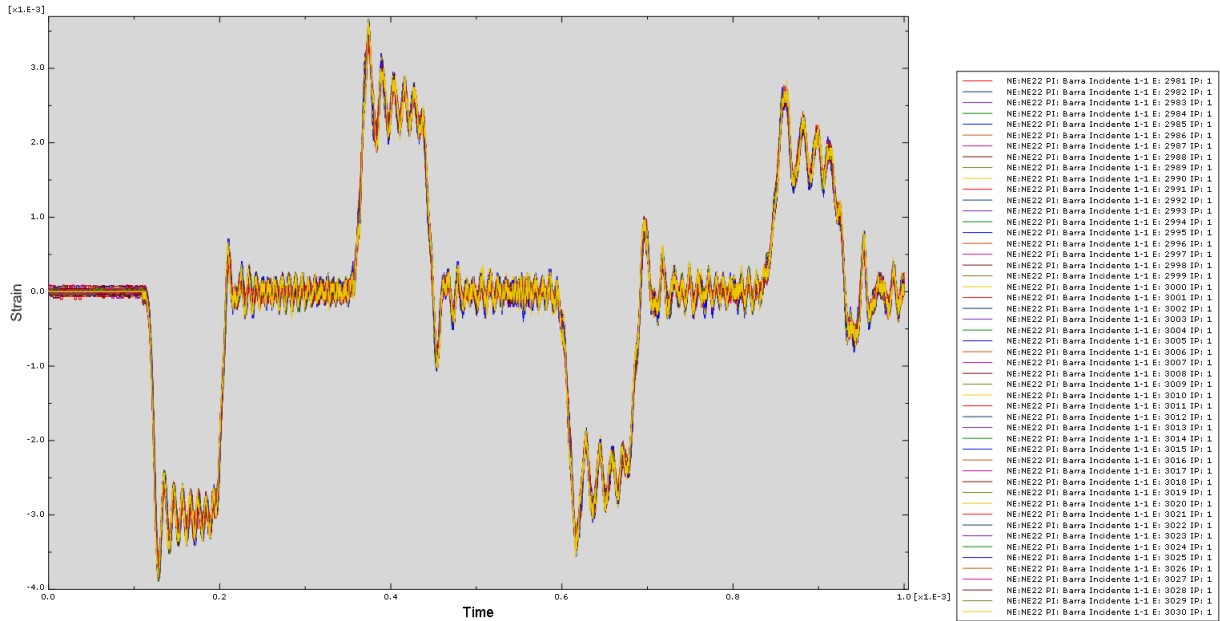


Figura 3.5: Pulso de deformación barra incidente simulación.

3.5. Extracción y contraste de resultados experimentales y simulados

Para extraer los parámetros Johnson-Cook se requiere primero obtener las curvas esfuerzo deformación, para lo cual se utiliza el software *SURE-pulse* ingresando las curvas de deformación en el tiempo para la simulación (4 de aluminio 2017 y 4 de cobre C1100) y las de voltaje en el tiempo para los experimentos (4 de aluminio 2017 y 4 de cobre C1100). El resultado final es un documento *Excel* que contiene la curva esfuerzo deformación para las velocidades (20[m/s], 25[m/s], 30[m/s] y 35[m/s]) de los ensayos tanto simulados como experimentales.

Para que las curvas esfuerzo deformación sean las apropiadas para el estudio, es necesario configurar el programa con los datos necesarios para que este haga el post-procesamiento de manera apropiada. Los datos ingresados se listan en las tablas 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5; estos datos requieren un ajuste de unidades de medida para ingresar los datos al programa.

Tabla 3.2: Propiedades galgas extensiométricas insertadas en SURE-pulse.

Propiedad	Valor
Resistencia [Ω]	350
Largo [m]	0.0071
Calibración de voltaje [V]	1
Factor de galga	2
Resistencia derivada [$k\Omega$]	175

Tabla 3.3: Propiedades barras acero 4340 insertadas en SURE-pulse.

Propiedad	Valor
Densidad [kg/m^3]	7850
Diametro [m]	0.02
Fluencia [MPa]	588.1
Módulo de elasticidad [GPa]	210
Velocidad límite [m/s]	29
Largo [m]	1.2
Módulo de Poisson	0.33

Tabla 3.4: Propiedades proyectil insertadas en SURE-Pulse.

Propiedad	Valor
Densidad [kg/m^3]	7850
Diametro [m]	0.02
Largo [m]	0.2
Velocidad [m/s]	Depende del ensayo

Tabla 3.5: Propiedades muestras introducidas en SURE-pulse.

Material	Propiedad	Valor
Aluminio 2017	Densidad [kg/m^3]	$2.79 \cdot 10^3$
	Diametro [m]	0.01
	Largo [m]	0.01
	Módulo de elasticidad [GPa]	72
	Capacidad calorífica [J/K]	3.93
Cobre C1100	Densidad [kg/m^3]	$8.89 \cdot 10^3$
	Diametro [m]	0.01
	Largo [m]	0.01
	Módulo de elasticidad [GPa]	116
	Capacidad calorífica [J/K]	5.34
Titanio Ti6Al4V	Densidad [kg/m^3]	$4.48 \cdot 10^3$
	Diametro [m]	0.01
	Largo [m]	0.01
	Módulo de elasticidad [GPa]	114
	Capacidad calorífica [J/K]	4.6

Una vez introducidos los parámetros se procede a cargar los datos provenientes de la experimentación y simulación para obtener las curvas esfuerzo deformación, es importante mencionar que para los resultados experimentales es necesario agregar la ganancia del circuito (160) para que los resultados se encuentren a escala y el *sample rate* del osciloscopio que es de 50.000 muestras por segundo. Cuando se ingresan los pulsos en el programa hay que elegir de manera manual el pulso incidente y reflejado para la barra incidente, y el pulso de la barra de transmisión (figura 3.6). Cambiando a la ventana de análisis de resultados se encuentra la curva esfuerzo deformación obtenida a partir de los datos cargados por ensayo (figura 3.7).

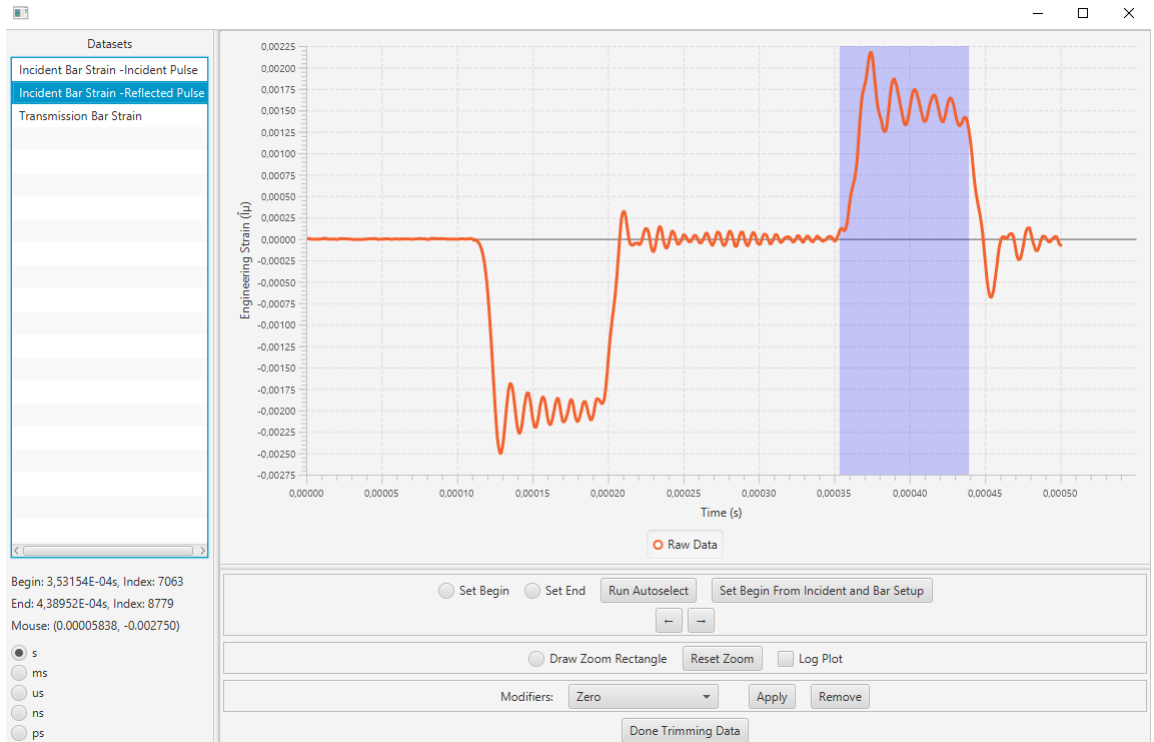


Figura 3.6: Selección de pulso reflejado en barra incidente.



Figura 3.7: Curva esfuerzo deformación extraído a través de los pulsos de deformación.

A cada una de estas curvas por separado se realiza un ajuste mediante la ecuación Johnson-Cook (ecuación 2.2) realizando una columna al lado de los datos que contenga la formula de la ecuación, evaluando los parámetros Johnson-Cook a optimizar (parámetros iniciales) y desplazando la curva para que comience a la deformación $0.002[mm/mm]$. [20]



Figura 3.8: Diagrama del modelo de optimización de parámetros.

Tabla 3.6: Parámetros Johnson-Cook iniciales[18].

Propiedad	Aluminio 2017	Cobre C1100
Esfuerzo de fluencia, A[MPa]	148.4	92
Constante de dureza, B[MPa]	345.5	292
Exponente de dureza, n	0.183	0.31
Constante de tasa de deformación, C	0.001	0.025

Los parámetros iniciales corresponden a los de la literatura y que se refinan mediante la característica *Solver* de *Excel* donde se evalúan los valores de Johnson-Cook con los parámetros a optimizar (columna 3 figura 3.8). Para optimizar el modelo no lineal se logra creando una columna al lado de los datos que toma el valor absoluto de la diferencia entre el esfuerzo real y el modelo Johnson-Cook y estos errores se suman en su conjunto en la celda de la columna 5. La optimización se realiza buscando el mínimo de la celda de la columna 5, variando los parámetros Johnson-Cook introducidos inicialmente. Limitar los parámetros bajo una cierta holgura de los datos en forma de restricción en la característica *solver* es necesario para evitar imprecisiones en la optimización.

Los valores de los parámetros Johnson-Cook obtenidos indica el nivel precisión de los ensayos que se puede realizar con la SHPB.

3.6. Determinación de parámetros Johnson-Cook de aleación de titanio (Ti6Al4V)

De manera análoga a la experimentación con aluminio y cobre, se realizan ensayos en la SHPB utilizando muestras de 10[mm] de diámetro y 10[mm] de alto de aleación de titanio

(Ti6Al4V). Donde se extraen las onda de deformación en forma de voltaje para posteriormente ser post-procesada en el software *SURE-pulse*. La onda post procesada se le realiza un ajuste de curva mediante Johnson-Cook (ecuación 2.2) a través de un modelo de optimización no lineal.

Capítulo 4

Mejoras del equipo

4.1. Mejoras de la adquisición de datos

4.1.1. Circuito de adquisición de onda

En vista al comportamiento de la SHPB con pruebas realizadas al inicio del estudio de este trabajo, se toma la decisión de rediseñar parte del circuito previo para poder asegurar la adquisición de los datos de la manera más precisa, buscando disminuir en lo mayor posible los errores sistemáticos provenientes del circuito.

Se mantiene el uso del mismo tipo de galgas extensiométricas (*strain gauges*) del diseño original de Arraztio Figari de $350[\Omega]$ figura 4.1 [9].

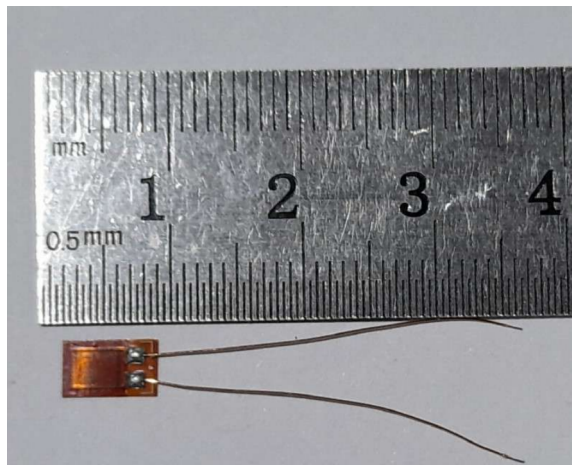


Figura 4.1: Galgas extensiométricas BF350-3AA con filamentos previamente soldados [16]

Se mantiene el diseño de puente de Wheatstone, el que corresponde a un cuarto de puente de Wheatstone (*Quarter-bridge configuration*). La división del puente muestran en la figura 4.5 donde los caminos se separan en los 2 puentes en las resistencias R_1 R_5 y R_9 R_{13} , a continuación de las resistencias R_2 y R_{10} se encuentran los pines machos J_2 y J_6 respectivamente donde se conectan en serie los potenciómetros de precisión Bourns 3590S [16]. Los pines machos J_3 y J_7 corresponde a las salidas de las galgas extensiométricas. Respecto a la

amplificación de la señal, se mantiene el modulo diferencial no inversor descrito por Rojas Salinas [16]. Los pines machos J_4 y J_5 corresponden a las salidas de los canales CH1 y CH2 que permiten medir la diferencia de voltaje en el osciloscopio.



Figura 4.2: Potenciómetro de precisión Bourns 3590S [16]

Como la configuración del puente de Wheatstone y el módulo de amplificación LM324N se mantiene, implica que la ganancia también, siendo esta de 160.

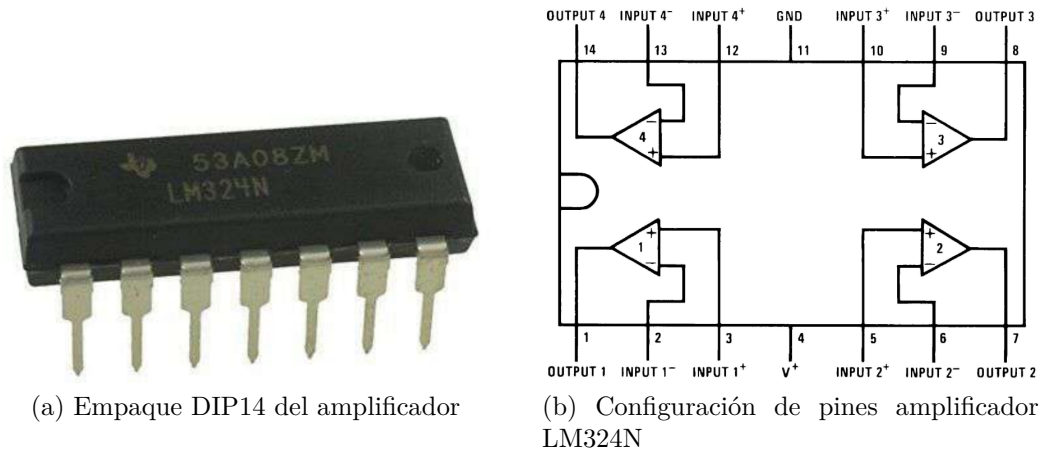
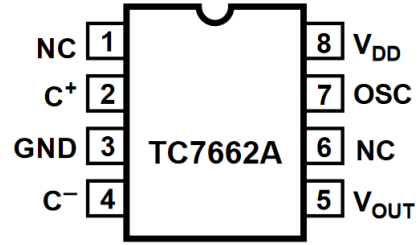
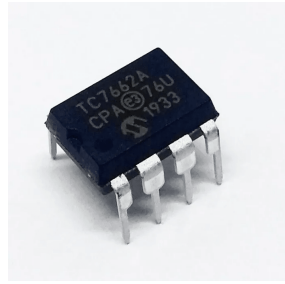


Figura 4.3: Amplificador operacional LM324N [21]

De igual manera como lo estipuló Rojas Salinas, el mejor acercamiento a la alimentación del sistema es utilizar un sistema de corriente continua (DC) [16], que permita realizar el balance de los puentes de Wheatstone. Se cambia la división de voltaje utilizando por un invertidor de voltaje mediante un circuito integrado TC7662A de la marca Microchip Technology que permite, bajo una configuración en específico, obtener salidas de $\pm V$ tal como se puede apreciar en la figura 4.5 [22].



(a) Empaque DIP8 del circuito integrado

(b) Configuración de pines TC7662A

Figura 4.4: Circuito integrado TC7662A

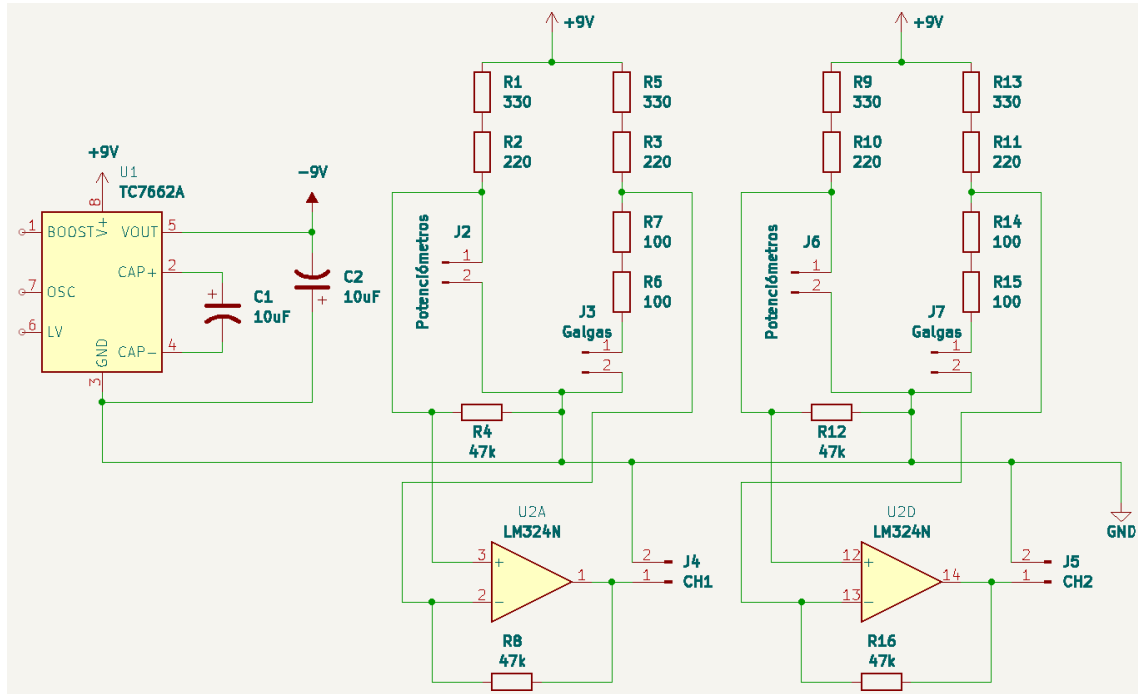
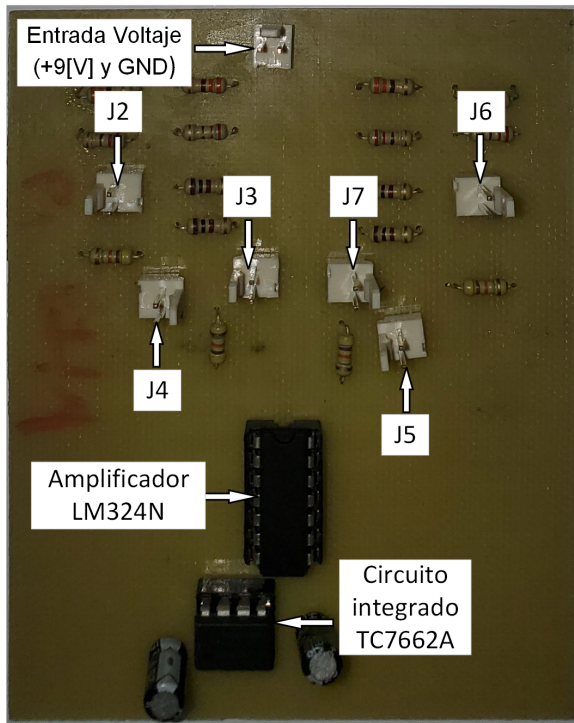


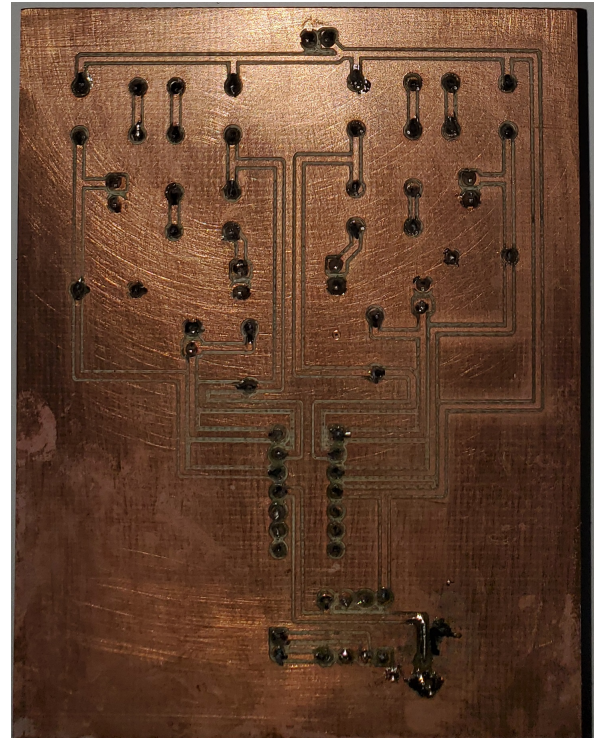
Figura 4.5: Esquematación del circuito mejorado

4.1.2. PCB del circuito

En la figura 4.6 se muestran la placa electrónica del sistema de adquisición de datos.



(a) Lado anterior



(b) Lado posterior

Figura 4.6: PCB del sistema de adquisición

4.1.3. Resultado de las mejoras

El resultado de las mejoras se puede observar comparando la onda del circuito previo (figura 4.7) y la onda del circuito actual (figura 4.8) demuestra la disminución del ruido dentro de la señal y el alcance de la señal. En el circuito previo las incertidumbres disminuían el voltaje medido, ya que la barra incidente en la figura 4.7 solo alcanza hasta alrededor de $0.6[V]$ en el primer pulso. Mientras que el circuito actual 4.8 entrega una forma más cercana a la realidad y con un voltaje más apropiado, parecido a los experimentos realizados por Arraztio Figari [9].

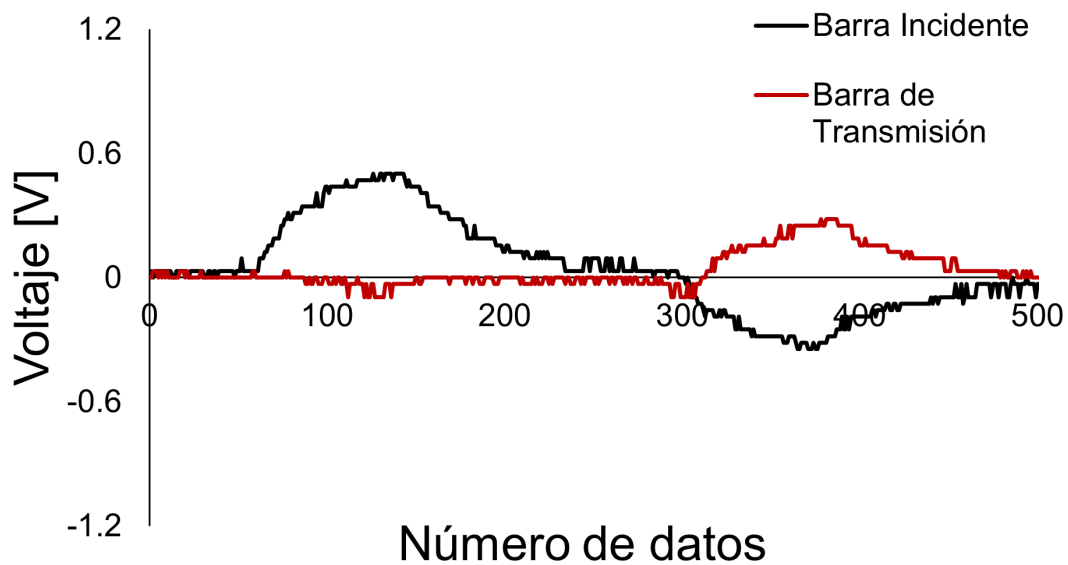


Figura 4.7: Ensayo de aluminio 2017 a 24.1[m/s].

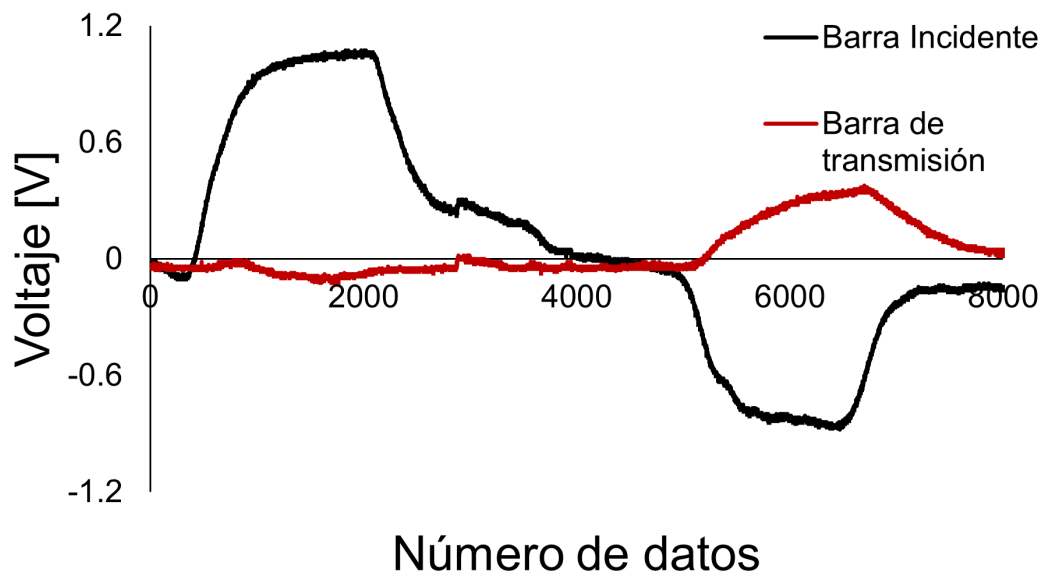


Figura 4.8: Ensayo de aluminio 2017 a 24.8[m/s].

También es importante mencionar la disminución de ruido, ya que afecta directamente las mediciones en los ensayos. En la tabla 4.1 se cuantifica la amplitud del ruido a través de la onda sin perturbación, donde se puede observar una una disminución del ruido en un 64.4%.

Tabla 4.1: Amplitud del ruido de circuito previo y modificado

Circuito Previo	Circuito Modificado
0.09	0.032

4.2. Instrumentación de trabajo

4.2.1. Suministro eléctrico

El trabajo anterior establece el uso de baterías de litio de 9[V] para suministrar energía al circuito de adquisición de datos, esto trae problemas al momento de medir ya que las baterías de litio si bien generan corriente continua, esta es inestable, generando un alto nivel de ruido en la medición de voltaje. Es por eso que se decide utilizar una fuente de poder de corriente continua para suministrar energía al circuito.

Se selecciona el modelo HY60-06 de la marca ele-tech (figura 4.9), que permite regular el voltaje hasta 60[V] y 6[A] generando una potencia de salida de hasta 150[W] .



Figura 4.9: Fuente de poder ele-tech modelo HY60-06

4.2.1.1. Obtención de datos

Para poder realizar los estudios propuestos en este trabajo de título es que se requiere poder obtener la onda de deformación, Rojas Salinas [16] propuso el uso del osciloscopio ADS1102CAL de la marca ATEN (4.10), el cual tiene una tasa de muestreo de hasta 1[GSa/s]. El equipo tiene una característica apropiada para el uso que se le quiere dar, el almacenamiento de *buffer* permite que la señal registrada luego de iniciar la adquisición de datos mediante la detección del pulso sea guardada con una cantidad de datos anteriores, de esta manera no se pierden datos dados por una detección tardía de la onda de deformación.

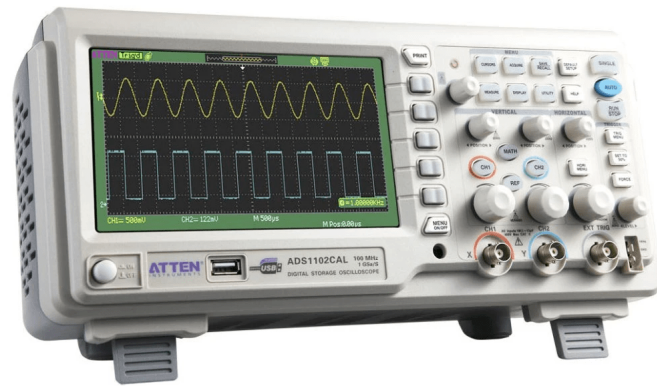


Figura 4.10: Osciloscópio Atten ADS1102CAL

Capítulo 5

Resultados y análisis

5.1. Simulación numérica para aluminio y cobre para la SHPB

Una vez terminada la simulación, en el apartado de resultados, se extrae la deformación nominal de todos los elementos del grupo de análisis y utilizando una herramienta integrada en el *software*, se obtiene una curva promediada que se observa en la figura 5.2. Se adjuntan en el anexo B las curvas para las simulaciones de aluminio 2017 y cobre C1100 para las velocidades de 20[m/s], 25[m/s], 30[m/s] y 35[m/s].

En la figura 5.1 se muestra el resultado de realizar la simulación de manera axisimétrica en una sola dimensión. Se muestra el momento en que la onda de deformación alcanza la muestra y la comienza a deformar.

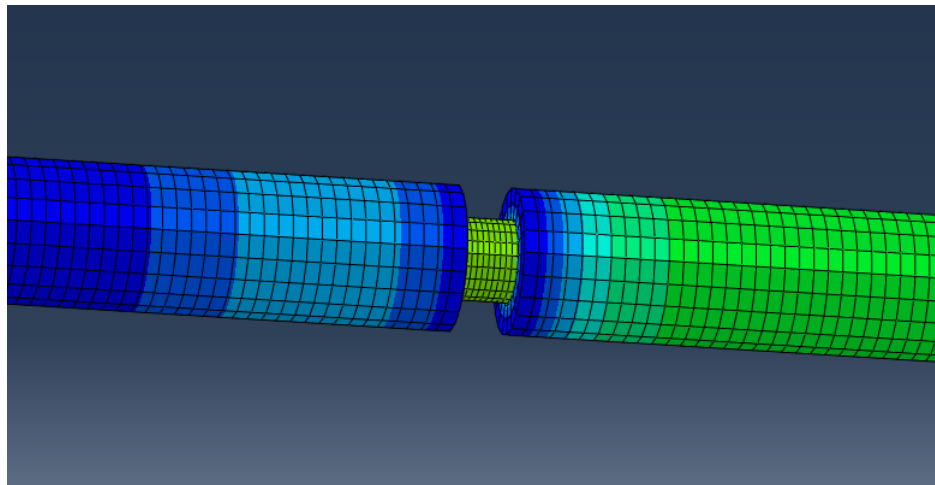


Figura 5.1: Análisis axisimétrico con muestra de aluminio deformada a 20[m/s]

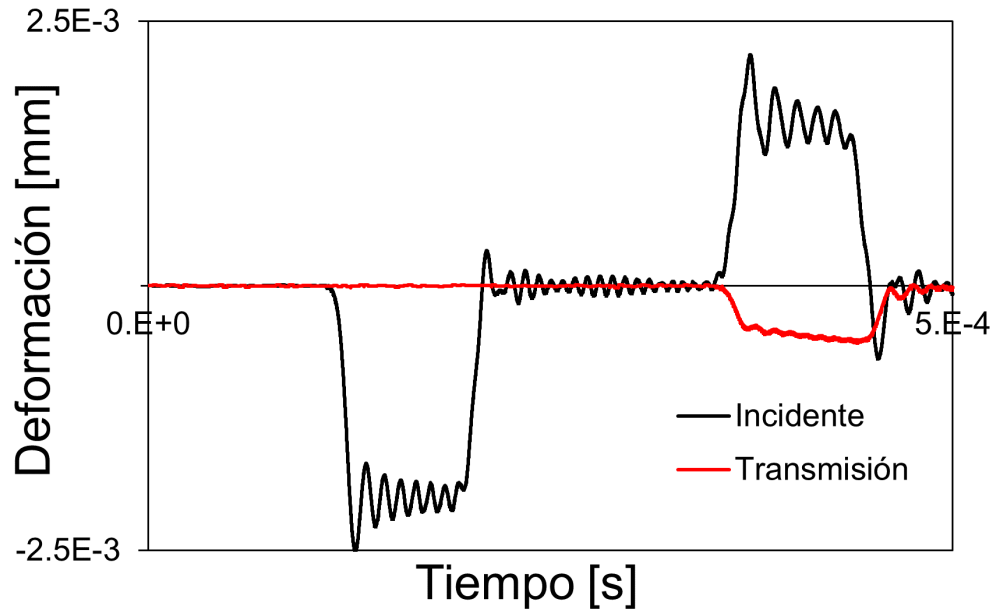


Figura 5.2: Pulso de deformación simulado aluminio 20[m/s].

Los resultados obtenidos de la simulación coinciden con los obtenidos por Tasneem [23], donde mediante análisis de elementos finitos predice un comportamiento similar de la SHPB. Es de importancia notar que esta curva es la que se utiliza para el post-procesamiento en el *software SURE-pulse*.

5.1.1. Análisis de sensibilidad de malla

Se realiza un análisis de los efectos del tamaño de malla en la simulación en los elementos de interés (posición de galgas) para 4 tipos diferentes medidas de celda: 0.1[mm], 0.8[mm], 1[mm] y 3[mm]. En la figura 5.3 se puede apreciar en los tamaños de malla grande (3[mm], 1[mm] y 0.8[mm]) no hay un efecto significativo en los resultado a mismas condiciones. Sin embargo, el tamaño más pequeño de malla (0.1[mm]) es el que altera los resultados, generando una saturación de los resultados que se escapa al análisis de estudio.

El tamaño de mallado pequeño genera un error de los datos en un promedio de un 3%.

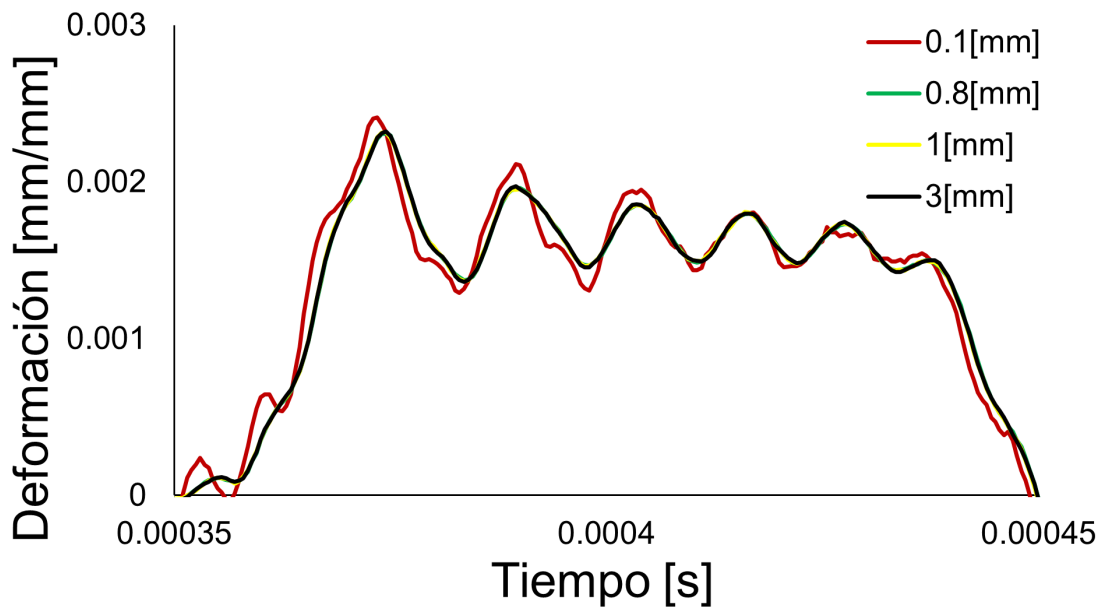


Figura 5.3: Análisis de sensibilidad de malla simulación Cobre C1100 a $20[m/s]$.

5.2. Pruebas en la SHPB en aluminio y cobre

La manipulación de la configuración experimental se realiza bajo las medidas de seguridad establecidas por Rojas Salinas (anexo A) [16].

Teniendo en cuenta lo anterior se realizan los ensayos con muestras cuyos efectos de la deformación acorde a la velocidad de proyectil se presentan en las figuras 5.4 y 5.5, estas variaciones de velocidad obtenidas en comparación a las objetivo son a causa del sistema de disparo. Se realizan varios impactos mostrando los más cercanos a lo requerido.

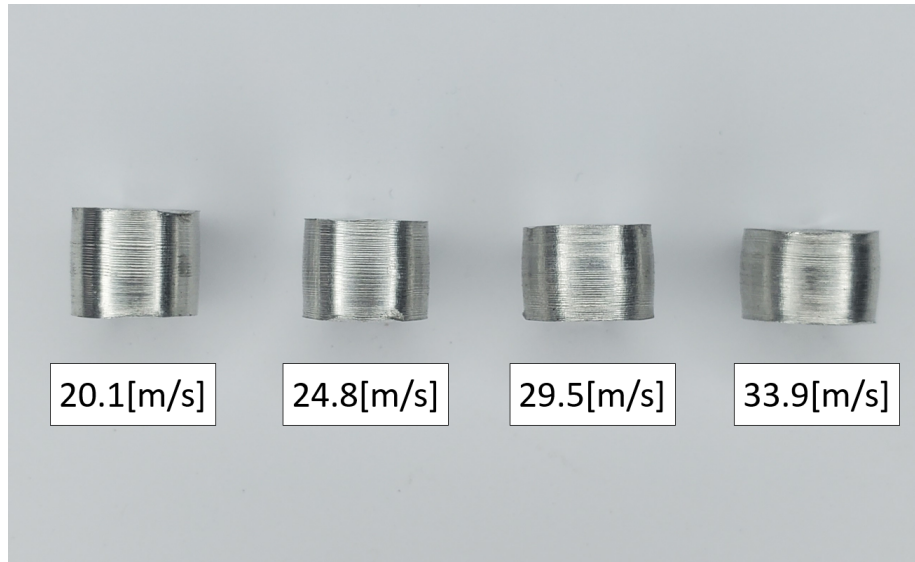


Figura 5.4: Muestras de aluminio 2017 ensayadas.

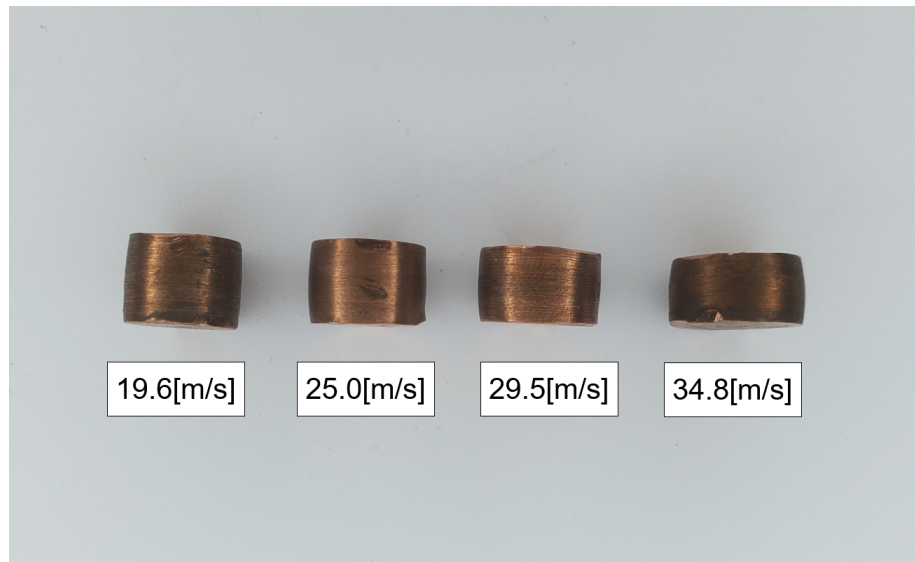


Figura 5.5: Muestras de cobre C1100 ensayadas.

Obteniéndose una curva de voltaje en el tiempo de la misma forma como se muestra en la figura 5.6.

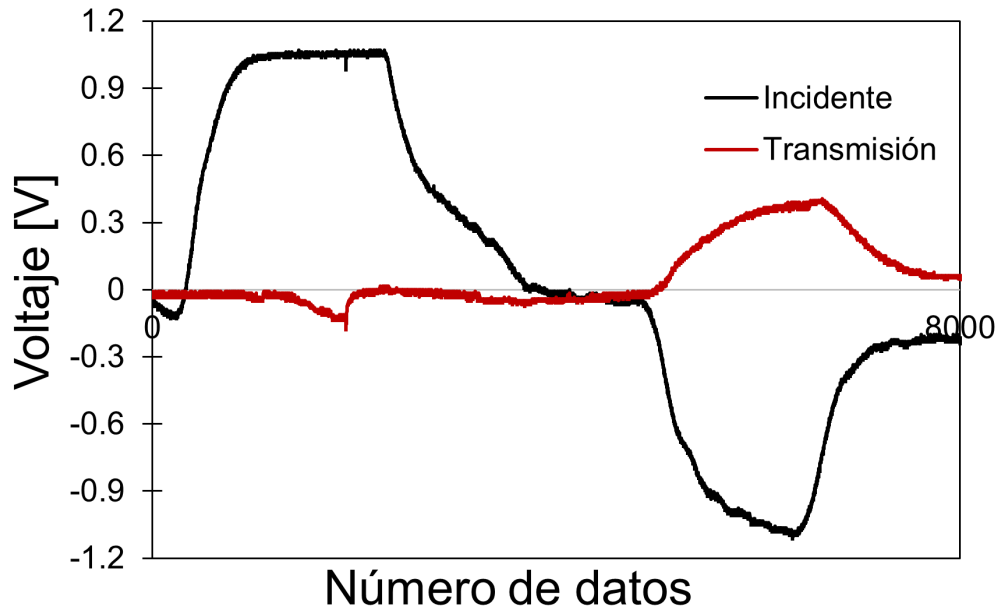


Figura 5.6: Pulso de deformación voltaje versus cantidad de datos para aluminio ensayado a $29.5[m/s]$.

Es importante mencionar que la tasa de muestreo del osciloscopio es de $50[kHz]$ y también, permite obtener alrededor de 8000 valores en el ensayo, lo que implica que el post-procesamiento no tiene menos datos vacío, con unos resultados más suavizados. El resto de los pulsos obtenidos en los ensayos se enlistan en el anexo C.

Comparando los pulsos simulados y experimentales de las figuras 5.2 y 5.6 hay diferencias significativas en la forma de la onda, esto se debe principalmente a que la simulación entrega un resultado donde la tasa de deformación del material es uniforme debido a que el impacto es perfecto [23], mientras que el experimento no lo es por lo que la transmisión de la onda de deformación no será aproximadamente cuadrada.

En el anexo C se puede apreciar que todas los pulsos de deformación siguen la misma idea anterior, debido a que los impactos no son perfectos.

5.3. Obtención de curvas esfuerzo deformación y extracción de parámetros Johnson-Cook

5.3.1. Curvas de esfuerzo deformación

Se ingresan los datos de los ensayos y simulaciones a *SURE-pulse*, la única diferencia entre ellos es que el de las simulaciones son en unidades deformación en el tiempo, mientras que en los ensayos son voltaje por cantidad de datos y la cantidad de datos pasa a unidades de tiempo dada la tasa de muestreo del osciloscopio que es de $50[kHz]$. Utilizando el *software* se pueden unificar los datos en forma de curvas esfuerzo deformación.

El programa permite exportar los datos en una hoja de cálculo *Excel*, lo que permite manipular los datos para poder extraer los parámetros Johnson-Cook.

En las figuras 5.7 y 5.9 se muestran las curvas esfuerzo deformación de los materiales a las 4 diferentes velocidades de impacto, mostrando una clara tendencia de comportamiento.

Las curvas experimentales de presentan en las figuras 5.8 y 5.10, donde se puede apreciar la tendencia del comportamiento pero siendo estos resultados más caóticos que los de las simulaciones, siendo un factor importante en la calidad de la medición son las galgas extensiométricas, ya que la cantidad de ensayos efectivos y medibles no superan las 10 por par de galgas, y si son continuos son menos.

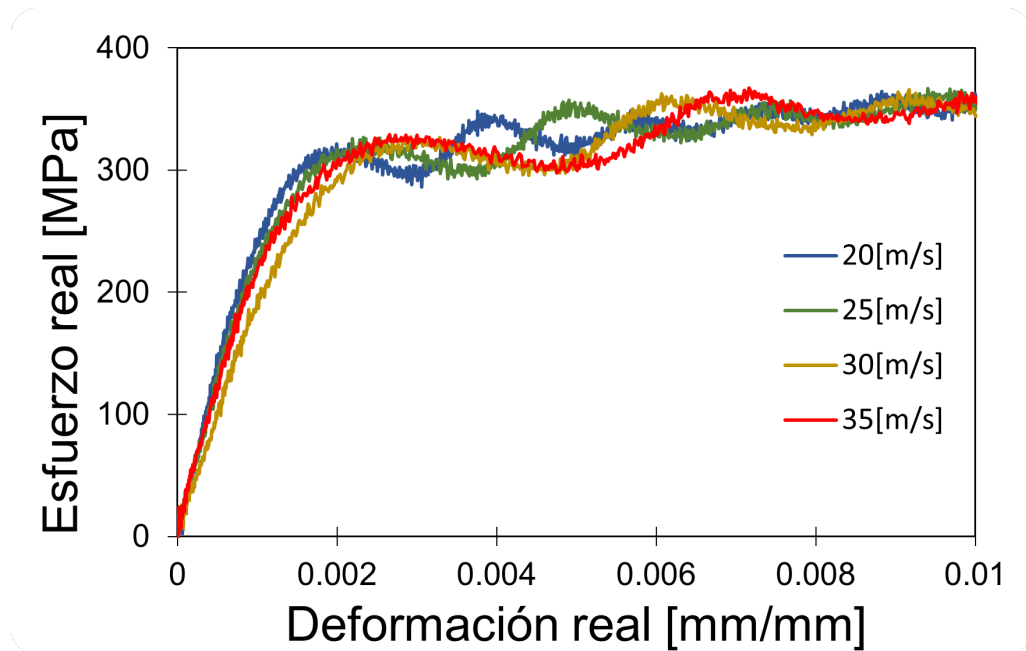


Figura 5.7: Curva esfuerzo deformación simulada aluminio.

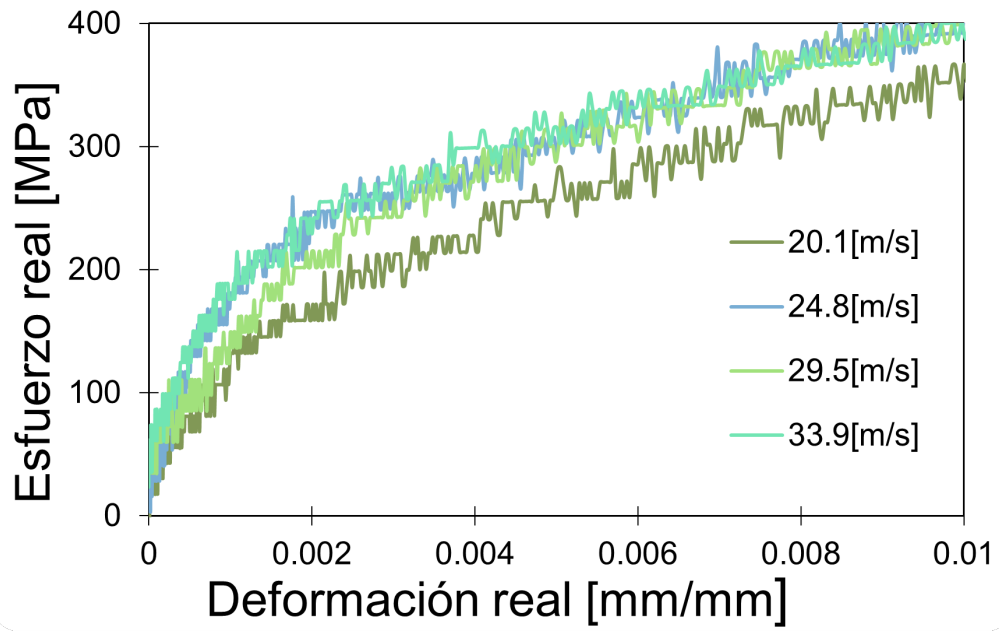


Figura 5.8: Curva esfuerzo deformación experimentada aluminio.

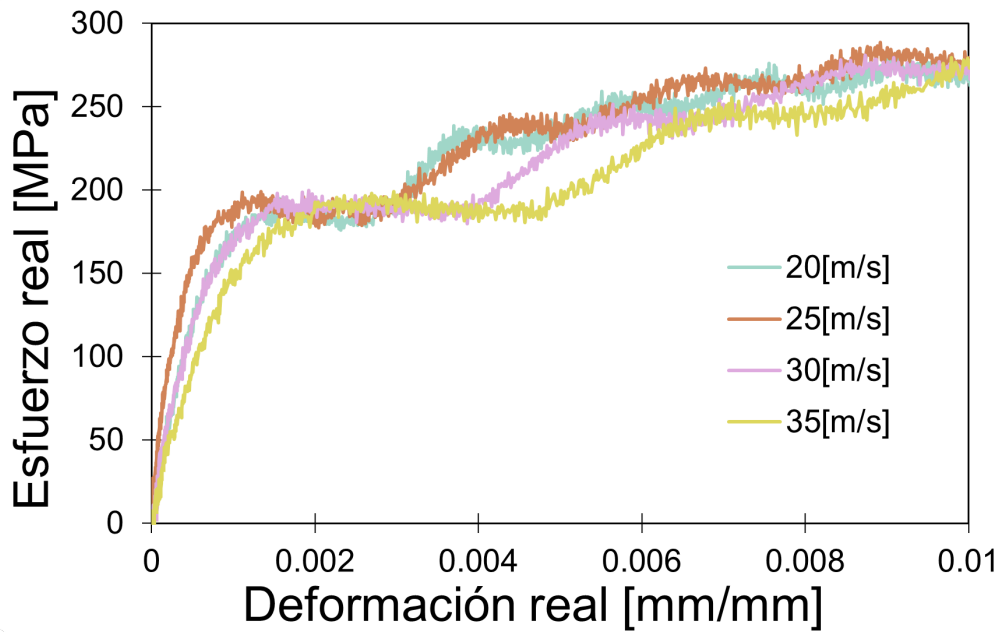


Figura 5.9: Curva esfuerzo deformación simulada cobre.

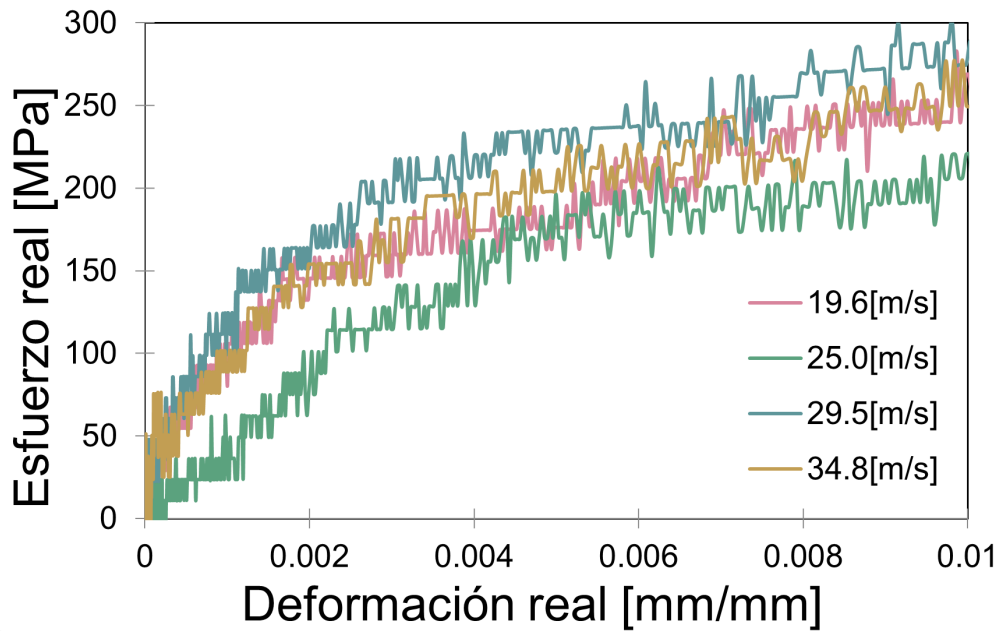


Figura 5.10: Curva esfuerzo deformación experimentada cobre.

En la figura 5.11 se muestra la comparación entre 2 curvas esfuerzo deformación simulada y experimental para un ensayo en aluminio a $20[m/s]$ y $20.1[m/s]$ respectivamente, se aprecia una clara diferencia en comportamiento pero una misma tendencia, lo que es un claro indicio del efecto de las condiciones ideales que se dan a los materiales en las simulaciones versus la realidad del comportamiento de estos.

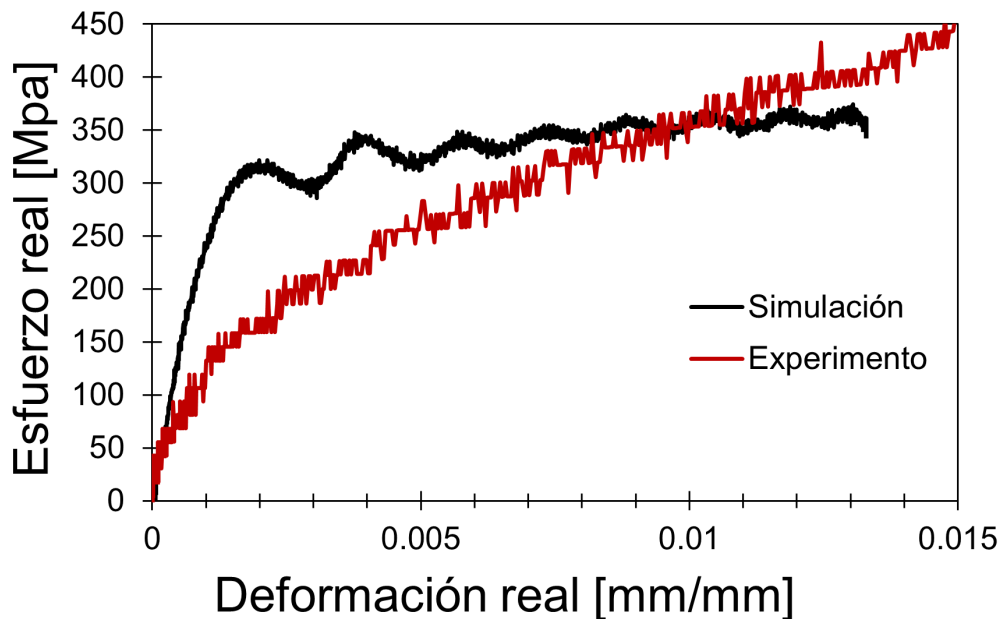


Figura 5.11: Curvas esfuerzo deformación simulada ($20[m/s]$) versus experimental ($20.1[m/s]$) ensayo en aluminio

5.3.2. Extracción de parámetros Johnson-Cook

El archivo *Excel* exportado permite realizar un ajuste mediante la ecuación Johnson-Cook (ecuación 2.2) mediante la herramienta *Solver* con un modelo no lineal.

Para que el modelo no lineal optimice los parámetros Johnson-Cook es necesario darle un punto de partida, y para esto se utilizan los valores extraídos de la literatura [18], los que se presentan a continuación en la tabla 5.1 donde adicionalmente se muestran el resultado de la extracción de los parámetros a las simulaciones a 4 velocidades y a los experimentos para cada material; cuyos valores son promediados.

Tabla 5.1: Comparación parámetros Johnson-Cook de la literatura (Lit) con las simulaciones (Sim) y experimentales (Exp) con sus respectivos errores porcentuales[18].

Material	Parám	Lit	Sim	Δ %	Exp	Δ %
Aluminio 2017	A[MPa]	148.4	143.6	1.5 %	144.3	3.5 %
	B[MPa]	345.5	312.8	4.4 %	359.5	6.7 %
	n	0.183	0.163	7.0 %	0.190	3.7 %
	C	0.001	0.00094	10.0 %	0.00102	3.7 %
Cobre C1100	A[MPa]	92	90.0	2.8 %	90.8	6.1 %
	B[MPa]	292	290.6	1.9 %	312.6	7.6 %
	n	0.31	0.304	1.2 %	0.326	7.4 %
	C	0.025	0.0248	0.7 %	0.0254	2.5 %

La tabla 5.1 muestra una tendencia de los resultados a los parámetros obtenidos de la literatura, validando no tan solo la simulación, sino que también los experimentos.

Es importante notar que la simulación no coincide completamente con los resultados de la literatura (tabla 5.1) ya que si bien ocurre un impacto perfecto en la simulación dentro del material homogéneo, hay elementos internos dentro de la simulación que le otorgan variabilidad a los resultados, estos efectos se deben principalmente a la discretización del sólido en forma de malla y al nivel de convergencia del modelo [15]. Los efectos de esta variabilidad se pueden apreciar en las curvas esfuerzo deformación resultantes para las simulaciones 5.7 y 5.9.

Cabe mencionar que los experimentos y la extracción de parámetros se lleva acabo previamente a la realización de ensayos, esto permitió conocer el comportamiento de la SHPB en los experimentos con aluminio 2017 y cobre C1100.

En las figuras 5.12, 5.14, 5.13 y 5.15 se muestra el ajuste Johnson-Cook a las curvas esfuerzo deformación, donde se nota a primera instancia que el ajuste no es perfecto; a pesar de que el error de los parámetros es bajo.

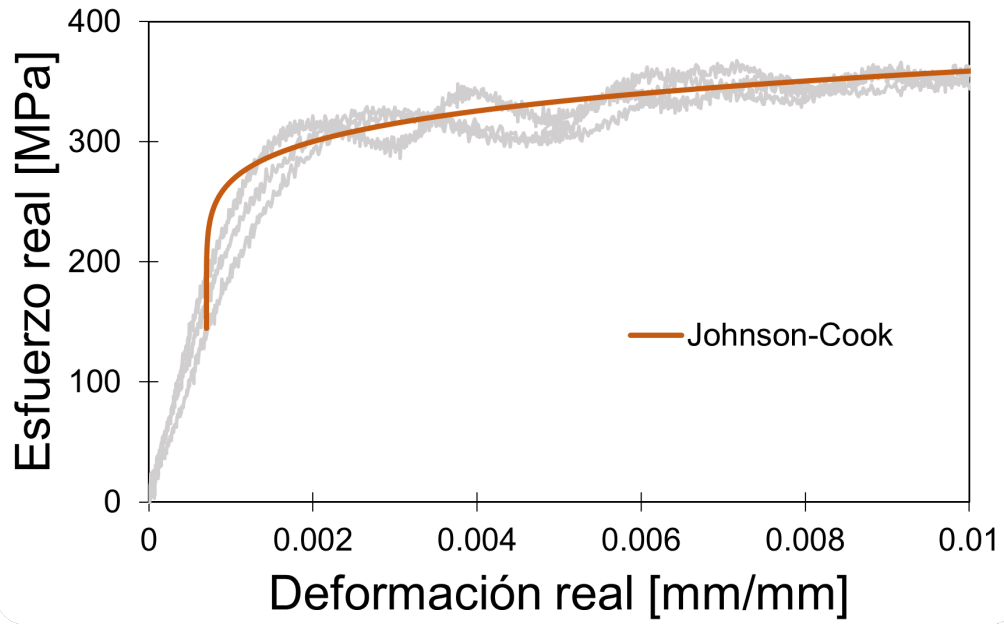


Figura 5.12: Curva esfuerzo deformación simulada del aluminio 2017 con ajuste Johnson-Cook.

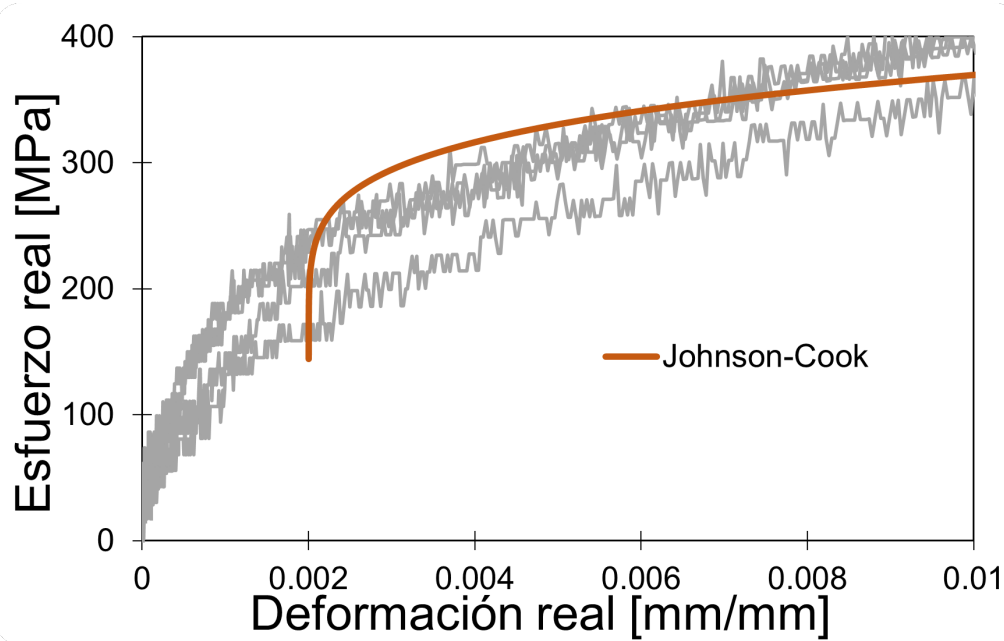


Figura 5.13: Curva esfuerzo deformación experimental del aluminio 2017 con ajuste Johnson-Cook.

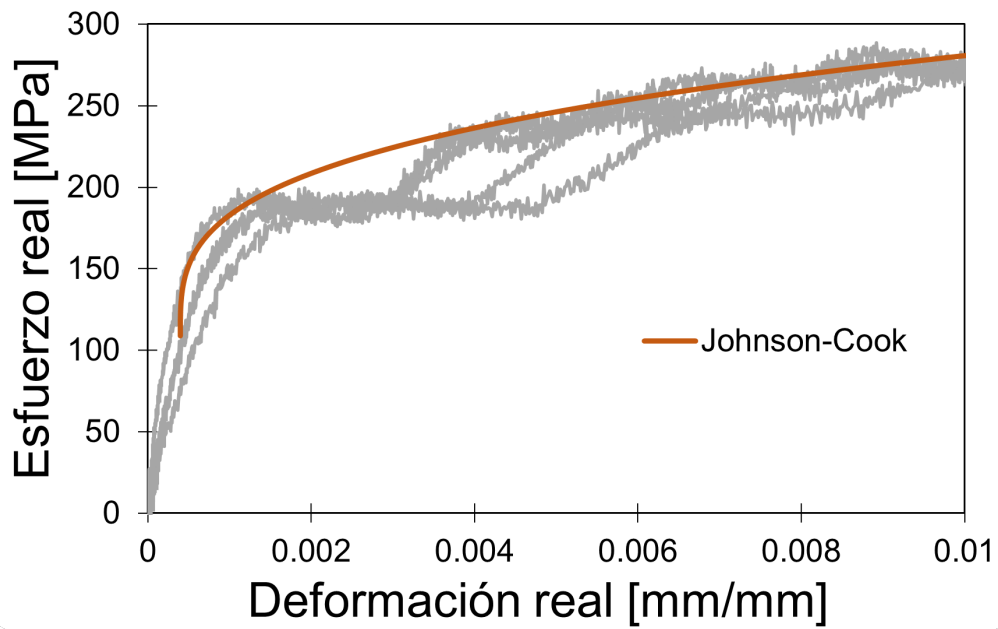


Figura 5.14: Curva esfuerzo deformación simulada del cobre C1100 con ajuste Johnson-Cook.

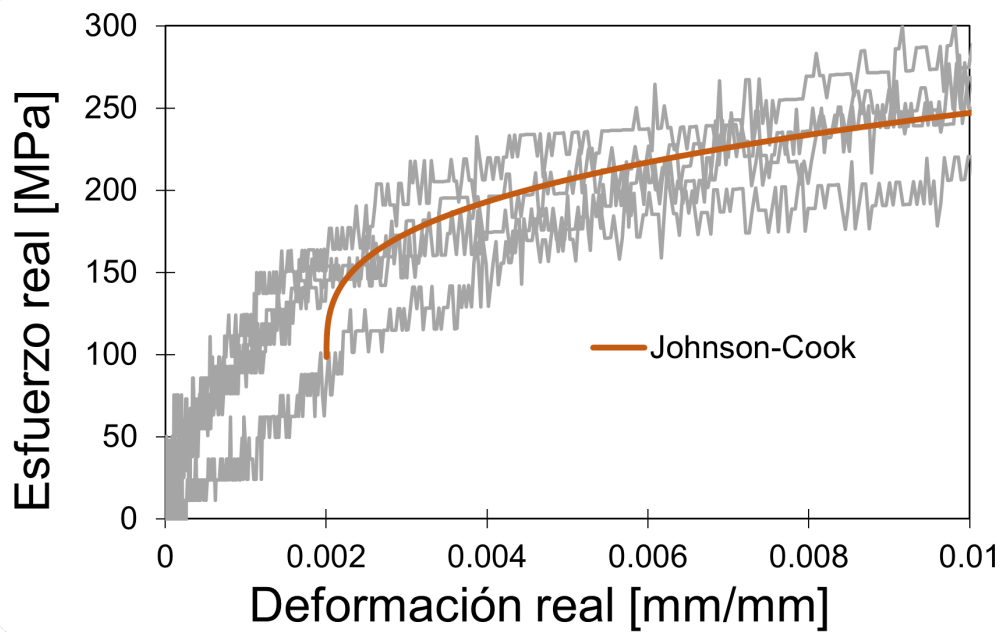


Figura 5.15: Curva esfuerzo deformación experimental del cobre C1100 con ajuste Johnson-Cook.

5.4. Determinación de parámetros Johnson-Cook aleación de titanio (Ti6Al4V)

5.4.1. Ensayos

El efecto de los ensayos en las probetas se muestran en la figura 5.16 donde se puede apreciar de manera visual, en comparación a los experimentos en aluminio y cobre (figuras 5.4 y 5.5), la deformación es mucho menor, a consecuencia de lo anterior se ve afectado el post-procesamiento de los datos.

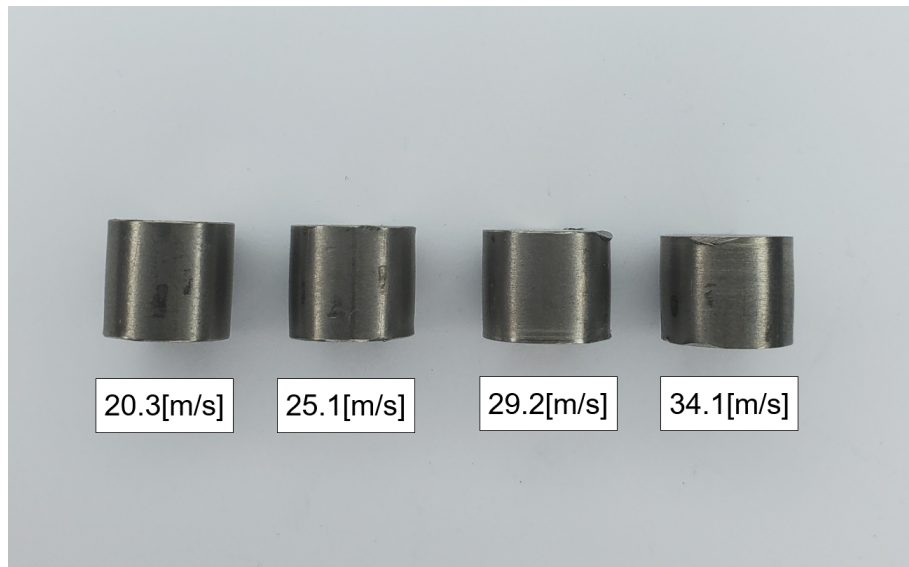


Figura 5.16: Muestras de titanio Ti6Al4V ensayadas

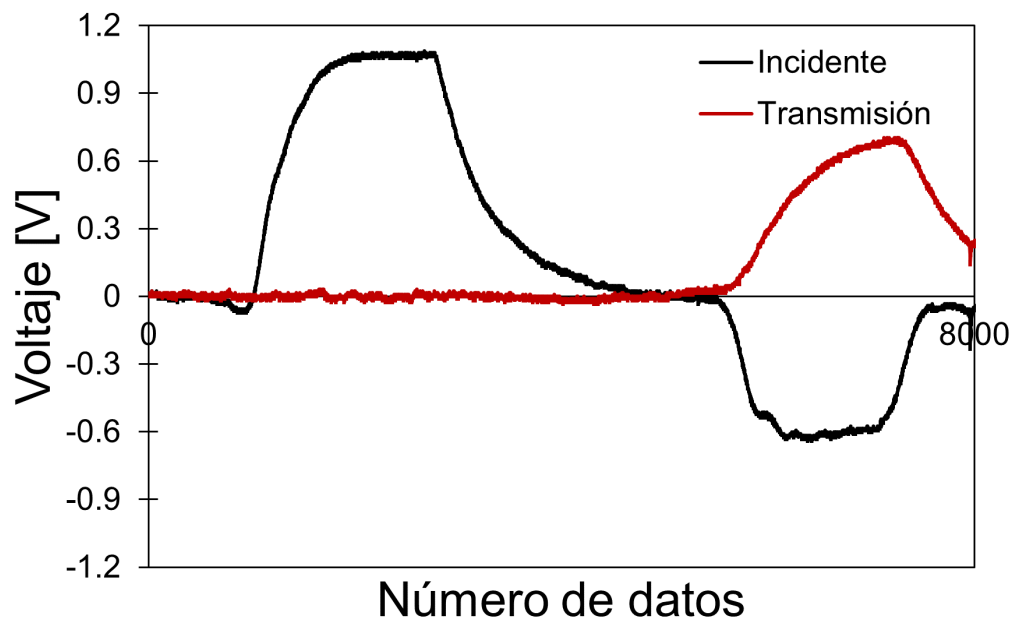


Figura 5.17: Onda de deformación en voltaje versus cantidad de datos para titanio ensayado a 25.1[m/s]

5.4.2. Curva esfuerzo deformación y extracción de parámetros Johnson-Cook

El resultado del post-procesamiento de los datos se aprecia en la figura 5.18, donde las curvas siguen una clara tendencia, casi traslapándose unas con las otras.

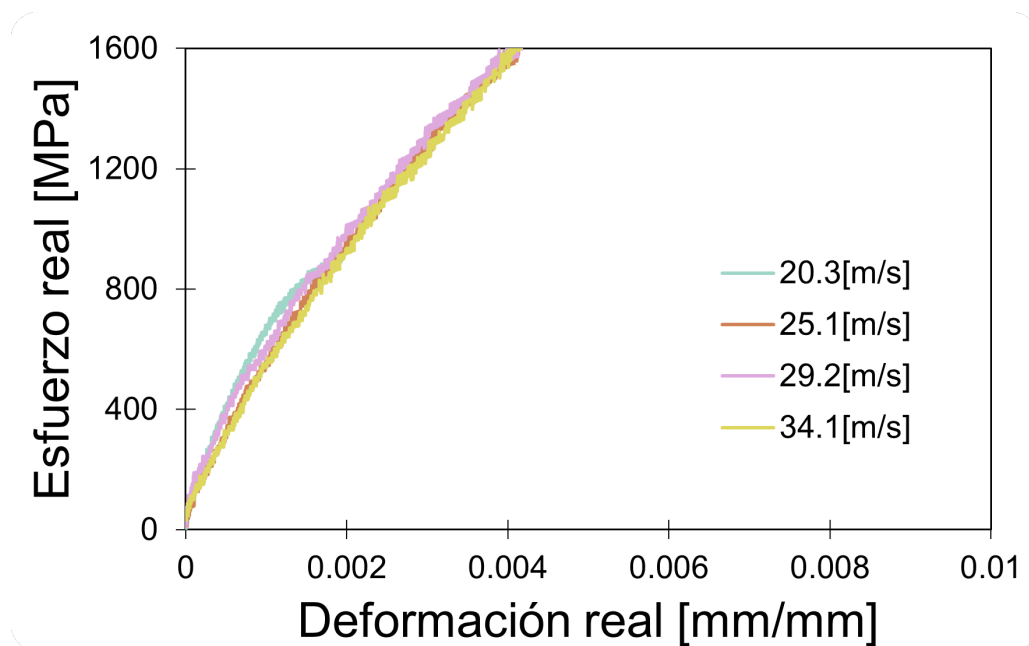


Figura 5.18: Curvas esfuerzo deformación experimental del titanio

Los parámetros extraídos de las curvas se presentan en la tabla 5.2, aquí es importante mencionar que para el ensayo a 20.3[m/s] no fue posible realizar un ajuste mediante Johnson-Cook debido a que la curva esfuerzo deformación termina antes del 0.002[mm/mm] de deformación. Para el resto se obtienen parámetros que convergen a números cercanos.

Tabla 5.2: Parámetros Johnson-Cook aleación de titanio

Velocidad [m/s]	A[MPa]	B[MPa]	n	C
20.3	N/A	N/A	N/A	N/A
25.1	814.0	2066.1	0.694	0.0152
29.2	871.8	2028.9	0.723	0.0157
34.1	822.3	2200.0	0.734	0.0158

Evaluando el promedio de los valores mostrados en la tabla 5.2 y haciéndolos calzar con todas las curvas esfuerzo deformación experimentales partiendo de los 0.002[mm/mm] de deformación se puede apreciar la efectividad del ajuste Johnson-Cook (figura 5.19).

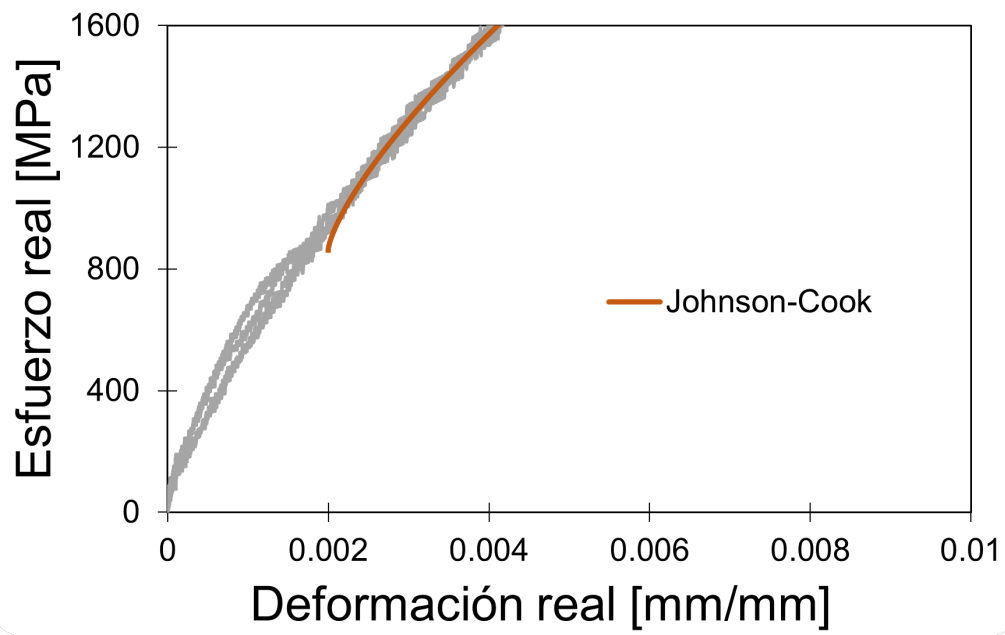


Figura 5.19: Curvas esfuerzo deformación experimental de titanio con ajuste Johnson-Cook

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

Dados los resultados expuestos la barra de compresión Hopkinson se encuentra en condiciones para ser usada en experimentos, asegurando que el impacto del proyectil genere una deformación menor que la del esfuerzo de fluencia de las barras.

El circuito de adquisición de datos construido mejora las incertidumbres eléctricas con una disminución del ruido en un 64.4%. Sin embargo, mejoras pueden seguir siendo aplicadas.

En el análisis de los resultados para la aleación Ti6Al4V una anomalía interesante se presentó donde la curva de esfuerzo deformación no llega a el 0.2% de deformación por lo que no fue considerado para la extracción de parámetros.

La barra de compresión es un experimento altamente peligroso si no se cumplen las medidas de resguardo, se recomienda un segundo protector auditivo para experimentos por sobre los 30[m/s].

Es importante notar que para obtener resultados exitosos en la SHPB la configuración del osciloscopio tiene que tener un trigger lo más alejado posible del voltaje nulo, de esta manera se evitan que los pulsos provenientes del ruido no afecte la medición. La posición más favorable es ajustar el trigger en una posición alta por donde debería pasar la onda y elegir la pendiente negativa, asegurando que la mayoría de los ensayos sean exitosos.

Se recomienda realizar cambio de galgas cada 10 ensayos o antes si se detecta que las galgas oscilan demasiado si se golpea la barra con un elemento que permita perturbar la vibración de esta.

Bibliografía

- [1] S. Yin, P. Cavaliere, B. A. R. J. H. L. W. L. y. R. L., “Cold spray additive manufacturing and repair: Fundamentals and applications,” 2018.
- [2] Dassault, S., “Abaqus/cae.”, <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/abaquscae/>.
- [3] Rel, i., “Surepulse.”, <https://www.relinc.com/sure-pulse>.
- [4] Microsoft, “Excel.”, <https://www.microsoft.com/es-es/microsoft-365/excel>.
- [5] Sierakowski, R. L., “Strain rate behaviour of metals and composites,” 1997.
- [6] K. Ahn, H. H. y. L. P., “Comparison of dynamic hardening equations for metallic materials with the variation of crystalline structures,” 2012.
- [7] Kaiser, M., “Advancements in the split hopkinson bar test,” 1998.
- [8] Weinong Chen, B. S., “Split hopkinson (kolsky) bar design, testing and applications,” 2011.
- [9] Arraztio, J., “Diseño, construcción y evaluación de barra de compresión hopkinson (kolsky),” 2020.
- [10] Megyesy E.F, G. R., “Manual de recipientes a presión: Diseño y cálculo,” 2000.
- [11] Alberto G.C.R, Gonzalo C.B.J, A. F., “Diseño y construcción de un cañón de gas de una etapa para pruebas de impacto a alta velocidad. *Ingeniería, investigación y tecnología*,16(2), 185-195,” 2015.
- [12] E, S. A., “The theory of high speed guns,” 1965.
- [13] Zienkiewicz O., T. R., “The finite element method: Its basis and fundamentals,” 2013.
- [14] Simulia, “Abaqus theory guide,” 2022, <http://130.149.89.49:2080/v6.14/books/stm/default.htm>.
- [15] CAE, “Cae assistant,” 2022, <https://caeassistant.com/blog/abaqus-standard-or-abaqus-explicit/>.
- [16] Salinas, C., “Implementación de mejoras y validación de barra de compresión hopkinson (kolsky),” 2022.
- [17] Baohe Yuan, B. Z., “Study on the relationship between open-circuit voltage, time constant and polarization resistance of lithium-ion batteries,” 2022.
- [18] Jing Xie, Daniel Nélias, H. W.-L. B. K. O. Y. I., “Simulation of the cold spray particle deposition process,” 2015, [10.1115/1.4030257](https://doi.org/10.1115/1.4030257).
- [19] Qiao, P., “Impact mechanics and high-energy absorbing materials: Review,” 2008.

- [20] T.H., C., “Mechanical behavior of materials,” 2000.
- [21] Texas, I., “Lmx24, lmx24x, lmx24xx, lm2902, lm2902x, lm2902xx, lm2902xxx quadruple operational amplifiers,” 2022.
- [22] Microchip, E., “Tc7662a charge pump dc-to-dc converter,” 2001.
- [23] Tasneem, N., “Study of wave shaping techniques of split hopkinson pressure bar using finite element analysis,” 2002.

Anexos

Anexo A. *Checklist* para la realización de ensayos [16]

REALIZACIÓN DE ENSAYOS EN EL SISTEMA DE BARRAS DE COMPRESIÓN DE HOPKINSON (SHPB)

PRECAUCIONES PREVIAS AL USO

- I Se recomienda que la operación del sistema por un equipo de al menos 2 integrantes.
- II Antes de realizar cualquier acción con el sistema de ensayos, asegúrese de tener los elementos de protección personal adecuados. Es **obligatorio** el uso de protección **acústica** durante la realización del ensayo en las instalaciones del sistema mismo y sus alrededores. El uso de protección **ocular** es **obligatorio** para los operadores directos del sistema. Se **requiere** el uso de **guantes de protección al manipular componentes del sistema**. Se **recomienda** el uso de **protección mecánica y eléctrica**. Es recomendado tanto para operadores como observadores el uso de ropa y calzado de seguridad durante el lapso de realización de ensayos.
- III Asegúrese de que el sistema **NO** se encuentra conectado a la red eléctrica ni a un suministro de gas a alta presión activo.
- IV Verificar la ubicación del proyectil dentro del cañón.
- V Verificar que el estanque y la válvula de acción neumática **NO** están presurizados.

PRECAUCIONES DURANTE EL USO

- I Siempre lleve registro de cada paso del procedimiento en progreso.
- II De aviso al momento de manipular componentes neumáticos y eléctricos activos.
- III En caso de utilizar un compresor de aire eléctrico, solo mantenga la alimentación eléctrica para el llenado necesario del estanque. **NO** mantenga conectado el compresor a la red eléctrica durante el resto del tiempo del trabajo.
- IV Mantenga siempre una distancia prudente de los sistemas neumáticos activos y la zona de ensayos.
- V **NUNCA** mantenga encendido el interruptor de seguridad del botón de lanzamiento si no está preparado para
- VI Al finalizar la realización de ensayos, asegúrese de apagar todo sistema eléctrico y electrónico del sistema de ensayos, así como despresurizar todo sistema neumático.

REALIZACIÓN DE ENSAYOS EN EL SISTEMA DE BARRAS DE COMPRESIÓN DE HOPKINSON (SHPB)

CHECKLIST PREVIO A LA REALIZACIÓN DE ENSAYOS

- 1 Verificar que las válvulas de alimentación del compresor (o columna de gas), de entrada al estanque y la válvula de acción neumática de salida, se encuentren completamente cerradas.
- 2 Verificar que el sistema eléctrico se encuentra apagado y la alimentación de baterías del sistema de adquisición se encuentra en buen estado.
- 3 Verifique que los interruptores del sistema eléctrico, de disparo y electrónico se encuentran abiertos.
- 4 Verificar el estado de las conexiones entre los gabinetes del sistema eléctrico y electrónico.
- 5 Verificar el estado de carga y correcto funcionamiento del cronógrafo balístico
- 6 Si el compresor se encuentra presurizado, tomando las precauciones necesarias, y desconectado de la red eléctrica, vacíe el contenido de este.

CHECKLIST DE REALIZACIÓN DEL ENSAYO

- 1 Conecte el compresor a la red eléctrica y enciéndalo hasta alcanzar la presión suficiente para realizar la prueba. Recuerde que el estanque y la válvula deben ser presurizados. La válvula debe mantenerse presurizada durante todo el ensayo.
- 2 Encienda el circuito de adquisición de datos y verifique que el voltaje registrado en el osciloscopio al manipular los potenciómetros de ajuste alcanzan valores cercanos a 0V. De lo contrario, mida la resistencia de los extensómetros y verifique que se encuentra en torno a los 350Ω. Si no se registra resistencia, el extensómetro debe ser reemplazado.
- 3 Verifique el estado de la trampa de momentum y restituyala a una superficie uniforme de ser necesario. Puede que necesite extraer la masilla completa para realizarlo. Recuerde usar el envoltorio de cartón para evitar la adhesión a la copa de metal.
- 4 Usando la bayoneta flexible, empuje el proyectil al fondo del cañón, cuidando no golpear la boquilla de la válvula al final de este.
- 5 Posicione la barra incidente en el final de la boca del cañón, y la barra de transmisión en una posición en la que le permita montar la probeta de ensayo.
- 6 Registre las dimensiones iniciales a la probeta de ensayo.
- 7 Abra el contenedor de la zona de ensayos y verifique que no interfiere con el deslizamiento de las barras.
- 8 Ubique la probeta de ensayo centrada entre ambas barras en la zona de ensayos del sistema. Procure mantener la barra incidente ubicada en la boca del cañón al finalizar la ubicación.
- 9 Cierre el contenedor de la zona de ensayos.
- 10 Encienda la alimentación eléctrica del sistema de disparo, sin encender el interruptor de seguridad de la botonera de lanzamiento.
- 11 Encienda los interruptores del sistema electrónico de adquisición de señal.
- 12 Inicie el osciloscopio y conecte los terminales del canal 1 (CH1) a los bornes de la barra incidente, y el terminal del canal 2 (CH2) a las tomas de la barra de transmisión ubicados en el gabinete de adquisición del sistema. Bornes de color amarillo indica toma de señal, y el verde a tierra.

REALIZACIÓN DE ENSAYOS EN EL SISTEMA DE BARRAS DE COMPRESIÓN DE HOPKINSON (SHPB)

- 13 Comience la calibración del circuito de medición, centrando en 0V la medición de voltaje registrado en los canales del osciloscopio. Para esto utilice los potenciómetros de cada canal en el gabinete de adquisición del sistema de ensayos. **A partir de este punto debe asegurarse luego de cada paso que el circuito se mantenga balanceado.**
- 14 Configure los parámetros de medición y adquisición del osciloscopio según lo requiera la naturaleza del ensayo a realizar.
- 15 Presurice el estanque a la presión que se requiera para el ensayo. De aviso de dicha acción y verifique que no hay fugas a través de la válvula de acción neumática o la de alivio
- 16 Conecte la alimentación de aire presurizado a la válvula neumática, de ser necesario aumente la presión de acción en el compresor. De aviso de esta acción.
- 17 Verificar y registrar las lecturas de presión para ambos componentes.
- 18 En el software del osciloscopio, configure el método de adquisición de datos de la señal para un único accionamiento (Single, en general). Ajuste también la forma de la señal que debe sobrepasar el umbral para que sea una pendiente descendente (Falling edge o similar en algunos osciloscopios).
- 19 Encienda el interruptor de activación del pulsador de lanzamiento. Esto permitirá iniciar la configuración del accionamiento del osciloscopio mediante la señal recibida. De aviso de la activación del pulsador.
- 20 Vuelva a balancear el voltaje de salida del circuito de adquisición y en el osciloscopio, ajuste el umbral de accionamiento de la adquisición de datos. Utilice para este umbral, el canal del osciloscopio conectado al circuito de adquisición de la barra incidente.
- 21 Verifique que el sistema de adquisición no se ha activado y el osciloscopio aun esta en el modo de espera para la activación mediante el umbral
- 22 Realizar el aviso a las inmediaciones de que el sistema esta armado y listo para disparar.
- 23 Antes de efectuar el ensayo, procure avisar al resto de los asistentes y circulantes en las inmediaciones, seguido de una cuenta regresiva para el disparo.
- 24 Efectue el lanzamiento.
- 25 Luego del disparo, gire el botón de disparo para retornar la válvula a su estado cerrado. Hágalo repetidas veces para asegurarse de que quede cerrada.
- 26 Apague los interruptores de alimentación de la botonera de lanzamiento y la alimentación AC del gabinete.
- 27 En el software del osciloscopio, verifique que se ha accionado la adquisición de datos. Esto debería verse reflejado con una etiqueta de **STOP** en el display de la señal.
- 28 Guarde los datos de ambos canales, **CH1** y **CH2**, por separado.
- 29 Seguido de esto, apague el circuito de adquisición de señal.
- 30 Recupere la probeta de ensayo y registre su diámetro y longitud posterior al ensayo.
- 31 Para finalizar el ensayo, vacíe por completo el estanque de manera manual utilizando la válvula de alivio en este. Vacíe el contenido de los equipos presurizados y desconéctelos de la red eléctrica.

Anexo B. Curvas deformación en el tiempo simuladas

B.1. Simulación Aluminio 2017

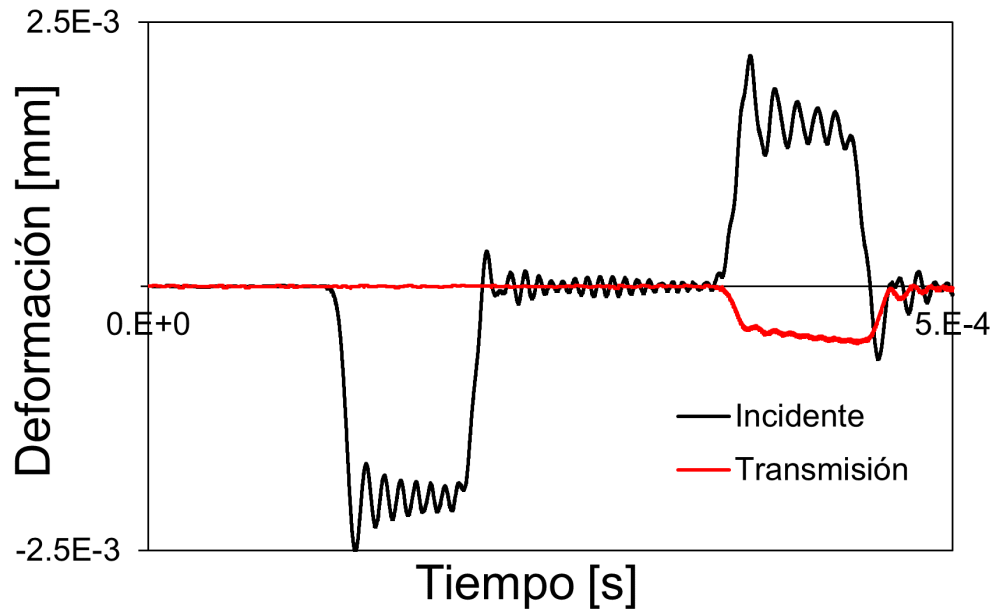


Figura B.1: Curva de deformación simulada aluminio 2017 a 20[m/s]

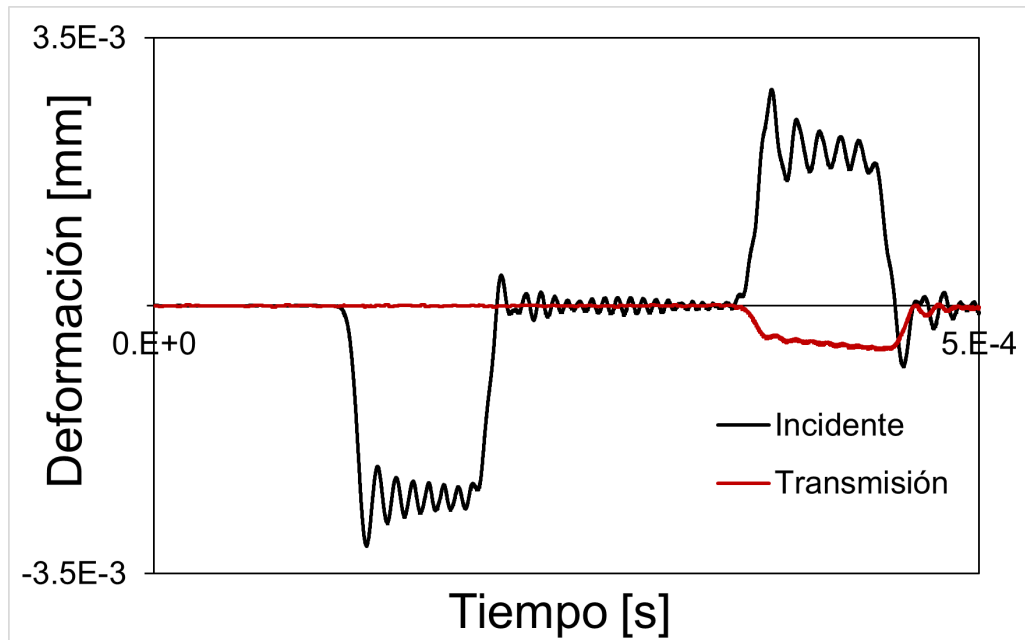


Figura B.2: Curva de deformación simulada aluminio 2017 a 25[m/s]

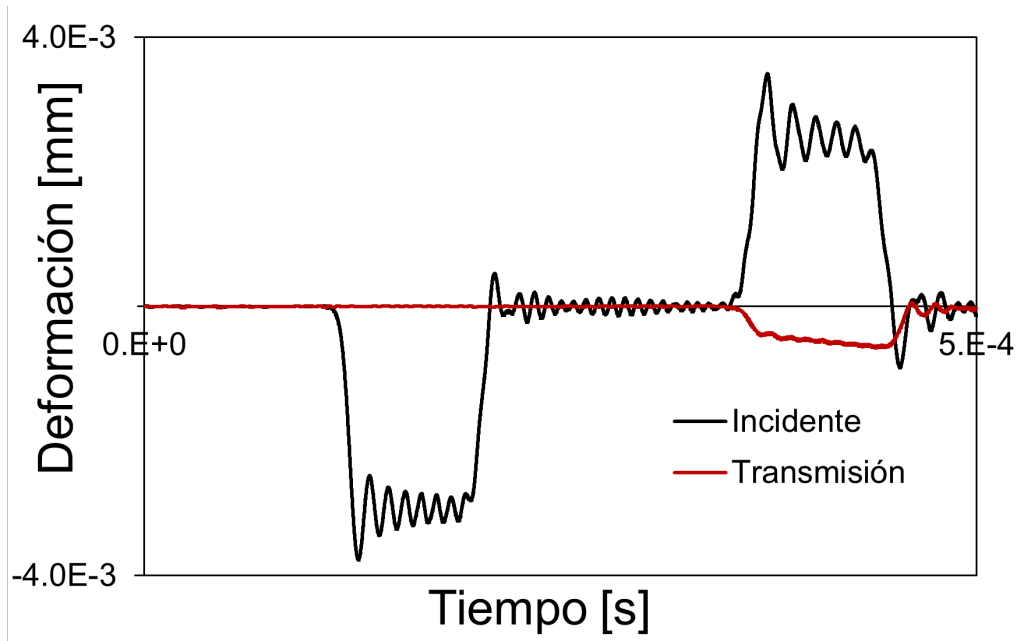


Figura B.3: Curva de deformación simulada aluminio 2017 a 30[m/s]

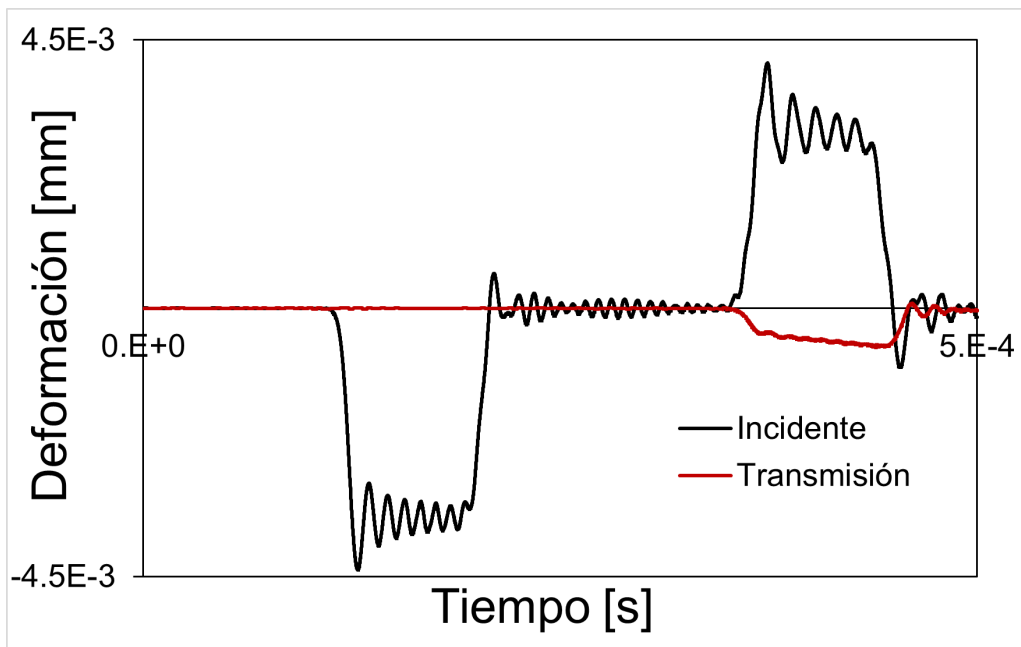


Figura B.4: Curva de deformación simulada aluminio 2017 a 30[m/s]

B.2. Simulación cobre C1100

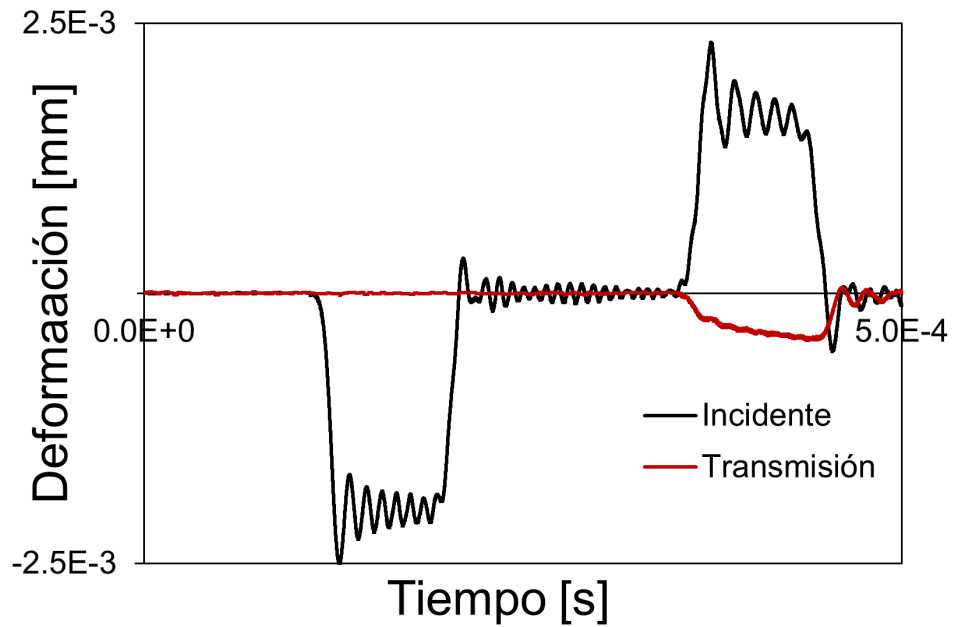


Figura B.5: Curva de deformación simulada cobre C1100 a 20[m/s]

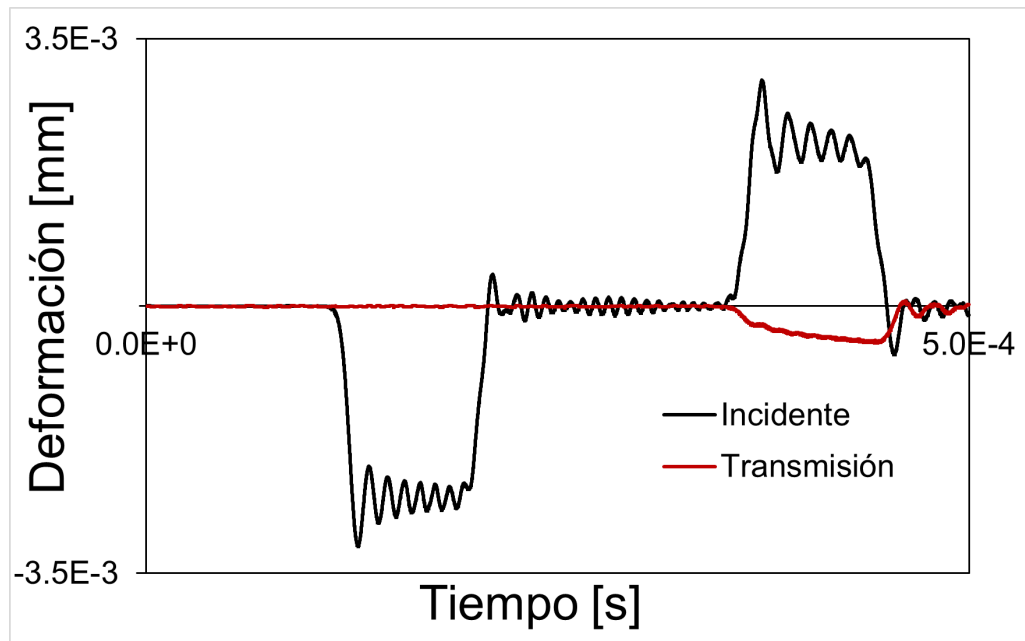


Figura B.6: Curva de deformación simulada cobre C1100 a 25[m/s]

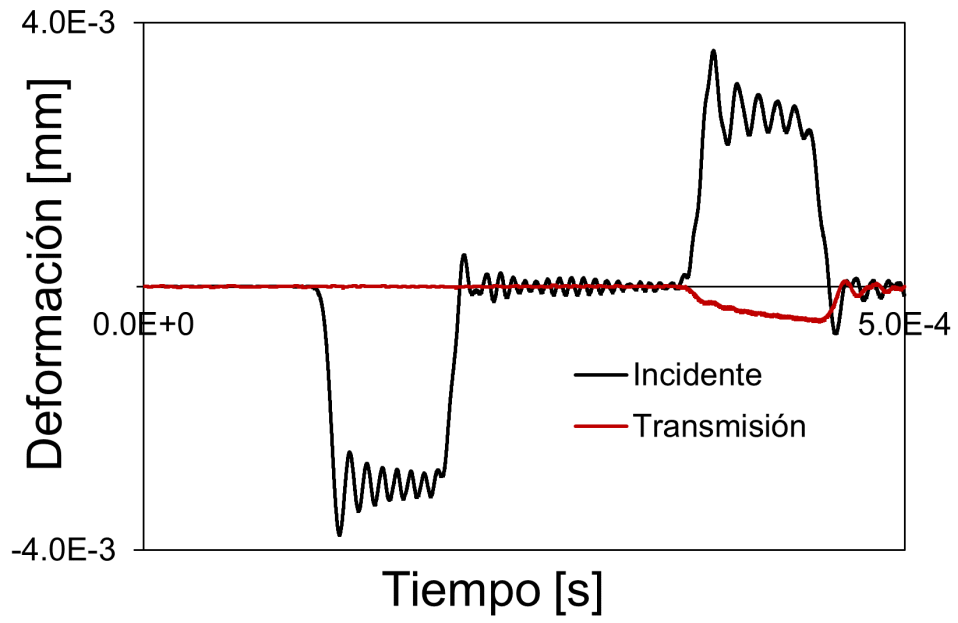


Figura B.7: Curva de deformación simulada cobre C1100 a 30[m/s]

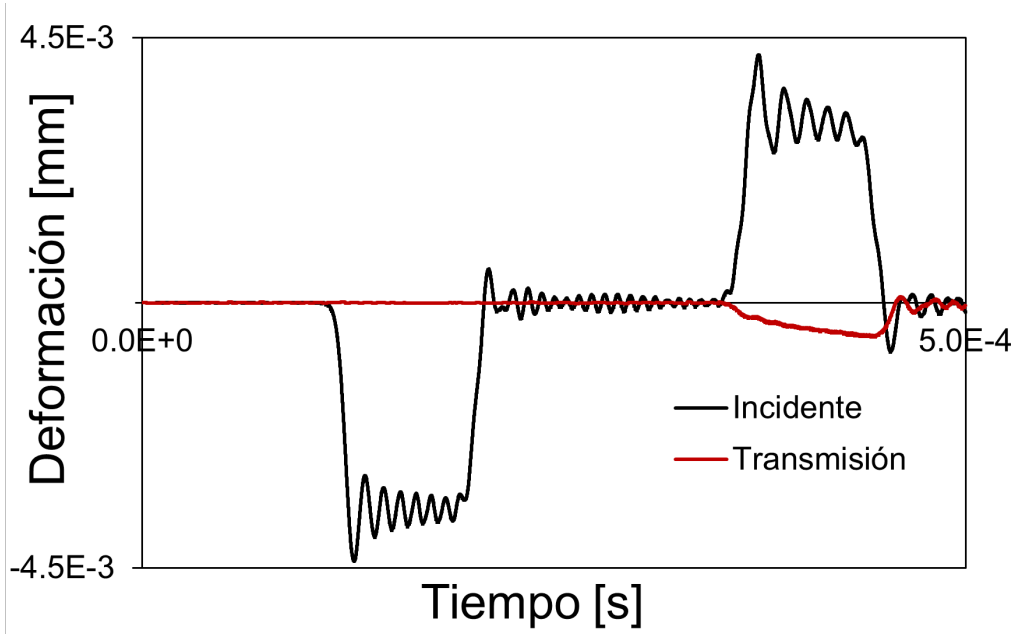


Figura B.8: Curva de deformación simulada cobre C1100 a 35[m/s]

Anexo C. Curvas deformación experimentales

C.1. Ensayos aluminio 2017

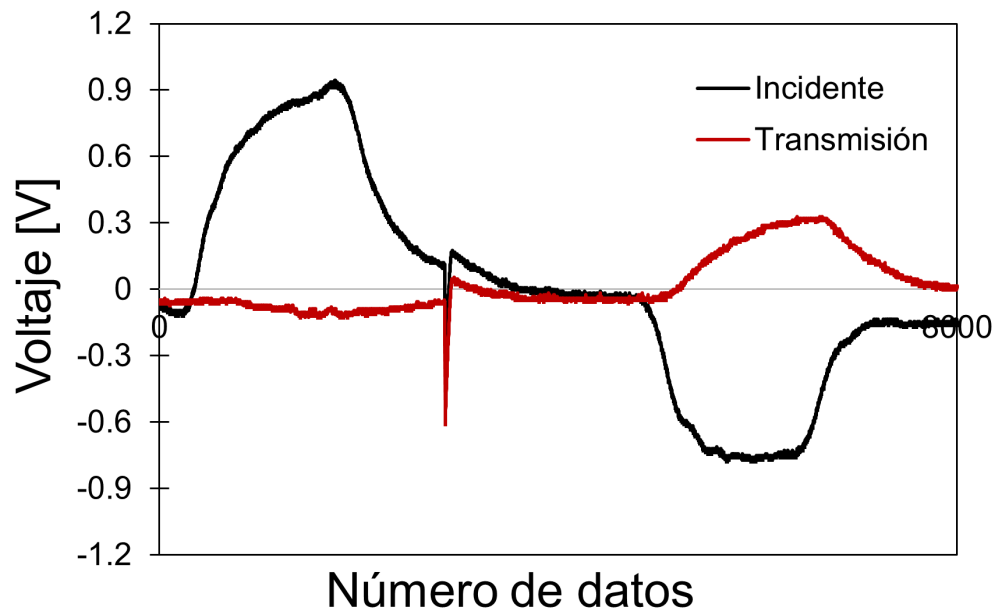


Figura C.1: Curva deformación experimental aluminio 2017 a 20.1[m/s]

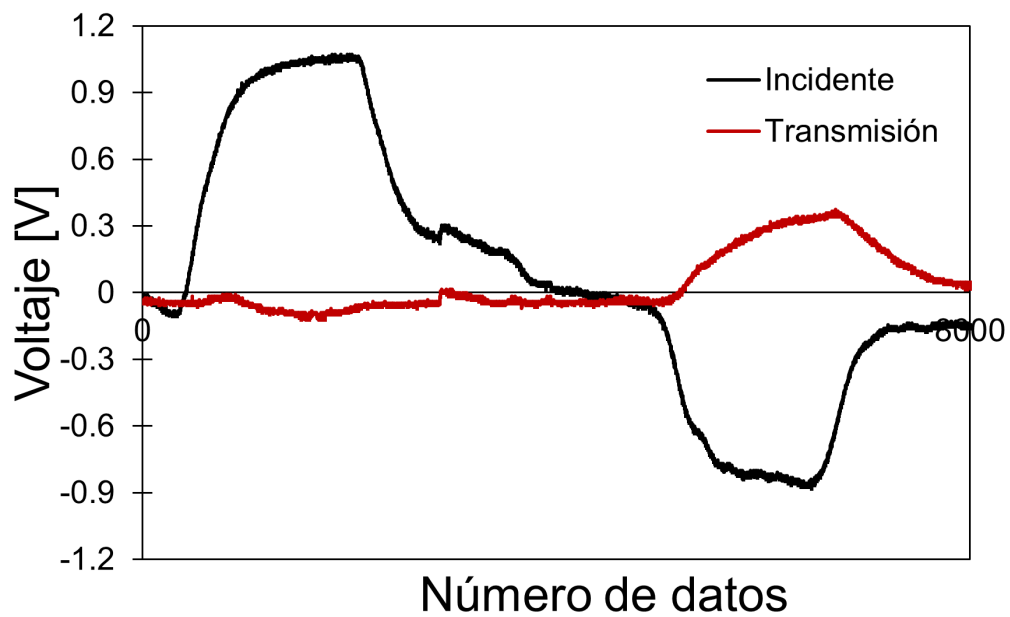


Figura C.2: Curva deformación experimental aluminio 2017 a 24.8[m/s]

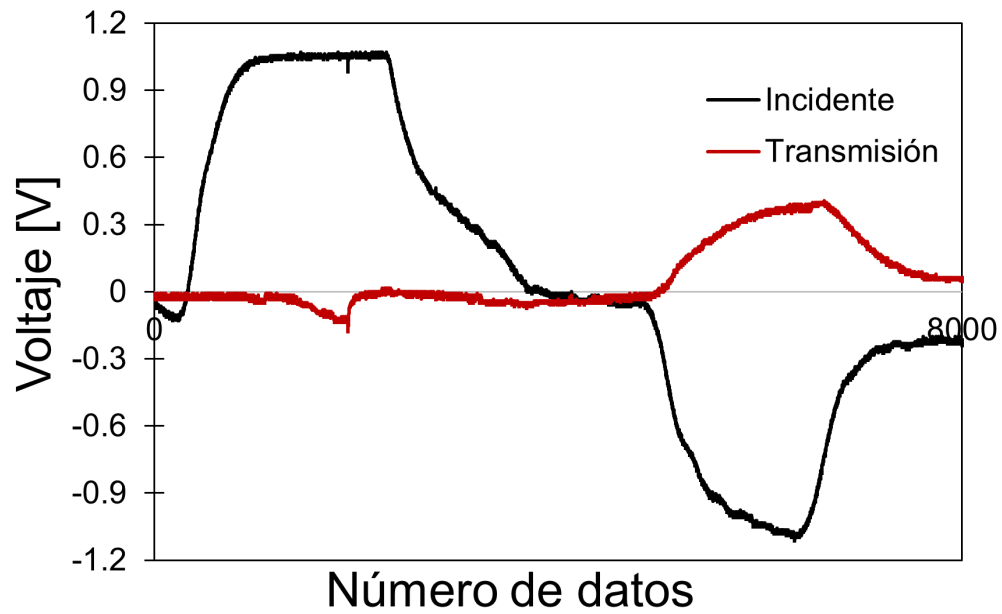


Figura C.3: Curva deformación experimental aluminio 2017 a 29.5[m/s]

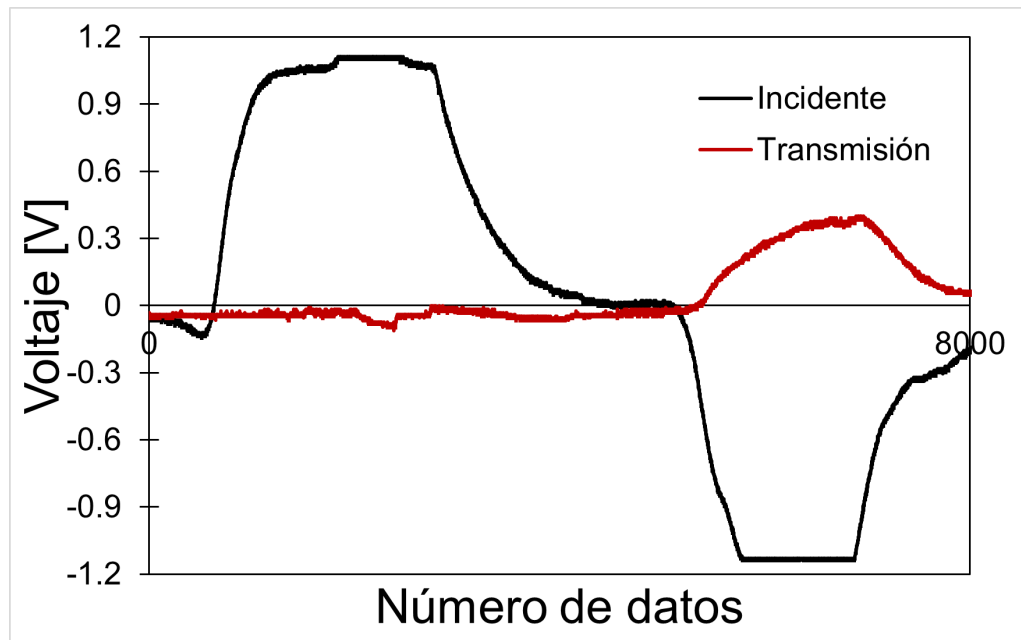


Figura C.4: Curva deformación experimental aluminio 2017 a 33.9[m/s]

C.2. Ensayos cobre C1100

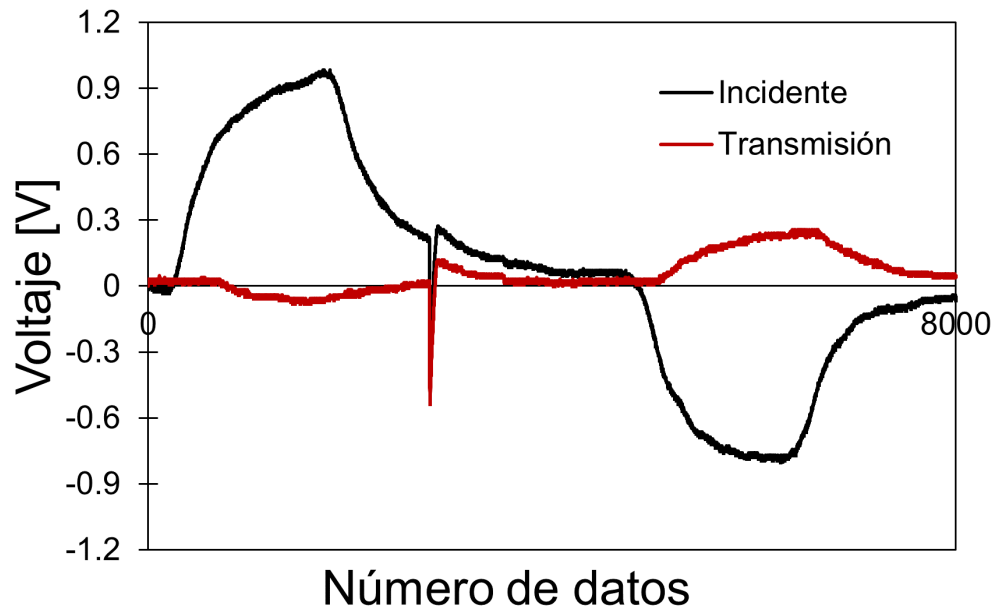


Figura C.5: Curva deformación experimental cobre C1100 a 19.6[m/s]

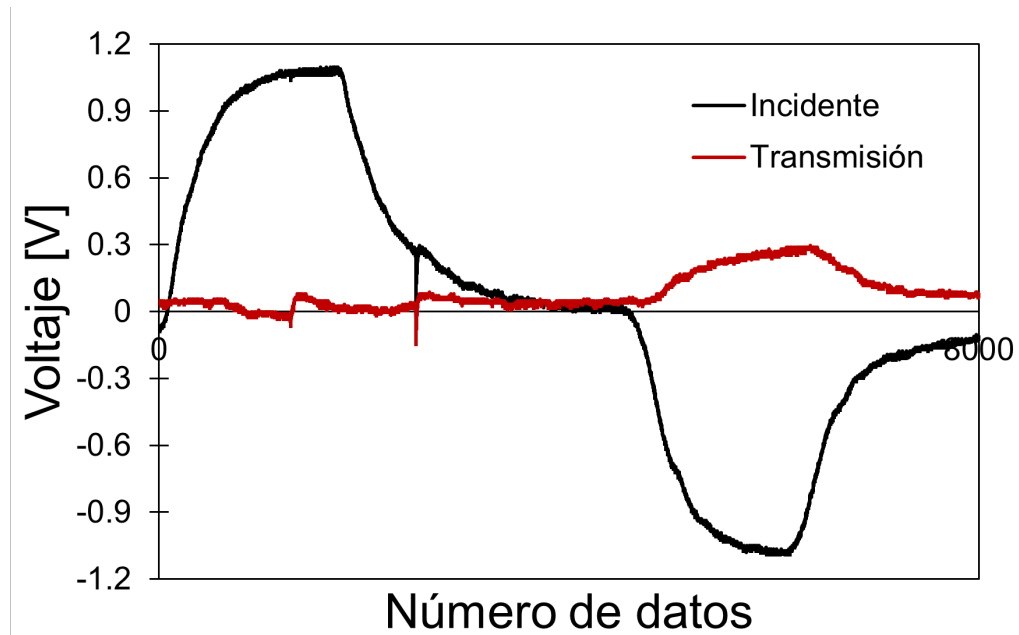


Figura C.6: Curva deformación experimental cobre C1100 a 25.0[m/s]

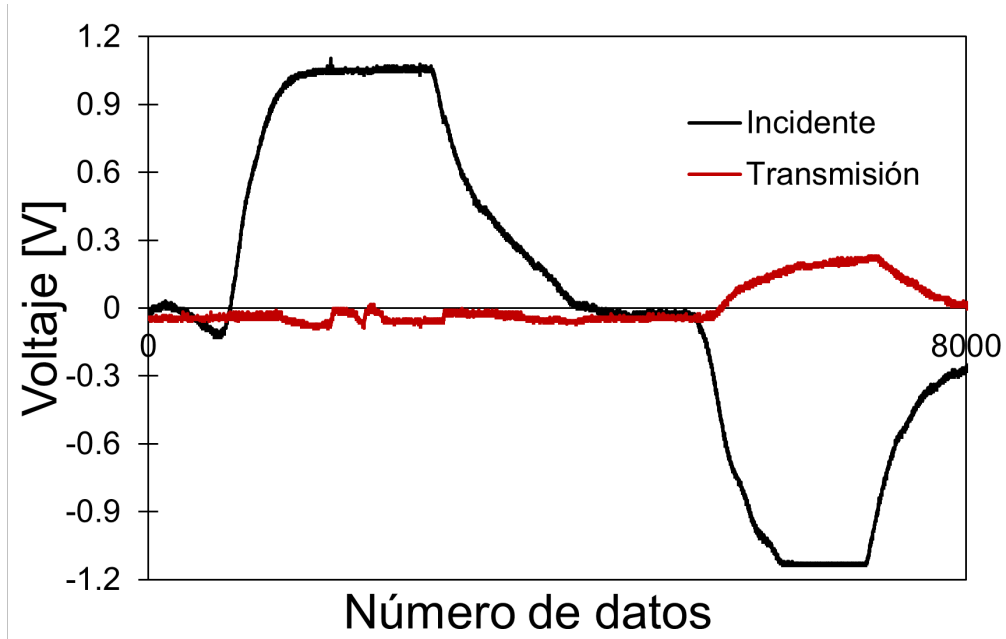


Figura C.7: Curva deformación experimental cobre C1100 a 29.5[m/s]

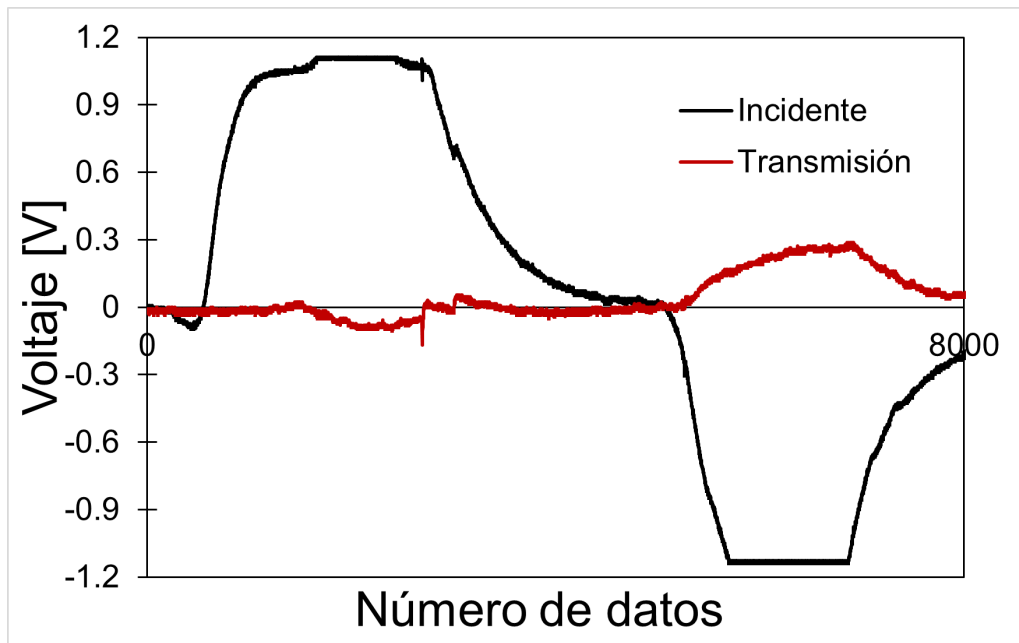


Figura C.8: Curva deformación experimental cobre C1100 a 34.8[m/s]

C.3. Ensayos titanio Ti6Al4V

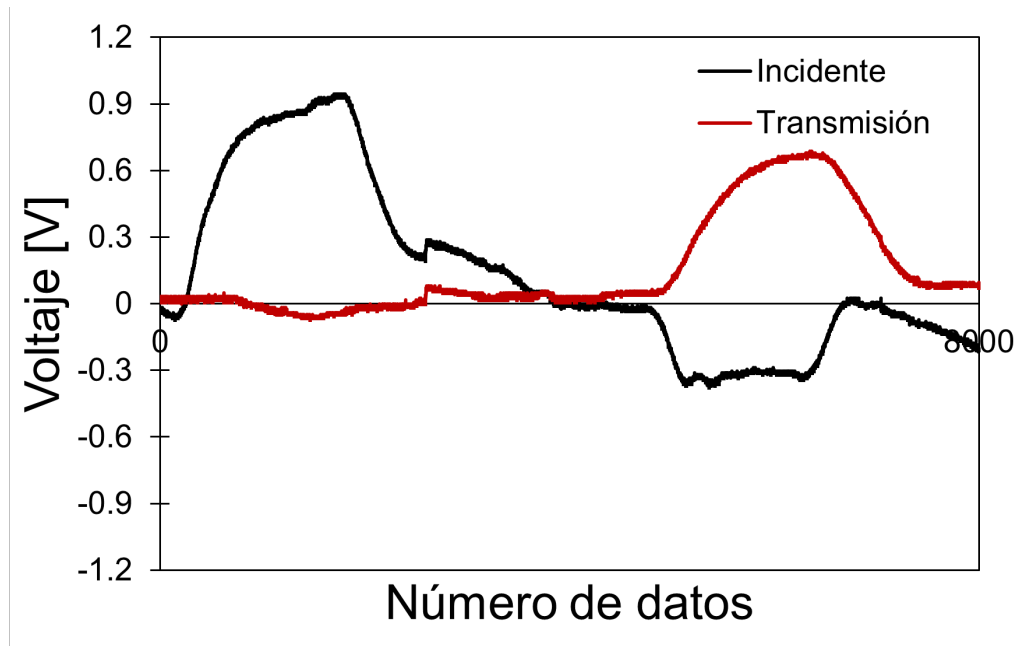


Figura C.9: Curva deformación experimental titanio Ti6Al4V a 20.3[m/s]

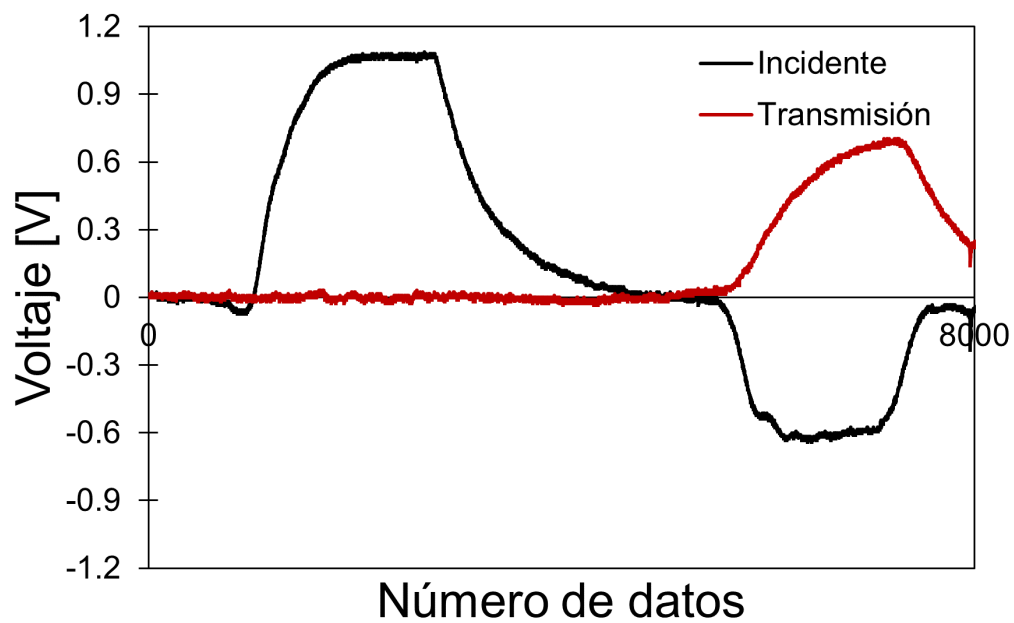


Figura C.10: Curva deformación experimental titanio Ti6Al4V a 25.1[m/s]

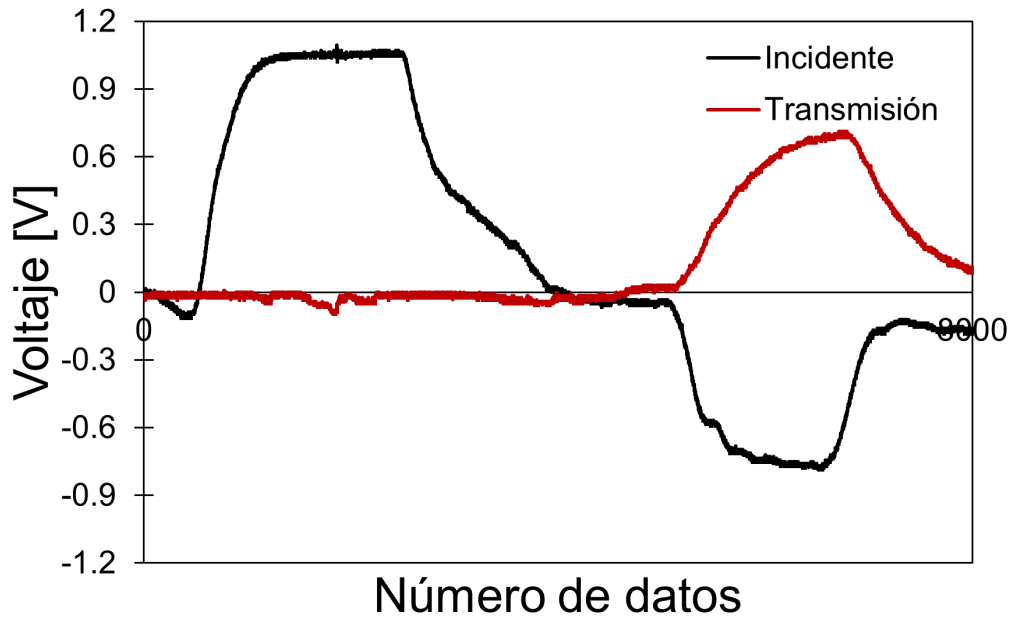


Figura C.11: Curva deformación experimental titanio Ti6Al4V a 29.2[m/s]

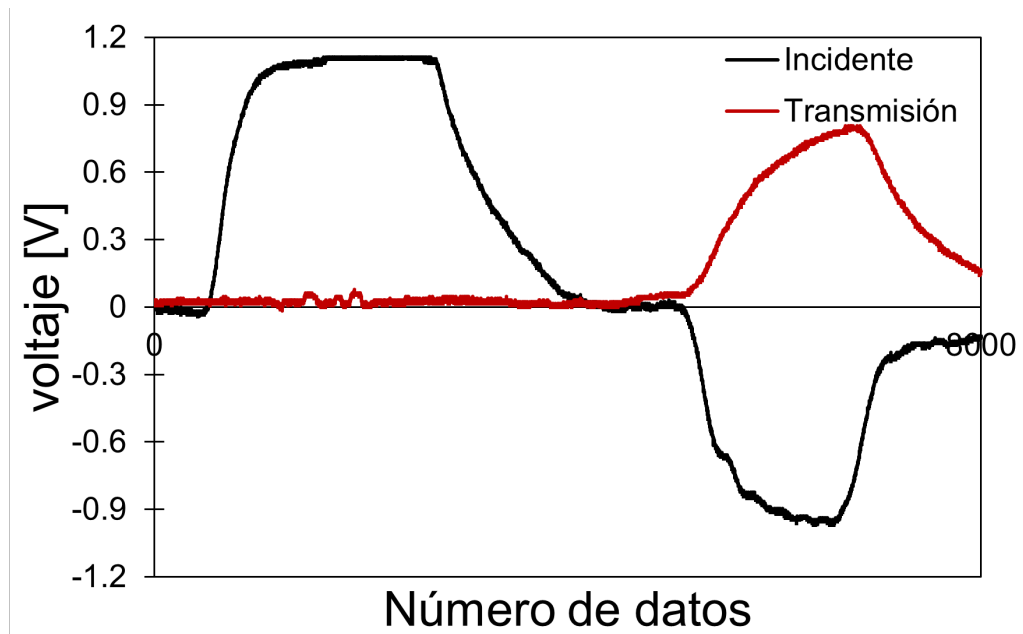


Figura C.12: Curva deformación experimental titanio Ti6Al4V a 34.1[m/s]