



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

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL Y NUMÉRICA DE SISTEMA DE TESTEO DE IMPACTO DE UNA PARTÍCULA (SPITS)

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

FELIPE ANDRÉS PEREIRA SÁNCHEZ

PROFESOR GUÍA:
RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ÁLVARO VALENCIA MUSALEM
BENJAMÍN HERRMANN PRIESNITZ

SANTIAGO DE CHILE
2023

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL Y NUMÉRICA DE SISTEMA DE TESTEO DE IMPACTO DE UNA PARTÍCULA (SPITS)

Cold Spray es una técnica de proyección térmica principalmente utilizada en la industria aeroespacial para hacer recubrimientos, en la que partículas sólidas inmersas en un gas viajan a altas velocidades e impactan contra un sustrato depositándose en él. La efectividad de la deposición depende del material de las partículas y del sustrato, la temperatura y la velocidad de impacto. Existe una velocidad crítica a partir de la cual hay éxito en la deposición. Esta velocidad crítica depende de las propiedades termodinámicas del polvo y del sustrato y de la morfología y tamaño de las partículas.

El estudio del impacto de múltiples partículas en el sustrato es complejo debido al bajo espacio temporal y espacial existente. Por esto, surge la necesidad de estudiar el fenómeno para una partícula mediante un sistema de testeo de impacto de una partícula (SPITS, por sus siglas en inglés). El sistema SPITS acelera una partícula a altas velocidades, pudiendo alcanzar la deposición en el sustrato, facilitando el estudio del mecanismo de adhesión.

El objetivo general de este trabajo es evaluar numéricamente y validar experimentalmente la velocidad de las partículas aceleradas por el sistema SPITS diseñado por Berasaín (2021). Los objetivos específicos son desarrollar una metodología para simular numéricamente la velocidad de la partícula en el sistema SPITS, evaluar la velocidad a diferentes presiones de entrada de manera numérica, evaluar experimentalmente la velocidad de la partícula en el sistema SPITS para partículas de acero inoxidable y aluminio de 3 [mm] de diámetro y comparar y analizar los resultados obtenidos de manera numérica y experimental.

Para obtener la velocidad mediante simulación se utiliza la malla dinámica en conjunto con el *solver* de seis grados de libertad en *Ansys Fluent*. Se define una geometría tipo pistón y una geometría que contempla la forma esférica. Para el procesamiento de datos se usa *Excel* y *Python*. La velocidad de las partículas se miden con un cronógrafo en la parte experimental.

En simulaciones los resultados obtenidos mediante la geometría tipo pistón difieren en un 5,6 % de los obtenidos con geometría esférica, por lo que el modelo tipo pistón es viable y confiable. Las pruebas experimentales indican velocidades entre 150 [m/s] y 245 [m/s] para acero y entre 205 [m/s] y 279 [m/s] para aluminio. El error de la velocidad obtenida mediante simulaciones oscila entre un 33 % y un 37 % para el acero y entre un 10 % y un 29 % para el aluminio, valores que se encuentran dentro del orden al comparar con la literatura.

Como hipótesis se propone que los factores que explican la diferencia existente entre simulaciones y pruebas experimentales son el tiempo de apertura de la válvula solenoide, los efectos fluidodinámicos a la salida del cañón y las pérdidas por fricción partícula/cañón.

*A Jesucristo,
mi profesor de toda la vida.*

Agradecimientos

Primero quiero agradecer a Dios. A mi Papá, quien me adoptó como su hijo. A Jesús por enseñarme lo que es una amistad incondicional. Al Espíritu Santo por guiarme en todo el proceso universitario.

Agradezco a mis padres, Ángel y Miguelina por marcar mi vida con su esfuerzo, dedicación y amor. A mi hermano Jony por su generosidad y a mi tía Anita por su cariño en todo tiempo.

Doy gracias a mi familia en Santiago. Tía Beñi y tío Alfredo por adoptarme en su casa y hacerme uno más en la familia, sus palabras de afirmación han sido fundamentales para llegar a este punto. A mi primo Esteban por cederme su pieza, a Isi por las risas. Agradezco a la tía Rosita por todas las conversaciones en el metro en primer año, a la tía Rosa y tío Choto por recibirme en su casa durante la universidad.

Agradezco a mi grupo de primer semestre, Jorge, Roberto y Camilo, gracias por ser ese espacio para hablar de todo menos de la U. Finalmente todos terminamos en mecánica. A Dani Hevia por el compañerismo en la memoria. Agradezco a toda la comunidad de mecánica en general.

A mis amigos del GBU por hacer de cada miércoles un día especial para reírse y aprender juntos. En particular gracias a Isra por su amistad, por las partidas de *pool* y *ping pong* y por nunca juntarnos a estudiar.

A mis amigos del *Missio Dei*, Vicho, Nati, Tania y Cristi, gracias por todos los cumpleaños improvisados que compartimos juntos en la pandemia.

A mis dos iglesias. Mi iglesia en Sauzal por ser una familia más para mí y apoyarme en este proceso. A mi iglesia Tiempo de Dios por llevarme a crecer. Gracias Edu y Paz por su amistad en los primeros años en Santiago. A Isa por permanecer siempre como un hermano y por ser un lugar de desahogo constante, evitando estresarme por la U o por la vida.

Agradezco a mi profesor guía, Rubén Fernández, por toda la motivación, accesibilidad y compromiso conmigo y con los demás estudiantes, un ejemplo para muchos. A mi profesor co-guía, Álvaro Valencia y al profesor Juan Carlos Elicer por su apoyo.

Finalmente quiero agradecer a Nati. Gracias por desafiarme siempre a más, por impedirme que esté en la zona de seguridad y por impulsarme a soñar en grande. Gracias por escuchar todas mis cosas ingenieriles. Gracias por la contención y amor en todo el proceso del trabajo de título.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo General	2
1.1.2. Objetivos Específicos	2
1.2. Alcances	2
2. Antecedentes	3
2.1. Generales	3
2.1.1. Proyección térmica	3
2.1.2. <i>Cold Spray</i>	4
2.1.3. Velocidad crítica	5
2.1.4. Adhesión	6
2.2. Sistema de testeo de impacto de una partícula (SPITS)	6
2.2.1. SIPITS Original	6
2.2.2. SPITS diseñado por Berasaín	7
2.2.3. Estimación de velocidad de la partícula	8
2.3. Fluidodinámica y termodinámica	9
2.3.1. Número de Reynolds	9
2.3.2. Ley de gases ideales	9
2.3.3. Ecuación de estado <i>Redlich-Kwong</i>	9
2.3.4. Efecto de la temperatura en la viscosidad	10
2.3.5. Principio de Bernoulli	10
2.3.6. Bernoulli para gas ideal isentrópico	10
2.3.7. Diferencia entre fluido compresible e incompresible	10
2.3.8. Ondas de choque	11
2.3.9. Flujo alrededor de la partícula	12
2.4. Métodos Numéricos	13
2.4.1. Ecuaciones que gobiernan el problema	13
2.4.2. Modelo de turbulencia	14
2.4.3. Tipos de solvers en Ansys Fluent	14
2.4.4. Malla dinámica	14
2.4.4.1. Smothing	15
2.4.4.2. Remeshing	15
2.4.4.3. Layering	15
2.4.5. Número de <i>Courant</i>	16
2.4.6. Seis grados de libertad (6DOF)	16

3. Metodología	17
3.1. Definición de pruebas	18
3.2. Experimental	18
3.2.1. Detalle del procedimiento experimental	19
3.3. Simulaciones	22
3.3.1. Modelo CFD inicial	23
3.3.2. Independencia de malla	25
3.3.3. Evaluación del modelo CFD	26
3.3.4. Variaciones del modelo CFD base	26
3.4. Análisis de resultados	27
4. Resultados y discusión	28
4.1. Simulaciones	28
4.1.1. Contornos de velocidad	28
4.1.2. Contornos de presión	30
4.1.3. Presencia de ondas de choque	31
4.1.4. Independencia de malla	32
4.1.5. Evaluación del modelo CFD	32
4.1.6. Velocidad de partículas de acero y aluminio	34
4.1.7. Efecto de la presión de la cámara de vacío	36
4.1.8. Efecto de la forma esférica y holgura	37
4.1.9. Efecto de viscosidad variable y ecuación de estado de <i>Redlich-Kwong</i>	40
4.1.10. Presión de estanque en la descarga	40
4.2. Experimental	42
4.3. Comparación	44
4.3.1. Posibles fuentes de error	45
5. Conclusiones	47
5.0.1. Mejoras y trabajos futuros	48
Bibliografía	49
Anexos	51
A. Metodología	51
A.1. Métricas de calidad de malla	51
B. Resultados	52

Índice de Tablas

2.1.	Velocidad crítica de partícula de aluminio para diferentes materiales del sustrato.	5
3.1.	Pruebas realizadas para la evaluación del sistema SPITS.	18
3.2.	Estadísticas del mallado.	25
4.1.	Parámetros para el análisis de independencia de malla.	32
4.2.	Velocidad final de la partícula determinada mediante simulación y su comparación con la velocidad obtenida con el modelo teórico y con las pruebas experimentales. $p_{inical} = 27,58$ [bar].	33
4.3.	Velocidad final de partícula de aluminio para el caso base ($p_{out} = -0,7$ [bar]) y el caso en que $p_{out} = -0,95$ [bar].	37
4.4.	Velocidad final de partícula usando la geometría tipo pistón y la geometría esférica, para acero y aluminio. $p_{inical} = 6,89$ [bar].	39
4.5.	Presiones finales promedio del estanque obtenidas mediante simulación y con la ley de <i>Boyle-Mariotte</i> .	41
4.6.	Temperatura medida para cada una de las presiones de prueba utilizadas.	43
4.7.	Velocidad de partícula de acero obtenida mediante pruebas experimentales y simulaciones.	44
4.8.	Velocidad de partícula de aluminio obtenida mediante pruebas experimentales y simulaciones.	45

Índice de Ilustraciones

2.1.	Clasificación de las tecnologías de proyección térmica según el rango de temperatura y velocidad de las partículas [3].	3
2.2.	Esquema del proceso de <i>Cold Spray</i> [1].	4
2.3.	Eficiencia de deposición en función de la velocidad de las partículas en <i>Cold Spray</i> [4].	5
2.4.	Esquema de SPITS. Imagen adaptada de la original [5].	6
2.5.	Sistema SPITS diseñado por Juan Carlos Berasaín ubicado en el Taller Mecánico del DIMEC.	7
2.6.	Diagrama del tramo de aceleración de largo L , área de sección transversal A , unido a un estanque presurizado de volumen V_0 [2].	8
2.7.	Comparación de la relación de presiones en función del número de <i>Mach</i> para un fluido compresible e incompresible [12].	11
2.8.	Comportamiento cualitativo del flujo a través de una onda de choque oblicua y normal [13].	12
2.9.	Esquema de la partícula esférica en el interior del cañón de aceleración.	12
2.10.	Esquema de capas en el método <i>layering</i> [16].	15
3.1.	Metodología general del trabajo de título.	17
3.2.	Metodología de las pruebas experimentales	18
3.3.	Válvula solenoide.	19
3.4.	Inserción de partícula en el cañón de aceleración.	20
3.5.	Traspaso de gas propulsor desde el tanque de N_2 al estanque acumulador.	20
3.6.	Bomba de vacío.	21
3.7.	Cronógrafo.	21
3.8.	Metodología de las simulaciones numéricas [18].	22
3.9.	Geometría (unidades en [mm]).	24
3.10.	Mallado del estanque.	24
3.11.	Mallado del cañón.	25
3.12.	Malla de la geometría con forma de la partícula esférica y holgura entre esfera y cañón.	26
3.13.	Detalle de la malla en la esfera.	27
4.1.	Contornos de velocidad de partícula de acero tipo pistón en distintos instantes de tiempo. $p_{inical}= 6,89$ [bar].	28
4.2.	Contornos de velocidad de partícula de acero esférica en distintos instantes de tiempo. $p_{inical}= 6,89$ [bar].	29
4.3.	Contornos de presión de partícula de acero tipo pistón en distintos instantes de tiempo. $p_{inical}= 6,89$ [bar].	30
4.4.	Contornos de presión de partícula de acero esférica en distintos instantes de tiempo. $p_{inical}= 6,89$ [bar].	31

4.5.	Velocidad de partícula a lo largo del cañón para caso de 3 celdas verticales y 6 celdas verticales en el mallado.	32
4.6.	Velocidad de partícula a lo largo del cañón obtenida con simulaciones y con el modelo teórico de Juan Carlos Berasaín. $p_{inical}= 27,58$ [bar].	33
4.7.	Velocidad a lo largo del cañón para partículas de acero a diferentes presiones iniciales.	34
4.8.	Velocidad a lo largo del cañón para partículas de aluminio a diferentes presiones iniciales.	35
4.9.	Velocidad a lo largo del cañón para partículas de diferente material. $p_{inical}= 27,58$ [bar].	35
4.10.	Velocidad final de partículas de acero y aluminio para diferentes presiones iniciales, obtenidas mediante simulación.	36
4.11.	Velocidad a lo largo del cañón para partícula de aluminio con diferente presión de la cámara de vacío (p_{out}).	37
4.12.	Velocidad a lo largo del cañón para partícula de acero para el caso pistón y el caso con partícula esférica. $p_{inical}= 6,89$ [bar].	38
4.13.	Velocidad a lo largo del cañón para partícula de aluminio para el caso pistón y el caso con partícula esférica. $p_{inical}= 6,89$ [bar].	38
4.14.	Velocidad a lo largo del cañón para partícula de acero para el caso base en comparación con el caso con viscosidad variable y ecuación de estado de <i>Redlich-Kwong</i>	40
4.15.	Presión promedio del estanque en función de la posición de la partícula de acero. $p_{inical}= 27,58$ [bar].	41
4.16.	Velocidad de partícula a la salida del cañón en función de la presión inicial para partículas de acero y aluminio.	42
4.17.	Velocidad final de partículas de acero a diferentes presiones iniciales, obtenida mediante simulaciones y pruebas experimentales.	44
4.18.	Velocidad final de partículas de aluminio a diferentes presiones iniciales, obtenida mediante simulaciones y pruebas experimentales.	45
A.1.	Vectores usados para calcular la métrica de calidad <i>Orthogonal Quality</i> [16].	51
B.1.	Contornos de velocidad de partícula de aluminio tipo pistón en distintos instantes de tiempo. $p_{inical}= 6,89$ [bar].	52
B.2.	Contornos de velocidad de partícula de aluminio esférica en distintos instantes de tiempo. $p_{inical}= 6,89$ [bar].	53
B.3.	Contornos de presión de partícula de aluminio tipo pistón en distintos instantes de tiempo. $p_{inical}= 6,89$ [bar].	54
B.4.	Contornos de presión de partícula de aluminio esférica en distintos instantes de tiempo. $p_{inical}= 6,89$ [bar].	55

Capítulo 1

Introducción

Dentro de las técnicas de manufactura aditiva *Cold Spray* aparece como una opción factible para realizar recubrimientos, reparar piezas dañadas y fabricar componentes individuales. Su campo de aplicación actual es el sector aeroespacial principalmente, pero pudiera extenderse a otras áreas en un futuro [1].

En *Cold Spray* partículas de polvo (típicamente entre 5 a 100 μm) son impulsadas por un flujo de gas e impactan contra un sustrato a altas velocidades (entre 200 a 1200 [m/s]), siendo depositadas en este último. La efectividad de la deposición depende de la magnitud de la velocidad con que las partículas impactan contra el sustrato, la temperatura de trabajo, el material del sustrato y de las partículas, entre otros.

Existe una velocidad crítica a partir de la cual la partícula, al impactar con el sustrato, se adhiere. Esta velocidad crítica depende de los materiales del sustrato y la partícula, además de la temperatura de trabajo.

Debido a la dificultad de estudiar el comportamiento de impacto de muchas partículas en el sustrato es que surge la necesidad de estudiar el fenómeno para una partícula mediante un *sistema de testeo de impacto de una partícula* (SPITS). Este sistema cuenta, a modo general, con un estanque de gas encargado de impulsar la partícula, un cañón de lanzamiento, un sistema de medición de velocidad y una cámara de vacío, la cual permite alcanzar velocidades mayores al disminuir la resistencia al movimiento de la partícula provocada por la presencia de aire.

Dado que la velocidad de la partícula es un factor fundamental en la eficiencia de la deposición en *Cold Spray* y que se tiene la necesidad de estudiar el mecanismo de adhesión para una partícula en un sistema SPITS es que surge la motivación de este trabajo de título, el cual tiene como objetivo evaluar numéricamente y validar experimentalmente la velocidad de las partículas aceleradas por el sistema SPITS el cual fue diseñado por Juan Carlos Berasaín [2].

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Evaluar numéricamente y validar experimentalmente la velocidad de las partículas aceleradas por el sistema SPITS diseñado por Berasaín.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar una metodología para simular numéricamente la velocidad de la partícula en el sistema SPITS.
- Evaluar la velocidad a diferentes presiones de entrada de manera numérica.
- Evaluar experimentalmente la velocidad de la partícula en el sistema SPITS para partículas de acero y de aluminio de 3 [mm] de diámetro.
- Comparar y analizar resultados obtenidos de manera numérica y experimental.

1.2. Alcances

- Se trabaja con el sistema SPITS diseñado por Juan Carlos Berasaín el año 2021 bajo las condiciones de operación definidas en su trabajo.
- Se utilizan partículas esféricas de 3 [mm] de diámetro de acero y aluminio.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Generales

2.1.1. Proyección térmica

Las tecnologías de proyección térmica son utilizadas actualmente en la industria para obtener recubrimientos con propiedades específicas con el fin de satisfacer necesidades concretas tales como la resistencia a la corrosión, la resistencia al desgaste, requisitos de dureza y/o resistencia a la oxidación, entre otras.

La característica principal de las tecnologías de proyección térmica es el aporte de energía cinética y térmica al material de recubrimiento. Este aporte se efectúa mediante material en polvo o varilla fundido total o parcialmente. El material se proyecta sobre una superficie limpia donde impacta e interacciona mecánica y/o metalúrgicamente con el sustrato.

Los tipos de tecnologías de proyección térmica se clasifican en función del origen e intensidad de las energías. En la Figura 2.1 se muestra esta clasificación.

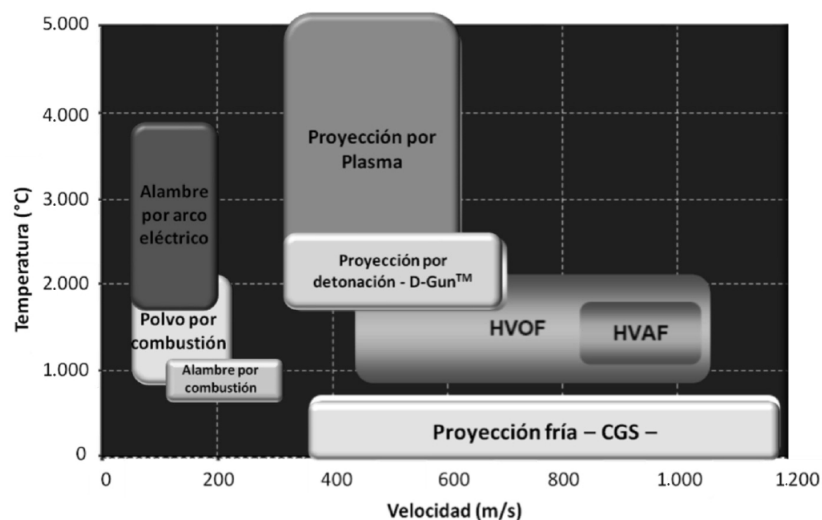


Figura 2.1: Clasificación de las tecnologías de proyección térmica según el rango de temperatura y velocidad de las partículas [3].

La proyección térmica, en comparación con otros métodos de modificación superficial, tiene una gran versatilidad en cuanto a los materiales que pueden proyectarse y los sustratos que se pueden utilizar. Prácticamente todos los materiales que funden sin descomponerse, dando una fase líquida estable, se pueden utilizar para formar recubrimientos por proyección térmica convencional.

Si bien, el material proyectado llega al sustrato fundido o parcialmente fundido, el sustrato no se expone a altas temperaturas, por lo que las características estructurales y mecánicas del sustrato no cambian.

2.1.2. *Cold Spray*

Un caso particular de las tecnologías de proyección térmica es la proyección fría o *Cold Spray*. En esta técnica el material proyectado se mantiene en estado sólido durante todo el proceso. Esto es una ventaja en comparación con las técnicas convencionales, ya que se evita la oxidación tanto de las partículas proyectadas como del sustrato, permitiendo trabajar con materiales metálicos altamente reactivos.

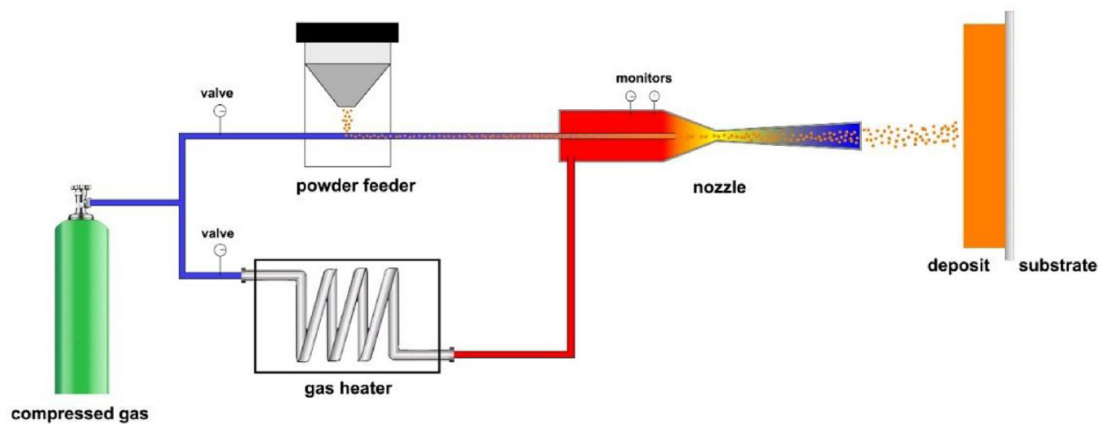


Figura 2.2: Esquema del proceso de *Cold Spray* [1].

El esquema típico de un proceso de *Cold Spray* de altas presiones se muestra en la Figura 2.2. El gas comprimido se divide en dos corrientes. Una de ellas pasa a través de un calentador de gas para aumentar su temperatura, mientras que la otra pasa a través del alimentador de polvo, donde se carga con las partículas de materia prima. Finalmente, estas dos corrientes se mezclan antes de entrar a la boquilla, donde el gas se expande para generar un flujo supersónico de gas y polvo, para luego impactar en el sustrato.

En *Cold Spray* se utilizan gases con bajo peso molecular (típicamente He o N_2). Esto debido a que en este tipo de gases la velocidad del sonido (factor limitante en este tipo de sistemas) es mayor, por lo que las partículas pueden llegar a velocidades mayores sin necesariamente alcanzar velocidades supersónicas respecto del medio el cual están inmersas.

2.1.3. Velocidad crítica

Uno de los factores principales para tener alta eficiencia en la deposición de las partículas en *Cold Spray* es la velocidad con la cual las partículas impactan contra el sustrato. Tal como se muestra en la Figura 2.3 existe una velocidad crítica v_{crit} que depende de las propiedades termodinámicas del polvo y del sustrato, de la morfología y tamaño de las partículas. Por sobre esta velocidad se logra deposición, mientras que por debajo de v_{crit} solo hay erosión de material.

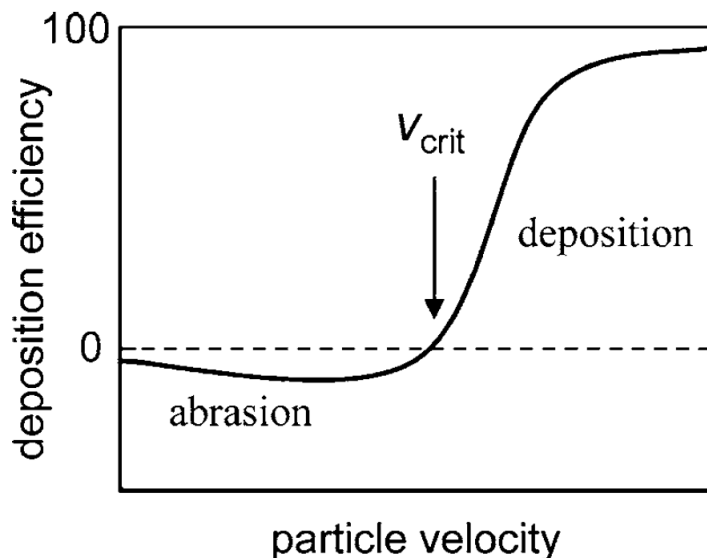


Figura 2.3: Eficiencia de deposición en función de la velocidad de las partículas en *Cold Spray* [4].

De manera experimental Kiyohiro Ito et al. [5] determinó que la velocidad crítica de las partículas varía significativamente al cambiar el material del sustrato. En la Tabla 2.1 se presenta la velocidad crítica al cambiar el material del sustrato.

Tabla 2.1: Velocidad crítica de partícula de aluminio para diferentes materiales del sustrato.

Material del sustrato	v_{crit} [m/s]
Ni	296
Cu	301
Al	353
Acero	432
Ti	500

Para obtener estas velocidades críticas se utilizó un sistema de testeo de impacto de una partícula (SPITS) en un ambiente controlado. El diámetro de las partículas propulsadas fue de 1 [mm].

2.1.4. Adhesión

Actualmente los mecanismos que explican la adhesión de las partículas en el sustrato en *Cold Spray* son la *unión metalúrgica* y el *entrelazamiento mecánico* [6].

Los metales suelen tener una capa de óxido en la superficie debido a su interacción con el medio ambiente. Para lograr unión entre dos metales se hace necesario romper esa capa de óxido y generar la unión íntima entre metales (unión metalúrgica). En *Cold Spray* la energía cinética de las partículas se traduce en altas tasas de deformación plástica lo cual permite la unión metalúrgica.

Un fenómeno que favorece la deformación plástica y la unión metalúrgica es el conocido como *Adiabatic Shear Inestability* [7], sin embargo, este no es estrictamente necesario para lograr la unión íntima entre la partícula y el sustrato [8].

El entrelazamiento mecánico consiste en la formación de aletas entre la partícula y el sustrato, las cuales ejercen una fuerza de fricción entre sí, estableciendo la unión entre la partícula y el sustrato. Estas aletas se generan producto de la deformación plástica. La deformación plástica resulta del impacto de la partícula que tiene una energía cinética asociada a su alta velocidad.

Como en *Cold Spray* son muchas las partículas que impactan contra el sustrato y el espacio temporal y espacial es pequeño fue necesario proponer un sistema que permita estudiar el mecanismo de adhesión para una sola partícula (SPITS).

2.2. Sistema de testeo de impacto de una partícula (SPITS)

2.2.1. SPITS Original

El sistema SPITS original diseñado por Kiyohiro Ito et al. [5] se presenta en la Figura 2.4.

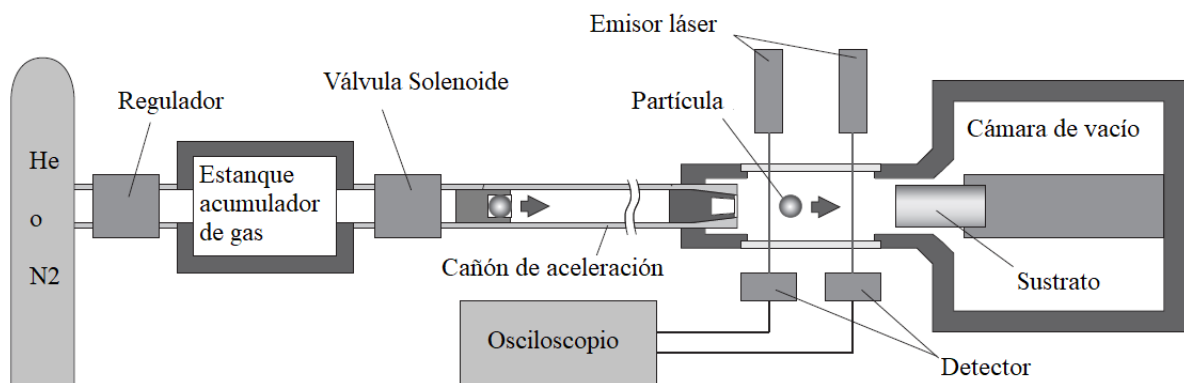


Figura 2.4: Esquema de SPITS. Imagen adaptada de la original [5].

El detalle de las partes del sistema es el siguiente:

- Tanque con He o N_2 : cumple la función de almacenar gas de propulsión que es utilizado en las pruebas.
- Regulador: permite el paso del gas desde el tanque hasta el estanque acumulador.
- Estanque acumulador de gas: almacena el gas que es liberado en una prueba.
- Válvula solenoide: permite el paso del fluido desde el estanque acumulador de gas hasta el cañón de aceleración. La idea es que esta válvula se abra de forma rápida para que la presión sea la óptima al momento en que el gas impacta con la partícula.
- Cañón de aceleración: es el tramo en el que la partícula aumenta la velocidad.
- Emisor láser, detector y osciloscopio: es el conjunto de componentes que mide la velocidad de la partícula al finalizar el tramo de aceleración. La partícula cruza los planos-láser en un tiempo determinado, de esa manera, con la distancia entre ambas fuentes emisoras de láser, se obtiene la velocidad.
- Cámara de vacío: es el componente que cierra el sistema para que sea posible extraer las partículas de aire contenidas en el sistema con una bomba de vacío. Al disminuir la presencia de partículas de aire en el cañón de aceleración la partícula experimenta menor resistencia pudiendo alcanzar mayores velocidades. Además se disminuyen efectos adversos en el material como la oxidación.
- Sustrato: es la pieza de prueba donde impacta la partícula esférica.

2.2.2. SPITS diseñado por Berasaín

Basado en el modelo de Kiyohiro Ito et al [5] Juan Carlos Berasaín [2] diseñó un sistema de testeo el cual está ubicado en el Taller Mecánico del DIMEC de la Universidad de Chile (ver Figura 2.6).

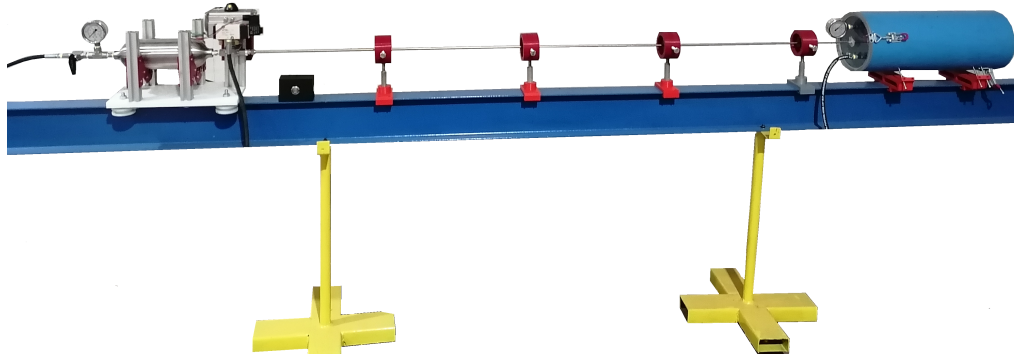


Figura 2.5: Sistema SPITS diseñado por Juan Carlos Berasaín ubicado en el Taller Mecánico del DIMEC.

Berasaín definió el largo del cañón de aceleración teniendo en cuenta que para tramos largos existe mayor disipación de energía debido a la fricción, mientras que para tramos más cortos existe mayor desperdicio de la presión del gas.



Figura 2.6: Diagrama del tramo de aceleración de largo L , área de sección transversal A , unido a un estanque presurizado de volumen V_0 [2].

2.2.3. Estimación de velocidad de la partícula

Para estimar la velocidad de la partícula a lo largo del tramo de aceleración Berasaín [2] considera un modelo isotérmico y adiabático para la expansión del gas. Se desea conocer la velocidad v de la partícula de masa m acelerada por un gas a presión con volumen inicial V_0 . Al abrir la válvula el gas se comienza a expandir, ejerciendo una fuerza sobre la partícula, provocando que esta se mueva a lo largo del tramo de aceleración de largo L . Las fuerzas ejercidas sobre la partícula son la del gas, la fuerza proveniente de la presión atmosférica y la pequeña fuerza de fricción lineal partícula-cañón.

Aplicando la segunda ley de Newton se llega a la ecuación 2.1 donde A es el área transversal de la partícula, m es la masa de la partícula, p_B y p_F son las presiones atrás (*behind*) y delante (*front*) de la partícula respectivamente, k_B y k_F son las relaciones de calores específicos del gas atrás y delante de la partícula respectivamente y a_B y a_F son la velocidad del sonido atrás y delante de la partícula [9].

$$\frac{dv}{dt} = \frac{A}{m} \left[p_B(x) \left(1 - \frac{k_B - 1}{2a_B} \cdot v \right)^{\frac{2k_B}{k_B - 1}} - p_F(x) \left(1 - \frac{k_F - 1}{2a_F} \cdot v \right)^{\frac{2k_F}{k_F - 1}} \right] \quad (2.1)$$

La ley de *Boyle-Mariotte* [10] relaciona la presión y volumen de una cantidad de gas a temperatura constante, de la cual se desprenden las ecuaciones de 2.2.

$$p_B(x) = \frac{p_{0B} V_{0B}}{V_B(x)} \quad p_F(x) = \frac{p_{0F} V_{0F}}{V_F(x)} \quad (2.2)$$

Donde p_{0B} y p_{0F} son las presiones iniciales atrás y delante de la partícula respectivamente, V_{0B} y V_{0F} son los volúmenes iniciales atrás y delante de la partícula y $V_B(x)$ y $V_F(x)$ están dados por las ecuaciones de 2.3.

$$V_B(x) = V_{0B} + Ax \quad V_F(x) = V_{0F} - Ax \quad (2.3)$$

2.3. Fluidodinámica y termodinámica

2.3.1. Número de Reynolds

Para caracterizar el tipo de flujo presente en un problema se utiliza el número de *Reynolds* como se describe en la ecuación 2.4, el cual relaciona las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas del fluido.

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot D}{\mu} \quad (2.4)$$

Donde ρ es la densidad, u es la velocidad, D es una dimensión característica y μ es la viscosidad dinámica del fluido. Para el caso particular del gas expandiéndose en el cañón de aceleración se obtuvo Re de hasta $1,3 \cdot 10^7$, es decir, flujo turbulento.

2.3.2. Ley de gases ideales

La ecuación de estado de los gases ideales caracteriza el cambio de la densidad de una gas en función de la presión y temperatura como se muestra en la ecuación 2.5. Esta ecuación de estado se acerca bastante al comportamiento real de los gases cuando estos no se acercan a la licuefacción.

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T} \quad (2.5)$$

Donde ρ es la densidad, p es la presión absoluta, R es la constante asociada al gas y T es la temperatura absoluta.

2.3.3. Ecuación de estado *Redlich-Kwong*

Una ecuación de estado de los gases más compleja que la ley de gases ideales es la ecuación de *Redlich-Kwong* [11], la cual tiene tres grados de libertad y dos constantes extras como se muestra en la ecuación 2.6.

$$p = \frac{RT}{V - b} + \frac{a}{T^{1/2}V(V + b)} \quad (2.6)$$

Donde V es el volumen y las constantes a y b están asociadas a las propiedades críticas de la sustancia en cuestión, tal como se muestra en las ecuaciones 2.7 y 2.8.

$$a = \frac{a, 4278R^2T_c^2, 5}{p_c} \quad (2.7)$$

$$b = \frac{0, 0867RT_c}{p_c} \quad (2.8)$$

2.3.4. Efecto de la temperatura en la viscosidad

En gases las moléculas están espaciadas y las fuerzas moleculares se pueden despreciar. En un flujo las moléculas se mueven de manera aleatoria y existe un intercambio de momento efectivo que resiste el movimiento relativo entre las capas del gas. A medida que la temperatura aumenta, la actividad molecular aleatoria aumenta, produciendo un incremento en la viscosidad [12].

El efecto de la temperatura en la viscosidad se puede aproximar usando la relación empírica de *Sutherland*, como se muestra en la ecuación

$$\mu = \frac{CT^{\frac{3}{2}}}{T+S} \quad (2.9)$$

Donde C y S son constantes asociadas al gas de trabajo. Para el N_2 $S= 106,7 [K]$, mientras que $C= 1,458 \cdot 10^6 [kg/msK^{1/2}]$.

2.3.5. Principio de Bernoulli

La presión y velocidad de un flujo se relacionan entre sí en una línea de corriente a través de la ecuación de *Bernoulli* la cual se muestra en la ecuación 2.10.

$$p + \frac{\rho}{2} \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot z = constante \quad (2.10)$$

Donde p es la presión estática, ρ es la densidad, v es la velocidad, g es la aceleración de gravedad y z es la altura.

2.3.6. Bernoulli para gas ideal isentrópico

Al considerar un gas ideal que se expande isentrópicamente entre un *punto 1* y un *punto 2* se obtiene la relación mostrada en la ecuación 2.11, donde k es la relación de calores específicos del gas.

$$\left(\frac{k}{k-1}\right) \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} + g \cdot z_1 = \left(\frac{k}{k-1}\right) \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} + g \cdot z_2 \quad (2.11)$$

2.3.7. Diferencia entre fluido compresible e incompresible

Para ilustrar la diferencia entre un fluido compresible e incompresible se define el *punto 2* como un punto de estancamiento, es decir, un punto donde la velocidad del fluido es nula. De esta forma se obtiene la ecuación 2.12, la cual se desprende de la ecuación 2.11.

$$\frac{p_2 - p_1}{p_1} = \left[\left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot M_1^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} - 1 \right] \quad (compresible) \quad (2.12)$$

Donde M_1 es el *número de Mach* del fluido en el *punto 1* definido por $M_1 = \frac{v_1}{a_1}$, siendo a_1 la velocidad del sonido en 1, la cual está dada por $a_1 = \sqrt{k \cdot R \cdot T_1}$, con T_1 la temperatura absoluta en el *punto 1*.

La relación análoga a la ecuación 2.12 para un fluido incompresible se muestra en la ecuación 2.13.

$$\frac{p_2 - p_1}{p_1} = \frac{k \cdot M_1^2}{2} \quad (\text{incompresible}) \quad (2.13)$$

Haciendo la comparación gráfica entre las ecuaciones 2.12 y 2.13 se obtiene como resultado la Figura 2.7, donde se observa que cuando M_1 es cercano a 1 la diferencia de presiones de un flujo compresible se aleja del modelo incompresible.

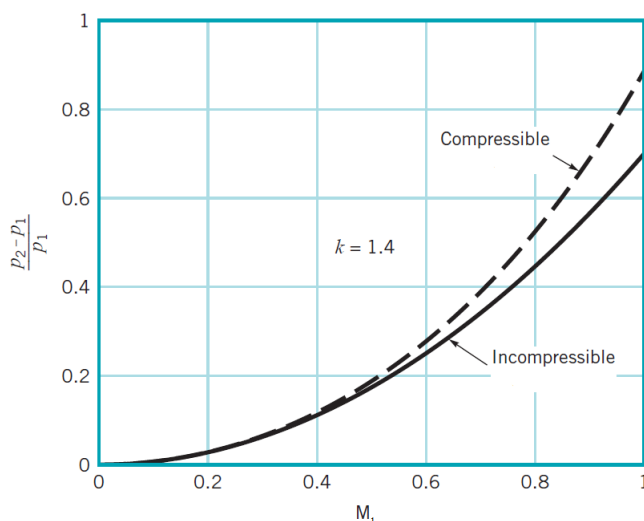


Figura 2.7: Comparación de la relación de presiones en función del número de *Mach* para un fluido compresible e incompresible [12].

2.3.8. Ondas de choque

En un régimen supersónico ($M > 1$) aparecen ondas de choque en el flujo. Una onda de choque es una región extremadamente delgada a través de la cual las propiedades del flujo pueden cambiar de forma drástica. Existen ondas de choque oblicuas al flujo (Figura 2.8.a) y otras que son normales al flujo (Figura 2.8.b).

La Figura 2.8 muestra como cambian las propiedades del fluido antes y después de la onda de choque. Las propiedades presentadas son el número de *Mach* M , la velocidad V , la presión p , la densidad ρ , la temperatura T , la entropía s , la presión total p_0 y la entalpía total h_0 . La presión, densidad, temperatura y entropía crecen al cruzar la onda de choque, mientras que la presión total, el número de *Mach* y la velocidad disminuyen.

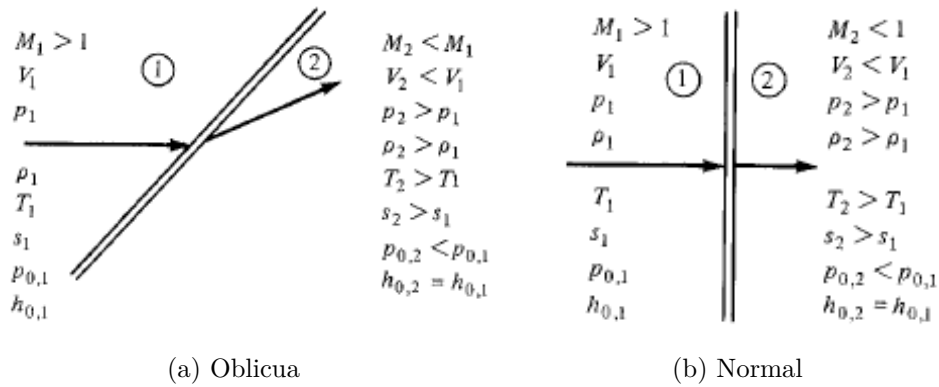


Figura 2.8: Comportamiento cualitativo del flujo a través de una onda de choque oblicua y normal [13].

2.3.9. Flujo alrededor de la partícula

En una partícula esférica dentro de un cañón de aceleración se presenta una zona convergente y una zona divergente, la cual puede actuar como una tobera (ver Figura 2.9).

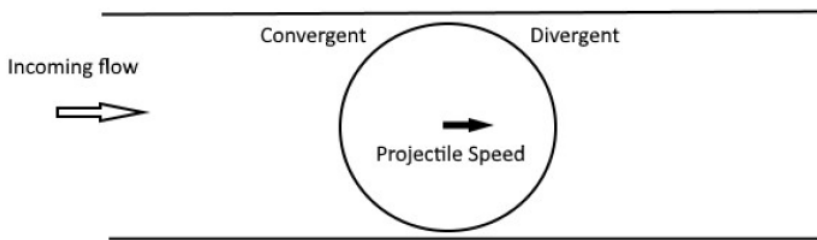


Figura 2.9: Esquema de la partícula esférica en el interior del cañón de aceleración.

Al analizar la ecuación 2.21 que relaciona la velocidad v , el área A y el número de Mach M en un flujo isentrópico de gas ideal se deduce que en flujo subsónico ($M < 1$), cuando la zona es convergente, al disminuir el área A la velocidad v aumenta, mientras que en la zona divergente aumenta A y disminuye v . Por el contrario, cuando el flujo de entrada es supersónico ($M > 1$) en la zona convergente disminuye A y v a la vez, mientras que en la zona divergente aumentan A y v .

$$\frac{dA}{dv} = -\frac{A}{v} \cdot (1 - M^2) \quad (2.14)$$

2.4. Métodos Numéricos

2.4.1. Ecuaciones que gobiernan el problema

Las ecuaciones de *Navier-Stokes* para un modelo aerodinámico axis-simétrico y en dos dimensiones se presentan en 2.15 y fueron obtenidas de [14].

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E_i}{\partial x} + \frac{\partial F_i}{\partial y} = \frac{\partial E_v}{\partial x} + \frac{\partial F_v}{\partial y} + S \quad (2.15)$$

Donde Q es la variable de estado a resolver, E_i y F_i son los flujos no viscosos, E_v y F_v son los flujos viscosos y S es el término fuente. Estas variables se definen a continuación:

$$Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv - \tau_{yx} \\ \rho v^2 + 2\mu \left(\frac{v}{y} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ (e + p)v - (u\tau_{yx} + v\tau_{yy} + q_y) \end{bmatrix} \quad E_i = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (e + p)u \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$F_i = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (e + p)v \end{bmatrix} \quad E_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ u\tau_{xx} + v\tau_{xy} - q_x \end{bmatrix} \quad F_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{yx} \\ \tau_{yy} \\ u\tau_{yx} + v\tau_{yy} - q_y \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$\tau_{xx} = \frac{2\mu}{3} \left(\frac{2\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (2.18)$$

$$\tau_{yy} = \frac{2\mu}{3} \left(\frac{2\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (2.19)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2.20)$$

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2.21)$$

Donde las variables que componen la variable de estado Q son la densidad ρ , las velocidades u y v y la energía por unidad de volumen e . Además μ es la viscosidad dinámica, k es la conductividad térmica del fluido y p es la presión estática.

2.4.2. Modelo de turbulencia

El modelo *Spalart-Allmaras* es un modelo que considera los efectos de la turbulencia que incluye una sola ecuación extra y es altamente apropiado para flujo de gas con un borde pared. Por otro lado, al incluir solo una ecuación extra hace que no sea demasiado costoso computacionalmente en comparación con otros modelos de turbulencia que incluyen más de dos ecuaciones extra [14].

La ecuación de transporte de la energía turbulenta del modelo *Spalart-Allmaras* se muestra en la ecuación 2.22.

$$\frac{\partial(\rho\bar{\nu})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{\nu}u_i)}{\partial x_i} = G_\nu + \frac{1}{\sigma_{\bar{\nu}}} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho\bar{\nu}) \frac{\partial \bar{\nu}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2}\rho \right] - Y_\nu \quad (2.22)$$

Donde $\bar{\nu}$ es la variable transportada en el modelo, G_ν es la producción de viscosidad turbulenta y Y_ν es la destrucción de la viscosidad turbulenta que ocurre en la zona cerca de la pared, $\sigma_{\bar{\nu}}$ y C_{b2} son constantes.

2.4.3. Tipos de solvers en Ansys Fluent

Ansys Fluent cuenta con dos tipos de *solvers* disponibles: basado en presión y basado en densidad [15].

El *solver* basado en presión es usado para flujos incompresibles a bajas velocidades. Incluso puede ser usado para flujos compresibles a bajas velocidades, debido a que la diferencia de presiones es similar en ambos casos (ver sección 2.3.7). El campo de velocidades se obtiene de las ecuaciones de *momentum*, mientras que el campo de presiones se obtienen manipulando la ecuación de continuidad y las ecuaciones de *momentum*.

El *solver* basado en densidad se utiliza para flujos compresibles a altas velocidades. El campo de velocidades en este modelo se obtiene de las ecuaciones de *momentum*. La ecuación de continuidad se utiliza para encontrar el campo de densidad, mientras que el campo de presiones se obtienen mediante la ecuación de estado de los gases.

2.4.4. Malla dinámica

La malla dinámica en *Ansys Fluent* permite mover los bordes de una zona de celdas con respecto a otros bordes o a otras zonas de celdas y ajustar la malla de manera apropiada. Los bordes pueden moverse de manera rígida con respecto a los otros (cuando hay movimientos lineales o rotacionales) y también pueden deformarse [16].

Es recomendable utilizar malla dinámica cuando la malla se deforma o cuando el movimiento de la malla es una función de la solución del software (por ejemplo, cuando se usa el *solver* de los *seis grados de libertad* que se describe en la sección 2.4.6).

Hay tres métodos de movimiento de malla disponibles en *Ansys Fluent* para actualizar el volumen de la malla en las regiones de deformación. Estos métodos de actualización son *Smoothing*, *Layering* y *Remeshing*, los cuales se describen a continuación:

2.4.4.1. Smoothing

Cuando se usa este método para ajustar la malla de una zona de celdas con un borde en movimiento y/o en deformación, los nodos interiores de la malla se mueven, pero el número de nodos y su conectividad no cambia. De esta manera, los nodos interiores de la malla *absorben* el movimiento del borde.

2.4.4.2. Remeshing

En las zonas con una malla de triángulos o de tetraedros normalmente se usa el método *smoothing*. Cuando el desplazamiento del borde es grande comparado con el tamaño de las celdas, la calidad de las celdas puede disminuir o las celdas pueden degenerarse, lo cual invalida la malla (presentando volúmenes negativos por ejemplo) y, consecuentemente, esto induce problemas en la convergencia de la solución en el siguiente paso de tiempo.

Para resolver esta problemática *Ansys Fluent* cuenta con el método de *remeshing*. Este método aglomera las celdas que infringen algún criterio de calidad de malla (como el *skewness*) y hace un remallado local de las celdas aglomeradas. Si las nuevas celdas satisfacen el criterio de calidad de malla, se produce una actualización de la malla con las nuevas celdas.

2.4.4.3. Layering

Cuando la malla utiliza hexaedros o cuadriláteros se puede usar el método *dynamic layering* para agregar y/o remover celdas adyacentes a un borde en movimiento, basándose en la altura de la capa próxima al borde.

Ansys Fluent permite especificar la altura ideal de la capa h_{ideal} . La capa de celdas adyacente al borde en movimiento (*layer j* en la Figura 2.10) es dividida o fusionada con la capa de celdas próxima (*layer i* en la Figura 2.10), basado en la altura h de la capa j .

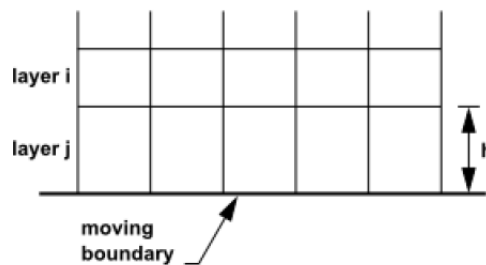


Figura 2.10: Esquema de capas en el método *layering* [16].

Si las celdas en la capa j se expanden, la altura de las celdas pueden crecer hasta que se cumpla la condición de la ecuación 2.23.

$$h_{min} > (1 + \alpha_s)h_{ideal} \quad (2.23)$$

Donde h_{min} es la altura mínima de la capa j , h_{ideal} es la altura ideal de la celda y α_s es el factor de división de capa.

Si las celdas en la capa j están siendo comprimidas, pueden llegar a una altura mínima de acuerdo a la ecuación 2.24.

$$h_{min} < \alpha_c h_{ideal} \quad (2.24)$$

Donde α_c es el factor de colapso de la capa. Cuando esta condición se alcanza, la capa de celdas en compresión es unida con la capa de celdas que está por encima de la capa en compresión, es decir, la capa j se une a la capa i .

2.4.5. Número de *Courant*

La condición de *Courant-Friedrichs-Lewy* o CFL expresa que la distancia que viaja cualquier información durante el paso de tiempo dentro de la malla debe ser menor que la distancia entre los elementos de la malla [17]. Es decir, la información de una celda o elemento de malla dado debe propagarse solo a sus vecinos inmediatos sin que existan saltos. De esta manera se define el número de *Courant* como lo expresa la ecuación 2.25.

$$C = v \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (2.25)$$

Donde C es el número de *Courant*, v es la magnitud de la velocidad, Δt es el paso de tiempo y Δx es el la distancia entre elementos de la malla.

El número de *Courant* debe ser, por lo general, un valor no mayor que 1. Para ajustar el número de *Courant* es necesario ajustar el paso de tiempo Δt .

2.4.6. Seis grados de libertad (6DOF)

El *solver* de *seis grados de libertad* (6DOF, por sus siglas en inglés) calcula las fuerzas y momentos externos tal como las fuerzas y momentos aerodinámicas y gravitatorias sobre un objeto. Estas fuerzas son calculadas mediante la integración numérica de la presión y los esfuerzos de corte sobre la superficie de un objeto. El *solver* 6DOF en *Fluent* usa las fuerzas y momentos ejercidas sobre un objeto para calcular el movimiento de rotación y traslación en torno a un centro de gravedad.

Capítulo 3

Metodología

La metodología general utilizada en el presente trabajo de título se esquematiza en la Figura 3.1.

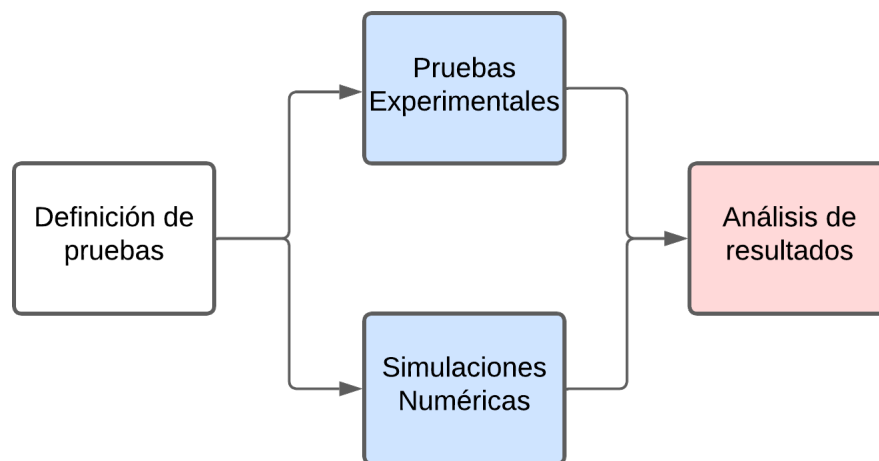


Figura 3.1: Metodología general del trabajo de título.

La primera etapa consistió en definir las pruebas a realizar. Se determinó la cantidad de pruebas, las presiones iniciales en el estanque, el gas a utilizar, entre otras variables a considerar.

En la etapa de las pruebas experimentales se utilizó el sistema de testeo SPITS para efectuar los experimentos de acuerdo a lo definido en la primera etapa.

En la etapa de simulaciones numéricas se definieron los modelos utilizar, el tipo de malla, las condiciones de borde e iniciales, entre otras, buscando replicar la situación física que ocurre en el sistema SPITS. En esta etapa se utilizó el software de CFD *Ansys Fluent* 2018 R2.

En la última etapa se realizó el análisis de los resultados comparando las velocidades obtenidas de manera numérica y de manera experimental. Para el procesamiento de los datos se utilizó *Python* y *Excel*.

3.1. Definición de pruebas

Basado en el trabajo de Berasaín y bajo las condiciones de operación definidas allí se determinaron las pruebas a realizar en el presente trabajo de título. El gas propulsor seleccionado fue N_2 por las razones expuestas en la sección 2.1.2, además, el nitrógeno en estado gaseoso tiene mayor accesibilidad y un menor precio comparado con el helio.

Tabla 3.1: Pruebas realizadas para la evaluación del sistema SPITS.

Prueba	Material partícula	Masa [g]	p_{in} [bar]	p_{out} [bar]
1	acero	0,11	6,89	-0,7
2	acero	0,11	13,79	-0,7
3	acero	0,11	20,68	-0,7
4	acero	0,11	27,58	-0,7
5	acero	0,11	34,47	-0,7
6	aluminio	0,038	6,89	-0,7
7	aluminio	0,038	13,79	-0,7
8	aluminio	0,038	20,68	-0,7
9	aluminio	0,038	27,58	-0,7
10	aluminio	0,038	34,47	-0,7

Una vez definidas la cantidad y condiciones operacionales de las pruebas se avanzó a las etapas de las pruebas experimentales y de las simulaciones.

3.2. Experimental

El procedimiento general que fue usado para realizar las pruebas experimentales se ilustra en la Figura 3.2. Primero se ajustó la presión del estanque acumulador de nitrógeno y la presión en la cámara de vacío. Luego se midió la temperatura del estanque. Después se accionó la válvula solenoide, efectuando el disparo de la partícula. Finalmente se registró la velocidad medida por el cronógrafo.

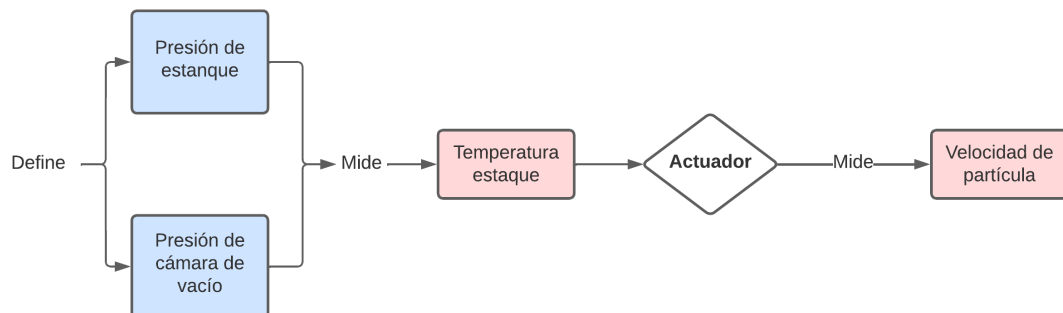


Figura 3.2: Metodología de las pruebas experimentales

3.2.1. Detalle del procedimiento experimental

En esta sección se detalla el paso a paso a que se siguió para efectuar las pruebas experimentales usando el sistema SPITS ubicado en el Taller Mecánico.

Primero se enchufa el compresor a la red eléctrica y se activa hasta alcanzar la presión de 6,89 [bar]. Mediante la manguera para aire comprimido se conecta el compresor a la válvula solenoide. Se enchufa el actuador de la válvula solenoide a la red eléctrica de tal forma que la válvula quede cerrada al paso de gas desde el estanque acumulador de gas, tal como se observa en la Figura 3.3. Es importante que la válvula esté cerrada para evitar que cualquier gas remanente en el estanque se libere en un instante no deseado.

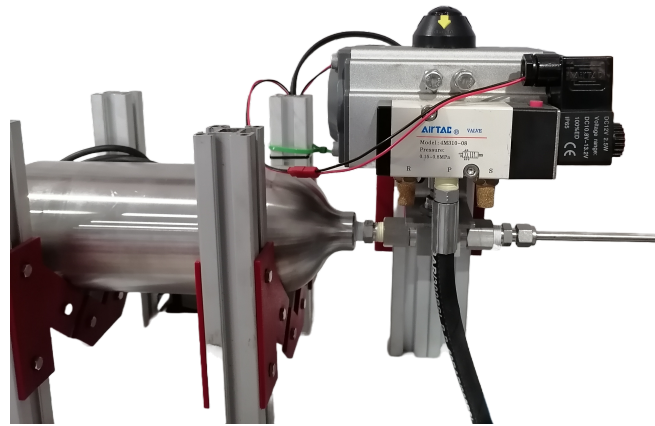


Figura 3.3: Válvula solenoide.

En el siguiente paso se introduce la partícula de 3 [mm] de diámetro del material correspondiente (acero o aluminio) en el cañón de aceleración como se observa en la Figura 3.4.a. Después se junta el cañón de aceleración a la salida del estanque acumulador de gas como se muestra en la Figura 3.4.b. Luego se gira la tuerca de seguridad hasta que la zona quede completamente unida.

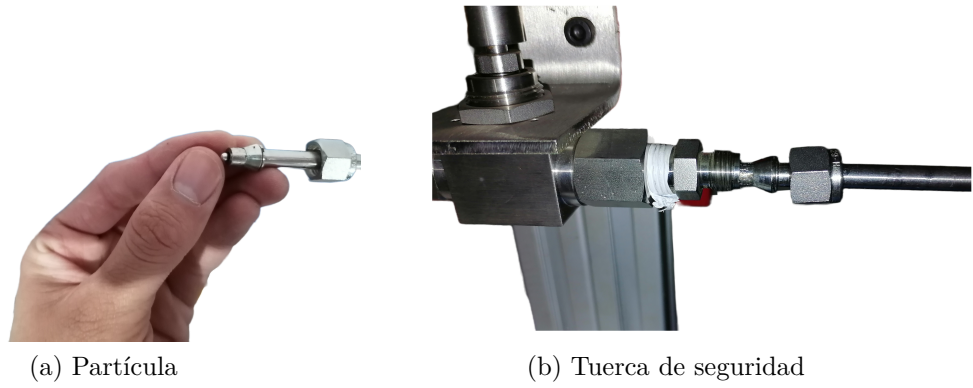


Figura 3.4: Inserción de partícula en el cañón de aceleración.

A continuación se traspa el gas propulsor desde el tanque de N_2 (Figura 3.5.a) hasta el estanque acumulador de gas (Figura 3.5.b) por medio de la manguera de alta presión. Usando el regulador del tanque de N_2 se ajusta la presión aproximada necesaria para la prueba, mientras que con la válvula de regulación del estanque acumulador se ajusta la presión exacta asociada a la prueba.

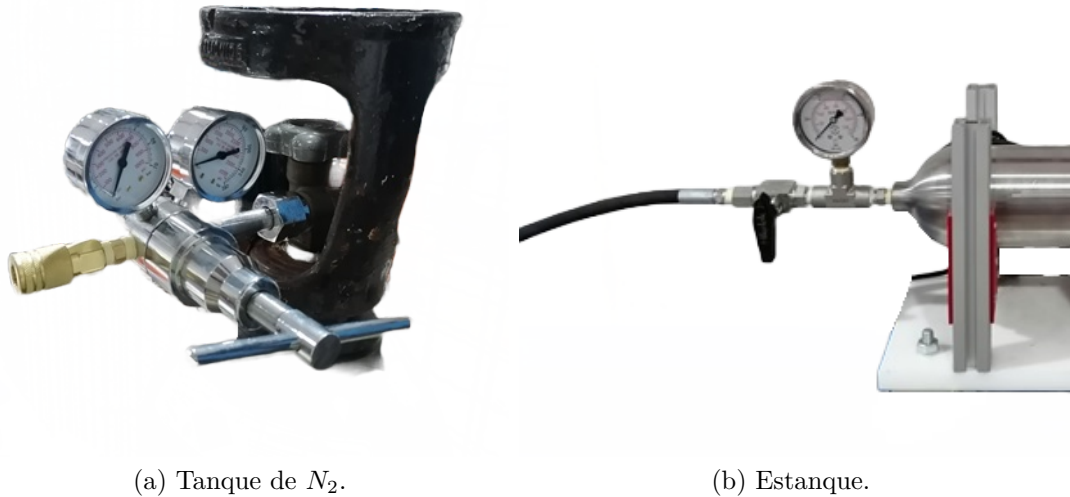


Figura 3.5: Traspaso de gas propulsor desde el tanque de N_2 al estanque acumulador.

El siguiente paso consiste en activar la bomba de vacío para succionar el aire presente en el cañón de aceleración y en la cámara de vacío, para lograr una velocidad más alta (ver ecuación 2.1), tal como se observa en la Figura 3.6. Se mantiene la bomba activada hasta obtener la presión requerida, la cual se verifica en el vacuómetro.



Figura 3.6: Bomba de vacío.

Una vez que se tienen las condiciones de operación definidas mencionadas en los pasos anteriores se presiona el botón del actuador de la válvula solenoide, efectuándose el disparo de la partícula esférica. Finalmente se registra la velocidad de la partícula medida por el cronógrafo *Acetech AC5000*, ubicado en el interior de la cámara de vacío (ver Figura 3.7).



Figura 3.7: Cronógrafo.

Cada una de las pruebas definidas en la sección 3.1 se realizan 3 veces. Esto debido a que existen errores asociados al ajuste de las presiones iniciales del estanque acumulador y de la cámara de vacío, además del error asociado a la medición del cronógrafo. De esta forma se obtiene un promedio y una desviación estándar para cada prueba experimental.

3.3. Simulaciones

El procedimiento realizado para obtener un modelo de fluidodinámica computacional (CFD) se esquematiza en la Figura 3.8.

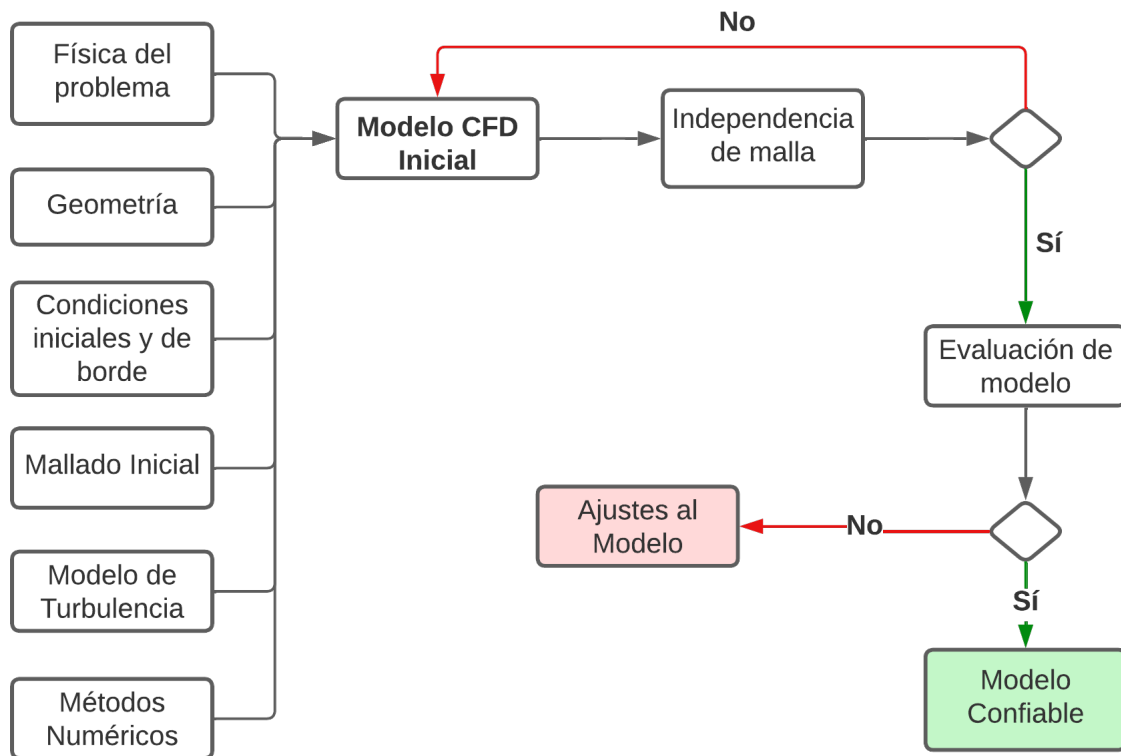


Figura 3.8: Metodología de las simulaciones numéricas [18].

Como base se define un modelo CFD inicial, el cual contempla la física del problema (por ejemplo, si se tiene una configuración 2D o 3D, estado transiente o estacionario, entre otros), la geometría con sus dimensiones, el mallado de la geometría, las condiciones iniciales y condiciones de borde del problema, el modelo de turbulencia asociado al fenómeno en estudio y los métodos numéricos a usar por el software para resolver las ecuaciones que gobiernan el problema.

Luego de definir el modelo CFD inicial se necesita hacer el análisis de independencia de malla. Este análisis tiene el objetivo de encontrar el tamaño adecuado de los elementos de la malla de tal manera que la malla sea lo suficientemente fina como para que los resultados no se vean alterados por algún error numérico asociado a una malla muy gruesa. También es necesario considerar que mientras más fina es la malla el recurso computacional es mayor. Así, se determina la solución óptima para entregar resultados confiables, usando el menor recurso computacional posible.

Como se observa en la Figura 3.8 si no se logra que los resultados sean independientes de la malla usada se deben hacer cambios en el modelo inicial, particularmente en el tamaño de los elementos de la malla. Si se alcanza independencia de malla se sigue con el paso de evaluación del modelo.

En la etapa de evaluación del modelo normalmente existen tres formas típicas de comprobar que el modelo CFD propuesto sea confiable. La primera es replicar un trabajo de la literatura realizado previamente, la segunda consiste en resolver de manera teórica el problema (cuando sea posible) y la tercera es hacer pruebas experimentales del estudio en cuestión, para luego compararlas con los resultados obtenidos en las simulaciones computacionales.

Una vez que se evalúa el modelo con alguna de las formas mencionadas, se tiene con un modelo CFD confiable. Si no se supera esta etapa, es necesario hacer modificaciones al modelo inicial.

3.3.1. Modelo CFD inicial

En esta sección se describen en detalle cada uno de los pasos de la Figura 3.8. Como referencia para seleccionar los diferentes modelos y parámetros se utilizan los trabajos realizados por Escalante [19] y Xavier [15].

Debido a la geometría del problema y a que las fuerzas predominantes que inciden en el movimiento de la partícula son las producidas por el fluido, se elige un modelo en 2D y axisimétrico (para ahorrar recurso computacional). Se selecciona el régimen transiente, porque la partícula se va moviendo en el interior del cañón de aceleración producto de la expansión del gas desde el estanque acumulador. Se modela el fluido como gas ideal con viscosidad constante. Las ecuaciones que gobiernan el problema se presentaron en la sección 2.4.1.

La geometría utilizada se muestra en la Figura 3.9. En el modelo base la partícula tiene una forma rectangular de 1,52x3 [mm] (la mitad del tamaño original, debido a la simetría), es decir, no se consideró la forma esférica de la partícula ni la holgura existente entre el diámetro exterior de la esfera y el diámetro interior del cañón de aceleración. A pesar de que el largo del cañón de aceleración del sistema SPITS es de 2 [m], en el modelo se le agregan 0,3 [m] extra para disminuir la influencia de la condición de borde en la salida (p_{out}) a medida que la partícula se aproxima a la zona de la salida del cañón.

Las condiciones iniciales utilizadas se detallaron en la Tabla 3.1. En la columna p_{in} se muestran las presiones iniciales que fueron asignadas al estanque en cada prueba, partiendo de los 6,89 [bar] hasta los 34,47 [bar]. La columna p_{out} muestra la presión inicial asignada al fluido presente en la zona del cañón de aceleración. Además se definen las temperaturas iniciales en el estanque y en el cañón de aceleración, las cuales fueron medidas experimentalmente.

La pared de cañón de aceleración se define como adiabática y lisa. Esto último debido a que, por limitaciones experimentales no fue factible estimar la rugosidad interior del cañón de aceleración.

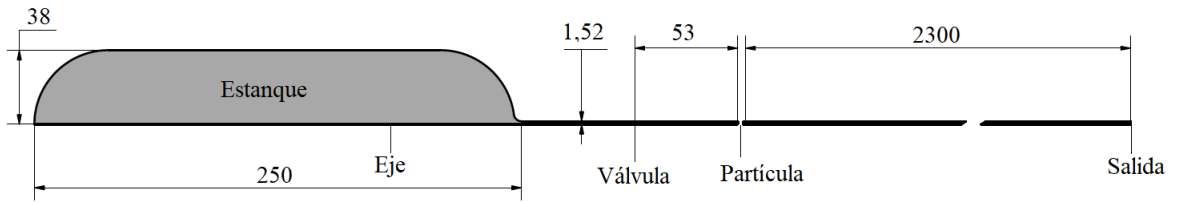


Figura 3.9: Geometría (unidades en [mm]).

La geometría del problema solo cuenta con una salida, donde se le asigna las mismas condiciones de presión y temperaturas que las condiciones iniciales del cañón, pero manteniéndolas constantes durante toda la simulación. El eje se asigna como una condición de *axis* en *Ansys Fluent*.

El mallado de la geometría se muestra en las Figuras 3.10 y 3.11. En el estanque se usa el método de *triángulos*, mientras que en el cañón se utilizó el método de *cuadriláteros*.

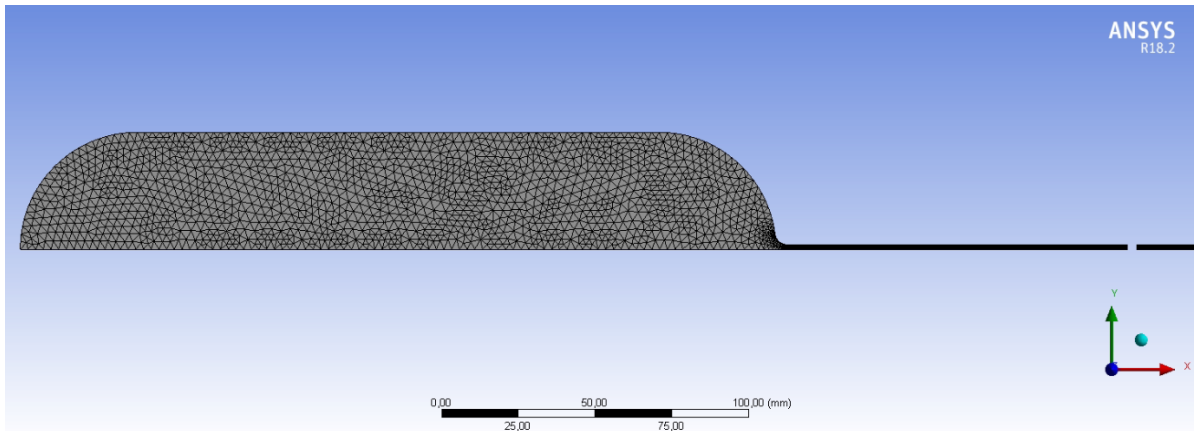


Figura 3.10: Mallado del estanque.

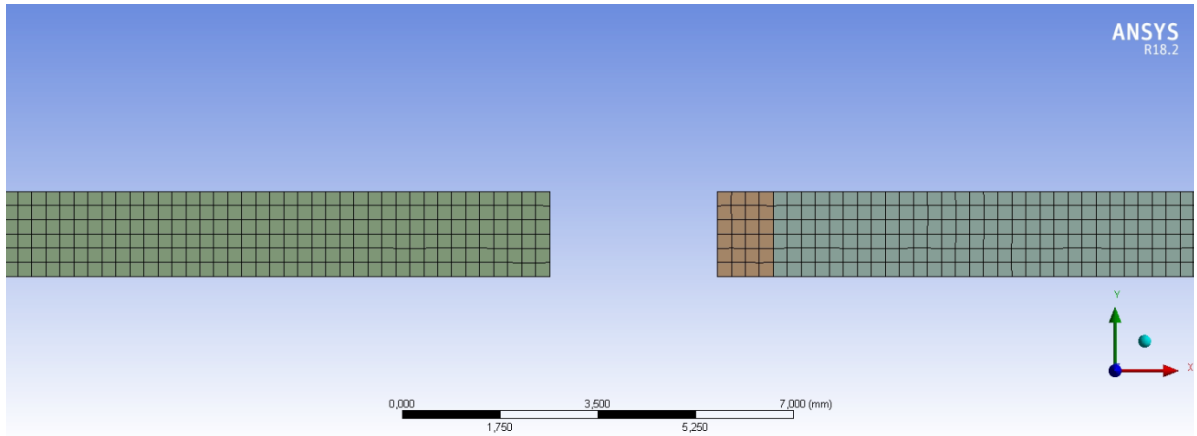


Figura 3.11: Mallado del cañón.

En la Tabla 3.2 se presentan las estadísticas de la malla generada en *Ansys Fluent*. Los criterios de calidad usados es *Skewness* y *Orthogonal Quality* los cuales están dentro de los valores recomendados por el manual de *Ansys Fluent*.

Tabla 3.2: Estadísticas del mallado.

Tamaño de elemento [mm]	Elementos	Nodos	<i>Skewness</i>			<i>Orthogonal Quality</i>		
			mín	promedio	máx	mín	promedio	máx
0,25 (cañón)	68879	60699	0,000	0,005	0,396	0,709	0,998	1
2,5 (estanque)								

Debido a lo argumentado en la sección 2.4.2 se elige *Spalart-Allmaras* como modelo de turbulencia.

El modelo usado para resolver las ecuaciones diferenciales es el basado en densidad, ya que se trabaja con fluido compresible a altas velocidades, producto de la presión inicial del estanque. Además se activa la ecuación de energía térmica.

Se utiliza malla dinámica con *layering* como método de actualización de malla. El factor de división de capa α_s se ajusta en 0,4 y el factor de colapso de capa en 0,2 (ver sección 2.4.4.3). Para considerar los efectos del fluido sobre la partícula y los efectos de la partícula sobre el fluido se utiliza el *solver* de *seis grados de libertad* (6DOF) con movimiento en una dirección, la dirección paralela al eje. Esta configuración (malla dinámica y 6DOF) permite simular el movimiento de la partícula a lo largo del cañón de aceleración.

3.3.2. Independencia de malla

Para el análisis de independencia de malla se ajusta el tamaño de elemento de acuerdo con la cantidad de celdas verticales presentes en el cañón de aceleración (por ejemplo, en la Figura 3.11 el cañón tiene 6 celdas verticales). La variable de interés utilizada para determinar si los resultados de la simulación son independientes de la malla es la velocidad final de la partícula, es decir, la velocidad que la partícula alcanza cuando $x = 2$ [m].

3.3.3. Evaluación del modelo CFD

Para determinar si el modelo CFD propuesto era confiable se utilizan dos métodos. El primero consiste en resolver de manera numérica el modelo matemático utilizado por Berasaín (ver ecuación 2.1) y aplicarlo a los parámetros del presente trabajo de título. En el segundo método se compara la velocidad de la partícula obtenida en el sistema SPITS de manera experimental y la velocidad obtenida de manera numérica.

3.3.4. Variaciones del modelo CFD base

Algunas variaciones hechas al modelo CFD base descrito en la sección 3.3.1 son las siguientes:

- Cambiar la presión de la cámara de vacío, que se traduce en la presión inicial del cañón y la presión de salida p_{out} .
- Usar modelo de viscosidad variable con la relación empírica de *Sutherland* (ecuación 2.9). Considerar la ecuación de estado *Redlich-Kwong* (ecuación 2.6), en vez de la ecuación de estado de gases ideales.
- Considerar la forma esférica de la partícula y la holgura existente entre el diámetro de la partícula y el diámetro interior del cañón de aceleración tal como se muestra en la Figura 3.12.

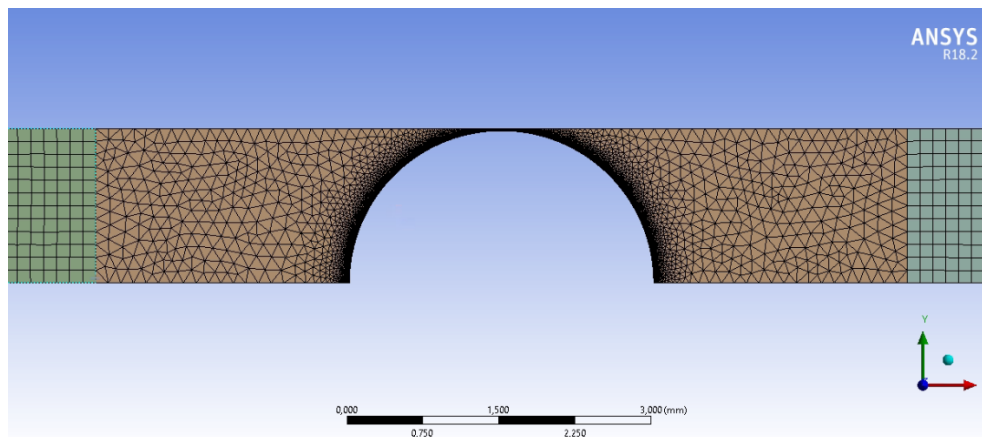


Figura 3.12: Malla de la geometría con forma de la partícula esférica y holgura entre esfera y cañón.

El detalle del mallado cerca de la zona de la holgura entre la esfera y el cañón se muestra en la Figura 3.13. El tamaño de los elementos en el borde es de $1 [\mu m]$.

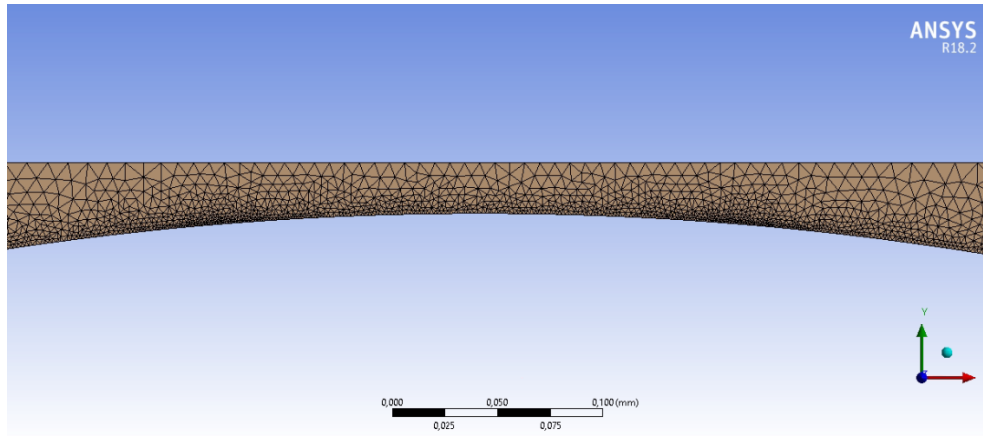


Figura 3.13: Detalle de la malla en la esfera.

3.4. Análisis de resultados

Una vez que se obtuvieron los resultados de forma numérica y experimental se sigue con el análisis. La principal variable de interés a comparar es la velocidad de la partícula a la salida del cañón de aceleración en función de la presión del estanque acumulador.

Finalmente se proponen posibles explicaciones de las diferencias entre los resultados numéricos y experimentales.

Capítulo 4

Resultados y discusión

4.1. Simulaciones

4.1.1. Contornos de velocidad

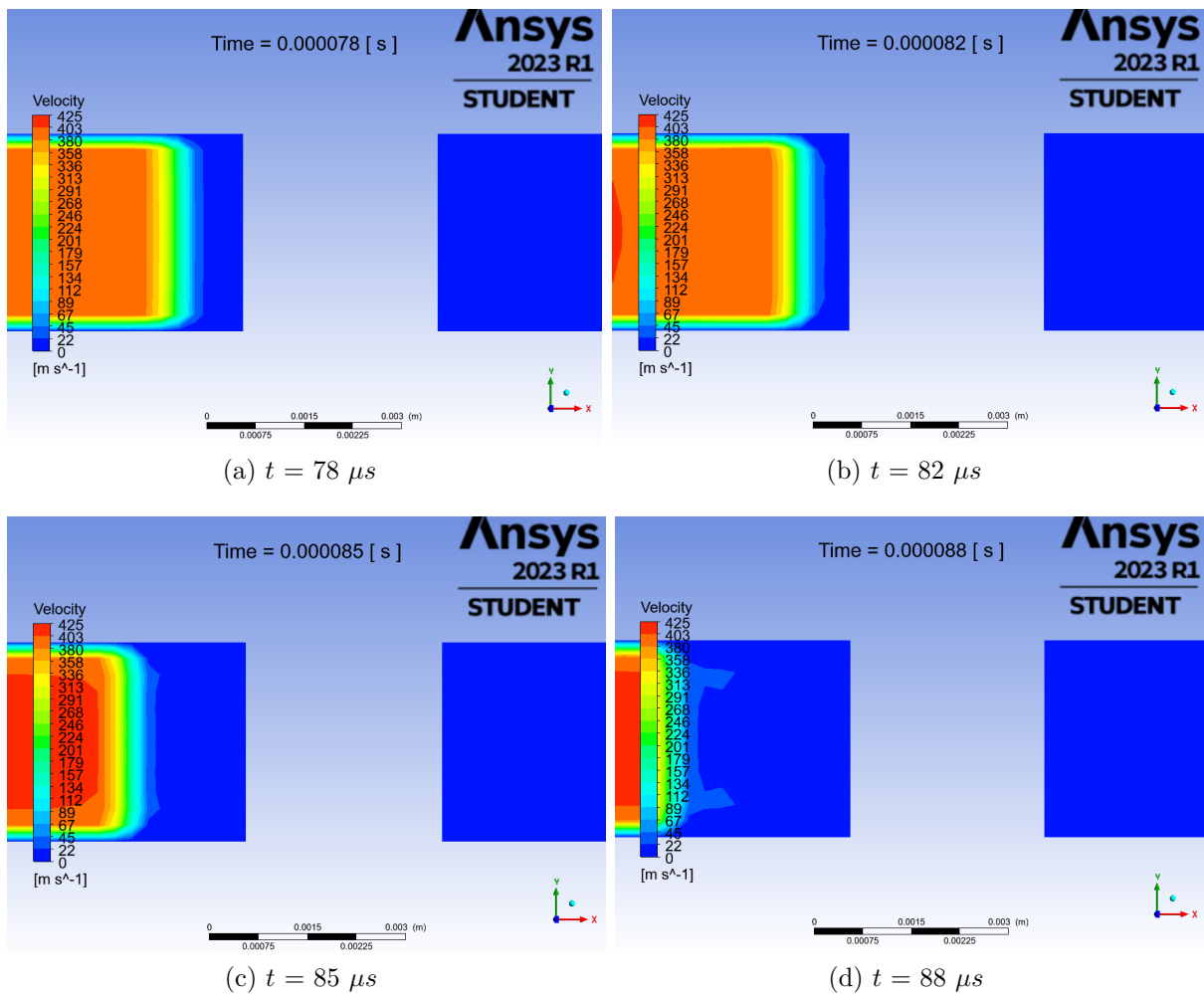


Figura 4.1: Contornos de velocidad de partícula de acero tipo pistón en distintos instantes de tiempo. $p_{inical} = 6,89$ [bar].

En las Figuras 4.1 y 4.2 se muestran los contornos de velocidad en la partícula de acero para una presión inicial de 6,89 [bar] para el caso pistón y esfera respectivamente, en distintos instantes de tiempo. En el caso pistón la velocidad máxima alcanzada en el impacto del fluido sobre la partícula fue de 425 [m/s] aproximadamente. En los gráficos se aprecia como el fluido impacta con la partícula y luego la onda se devuelve en sentido opuesto, generándose una zona de baja velocidad justo antes de la partícula.

En el caso de la simulación tipo esfera (Figura 4.2) el fluido impacta con la partícula, se genera una onda en sentido opuesto y una parte pasa por el estrechamiento entre la partícula y el cañón, alcanzando velocidades de hasta 1000 [m/s] (unos $3M$ aproximadamente). Al alcanzar esta velocidad es necesario asignar pasos de tiempo muy pequeños a la simulación (del orden de $1E-8$ [s]) para que el número de *Courant* se mantenga en valores estables.

En *Ansys Fluent* el paso de tiempo más pequeño que se puede asignar a una simulación en régimen transite es de $1E-8$ [s], por lo que, para presiones iniciales mayores (cercasas a los 30 [bar]) la simulación podría presentar inestabilidades y sería no factible, lo cual representaría una limitante para este estudio con el modelo tipo esfera.

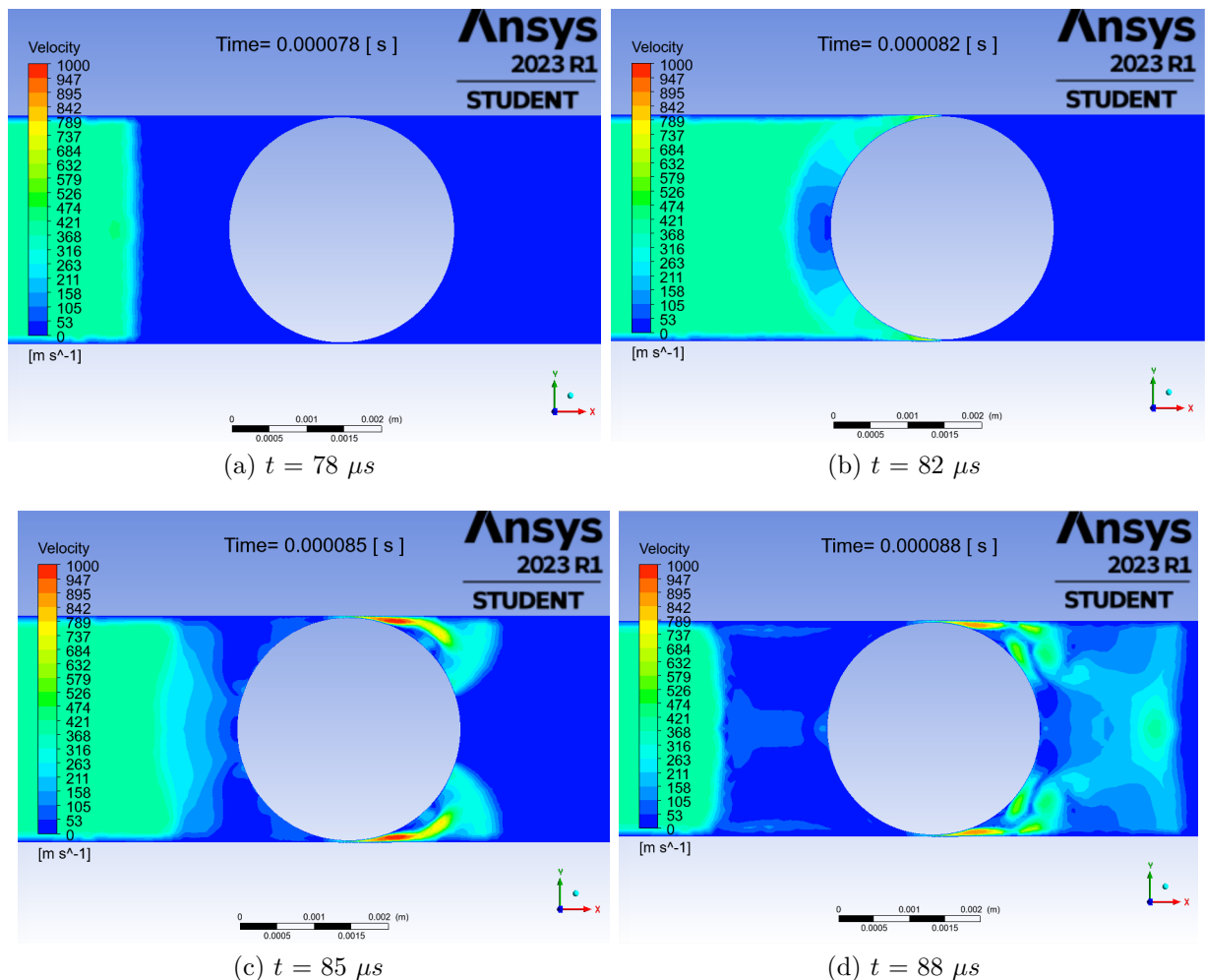


Figura 4.2: Contornos de velocidad de partícula de acero esférica en distintos instantes de tiempo. $p_{inicial} = 6,89$ [bar].

4.1.2. Contornos de presión

Las Figuras 4.3 y 4.4 muestran los contornos de presión en la partícula de acero para una presión inicial de 6,89 [bar] para el caso pistón y esfera respectivamente, en distintos instantes de tiempo. En ambos casos llega la onda de presión, impacta contra la partícula y se devuelve en sentido opuesto al de impacto. En el caso del modelo tipo esfera existe una onda de presión que pasa por la estrechez.

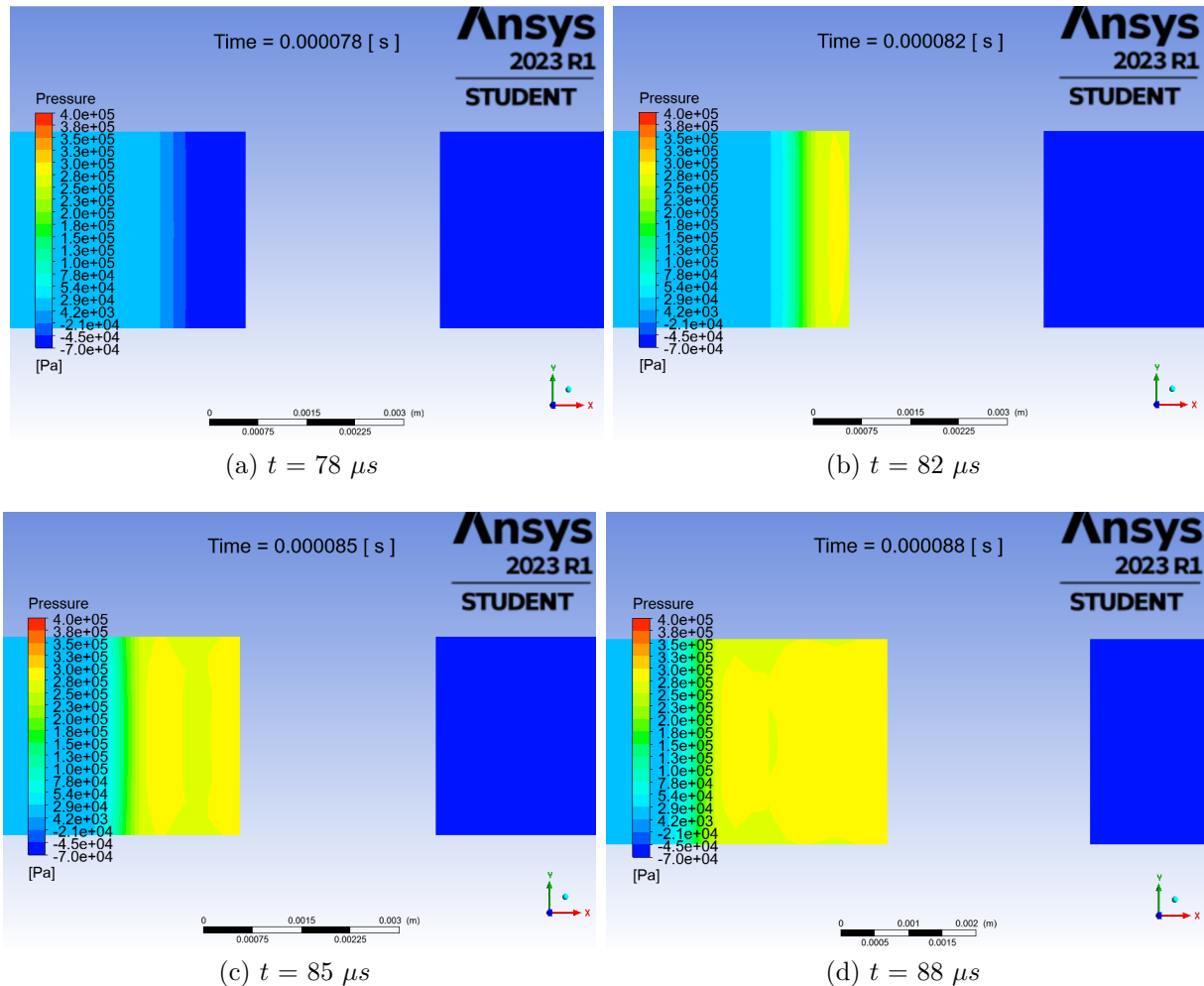


Figura 4.3: Contornos de presión de partícula de acero tipo pistón en distintos instantes de tiempo. $p_{inicial} = 6,89$ [bar].

Otra diferencia en los contornos de presión para ambos casos es que el perfil de presiones para el caso tipo pistón es constante en el eje y (paralelo al borde de la partícula), en tanto que la presión en el caso tipo esfera no es constante alrededor de la partícula. Para el instante de $88 \mu\text{s}$ la presión en la esfera es mayor al acercarse al centro y es menor en la zona del estrechamiento.

En ambos casos (esfera y pistón) se genera una presión mayor detrás de la partícula (parte izquierda), la cual es la responsable de acelerar la partícula a lo largo del cañón de aceleración.

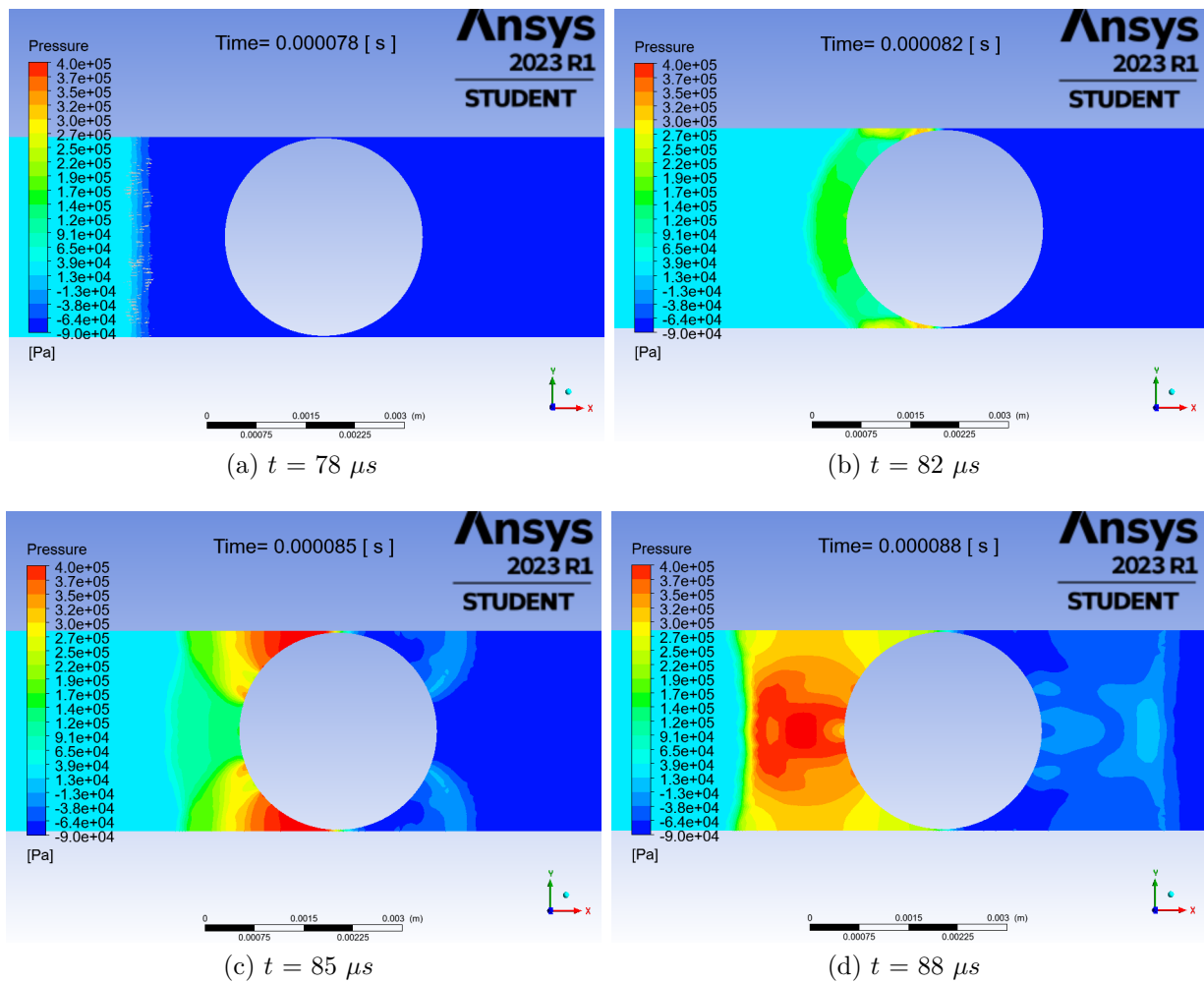


Figura 4.4: Contornos de presión de partícula de acero esférica en distintos instantes de tiempo. $p_{inical} = 6,89$ [bar].

4.1.3. Presencia de ondas de choque

El software *Ansys Fluent* junto con el modelo utilizado en las presentes simulaciones es capaz de detectar ondas de choque en caso de que éstas se presenten, debido a que utiliza el *solver* basado en densidad, tiene activada la ecuación de energía y el modelo de turbulencia [15].

El lugar donde podrían aparecer ondas de choque en este caso es en el estrechamiento esfera-cañón, debido a que el área en esa zona es pequeña. De acuerdo con la Figura 4.2.c en el instante de $85 \mu s$ el fluido alcanza velocidades cercanas a los 1000 [m/s], es decir, unos $3M$ aproximadamente. Al observar el gráfico de presión para el mismo instante (Figura 4.4.c) aparece una onda presión oblicua, ubicada al lado derecho de la garganta. Esta onda podría identificarse como una onda de choque que se mueve rápidamente hacia la salida del cañón de aceleración. Cabe destacar que la esfera se mueve hacia la derecha aumentando su velocidad, por lo tanto, en instantes posteriores se hace más complejo identificar la presencia de ondas de choque en la zona de la garganta.

En los trabajos de Escalante [19] y Xavier [15] aparecen ondas de choque producto de la alta velocidad del proyectil cuando está fuera del cañón de aceleración. En el presente trabajo no se realiza el análisis del comportamiento fluidodinámico a la salida del cañón, por lo cual no se puede afirmar que aparezcan, sin embargo, es esperable que para las mayores presiones si se presenten ondas de choque posterior a la salida del cañón de aceleración.

4.1.4. Independencia de malla

En la Figura 4.5 se muestra la velocidad de partícula de acero obtenida mediante simulación para distintos refinamientos de malla.

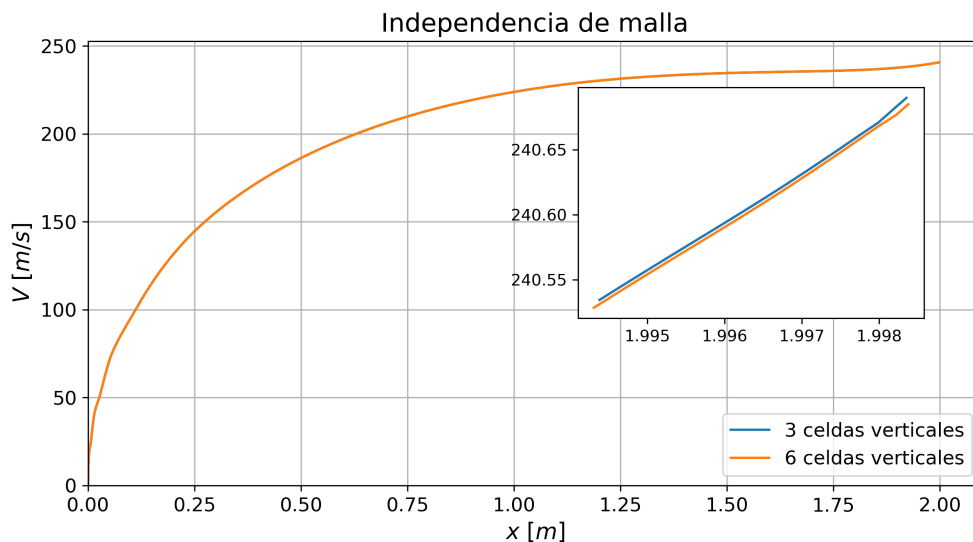


Figura 4.5: Velocidad de partícula a lo largo del cañón para caso de 3 celdas verticales y 6 celdas verticales en el mallado.

Se observa que la curva de velocidad es prácticamente idéntica en ambos casos de mallado. Además al comparar la velocidad final mostrada en la Tabla 4.1 se desprende que esta variable (la velocidad final) no depende de la malla, por lo tanto se alcanza la independencia de malla.

Tabla 4.1: Parámetros para el análisis de independencia de malla.

Caso	Celdas verticales	Sizing [mm]	Nodos	Elementos	v_{final} [m/s]
1	3	0,5	16675	12950	240,69
2	6	0,25	58237	51383	240,68

4.1.5. Evaluación del modelo CFD

En la Figura 4.6 se muestran las curvas de velocidad vs posición obtenidas mediante las simulaciones y su contraste con el modelo teórico utilizado por Berasaín, esto para el caso de la partícula de acero.

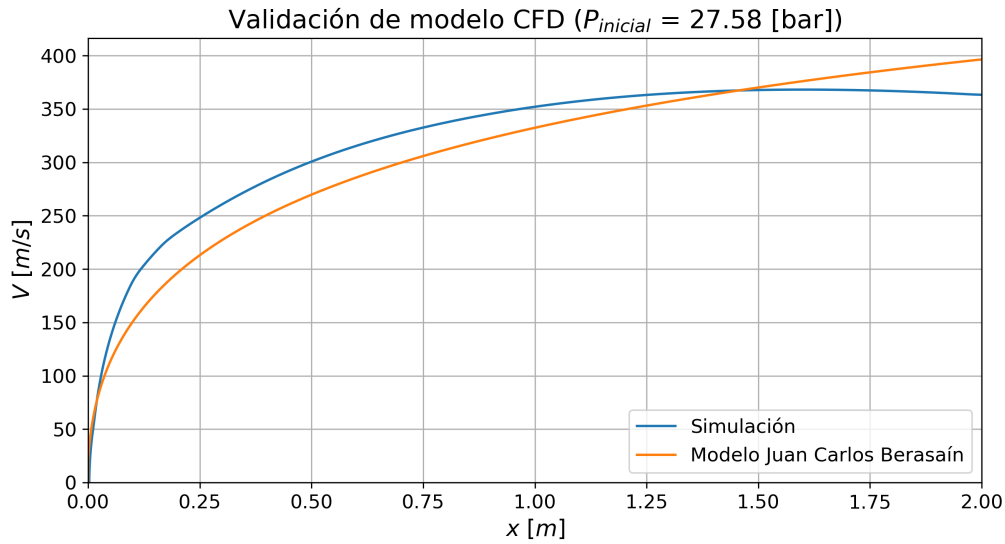


Figura 4.6: Velocidad de partícula a lo largo del cañón obtenida con simulaciones y con el modelo teórico de Juan Carlos Berasaín. $p_{inicial} = 27,58$ [bar].

Ambas curvas tienen comportamientos similares, ya que presentan un crecimiento rápido de la velocidad en los primeros 0,25 [m], para luego disminuir el crecimiento de la velocidad.

La curva del modelo teórico presenta una velocidad creciente en todo el tramo de aceleración, mientras que la velocidad por simulación alcanza un límite. En los primeros 1,5 [m] la velocidad del modelo teórico se mantiene por debajo de la velocidad obtenida con la simulación, mientras que a partir de 1,5 [m] hasta el final el modelo teórico tiene una velocidad mayor a la obtenida por simulación numérica.

Tabla 4.2: Velocidad final de la partícula determinada mediante simulación y su comparación con la velocidad obtenida con el modelo teórico y con las pruebas experimentales. $p_{inicial} = 27,58$ [bar].

v final [m/s]			Diferencia simulación [%]	
Simulación	Teórico	Experimental	Teórico	Experimental
363,2	396,5	244,8	-8 %	33 %

Al comparar la velocidad final de la partícula obtenida con simulación con el modelo teórico y las pruebas experimentales (Tabla 4.2) se tiene que $v_{experimental} < v_{simulación} < v_{teórico}$. Esta relación hace sentido, porque el modelo teórico no considera pérdidas que si se consideran en las simulaciones fluidodinámicas (como pérdidas de carga, por ejemplo), mientras que las simulaciones no consideran todas las pérdidas de energía presentes en el fenómeno, las cuales sí afectan en las pruebas experimentales.

La diferencia porcentual de la simulación con respecto al modelo teórico es de -8 %, en tanto que el error entre la simulación y lo experimental es del 33 %. Con esto se tiene un modelo CFD confiable.

4.1.6. Velocidad de partículas de acero y aluminio

La Figura 4.7 muestra las curvas de velocidad de la partícula de acero a diferentes presiones iniciales del estanque.

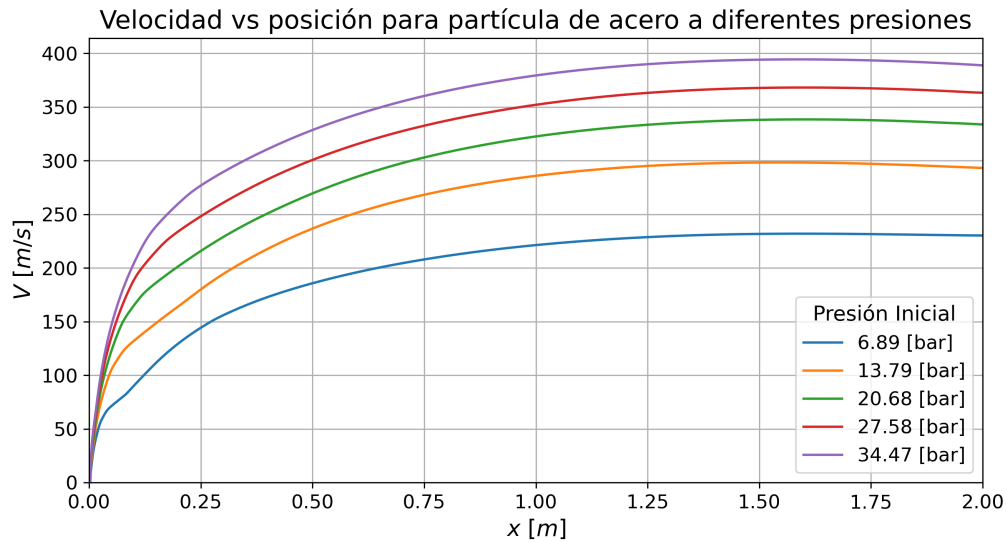


Figura 4.7: Velocidad a lo largo del cañón para partículas de acero a diferentes presiones iniciales.

Se observa que la velocidad crece rápidamente en los primeros 0,25 [m], para luego seguir creciendo con una menor tasa, llegando a un comportamiento prácticamente constante a partir de los 1,25 [m]. Tal como se esperaba, a mayor presión inicial, mayor velocidad de la partícula en el cañón de aceleración. En términos del comportamiento de la velocidad a lo largo del cañón de aceleración se condice con el comportamiento observado en los trabajos de Escalante [19] y Xavier [15].

Existe una diferencia en el comportamiento de las curvas de velocidad de partículas de acero y de aluminio. La curva de las partículas de aluminio (Figura 4.8) tiene un aumento en la velocidad hasta la distancia de 1 [m] aproximadamente, desde donde comienza a disminuir la velocidad de manera notoria.

Esta disminución en la velocidad de la partícula de aluminio se puede asociar a la condición de borde de salida p_{out} , ya que hay una presión absoluta mayor a 0, la cual ejerce una fuerza en contra del sentido de movimiento de la partícula. Como la inercia de la partícula de aluminio es menor que la inercia de la partícula de acero, la partícula de aluminio percibe el efecto de la condición de borde en mayor manera que el efecto percibido por la partícula de acero.

En la Figura 4.9 se muestra la velocidad de la partícula para acero y aluminio bajo las mismas condiciones operacionales. La velocidad de la esfera de aluminio es mayor que la velocidad de la esfera de acero en todo el tramo, salvo en el final, donde tienen velocidades prácticamente idénticas. La velocidad máxima de la partícula de acero se alcanza cerca del final y tiene un valor cercano a 370 [m/s], mientras que la velocidad máxima de la esfera de

aluminio se alcanza aproximadamente en los 0,75 [m] y tiene un valor 470 [m/s], es decir, unos 100 [m/s] de diferencia.

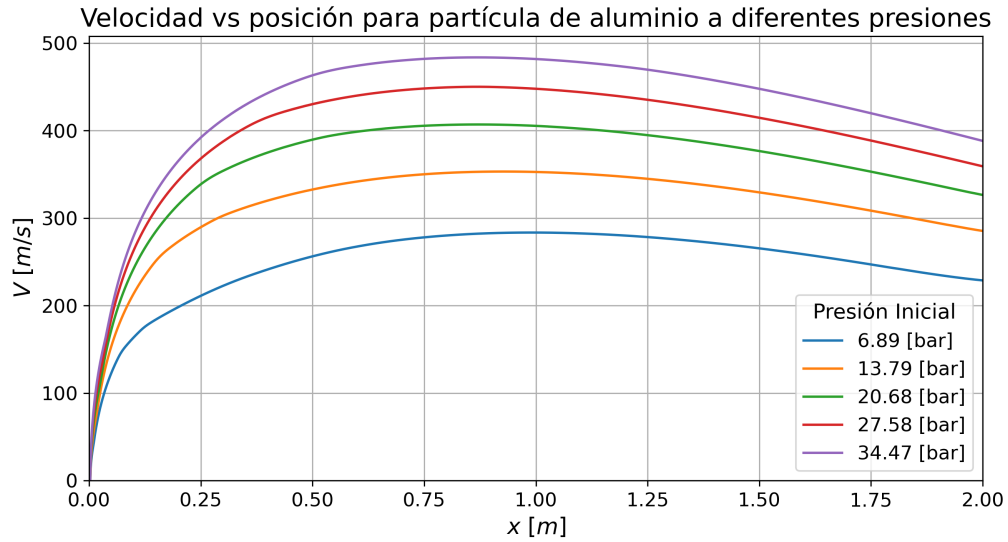


Figura 4.8: Velocidad a lo largo del cañón para partículas de aluminio a diferentes presiones iniciales.

El hecho de que en las simulaciones la partícula de aluminio alcance su velocidad máxima aproximadamente a la mitad del tramo de aceleración inicial de largo 2 [m] abre la posibilidad a hacer modificaciones en el sistema SPITS para medir velocidad de partícula cuando el cañón de aceleración tiene 1 [m] de largo, para la configuración definida en este trabajo de título. Esto con el fin de aprovechar de manera más apropiada la energía transmitida desde el gas propulsor a la partícula de prueba.

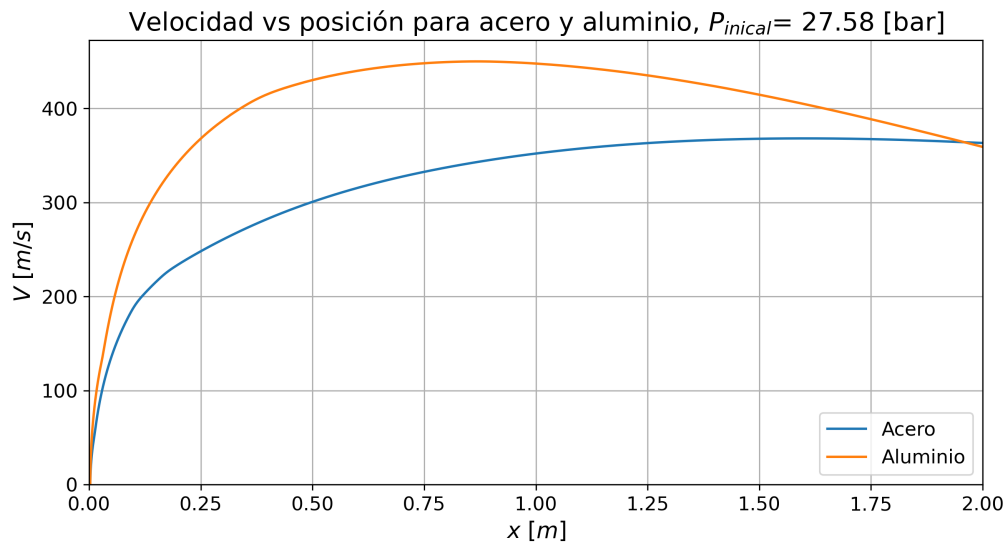


Figura 4.9: Velocidad a lo largo del cañón para partículas de diferente material. $p_{inicial} = 27,58$ [bar].

En la Figura 4.10 se presenta la velocidad final de la partícula para acero y aluminio, dependiendo de la presión inicial. Como se mencionó antes, la velocidad final es muy similar para ambos casos con la misma presión. En la práctica (experimental) se obtiene que la velocidad de la partícula de aluminio alcanzada es mayor que la partícula de acero (ver Figura 4.16). La explicación de este comportamiento en las simulaciones se puede atribuir a la condición de presión de salida p_{out} descrita anteriormente.

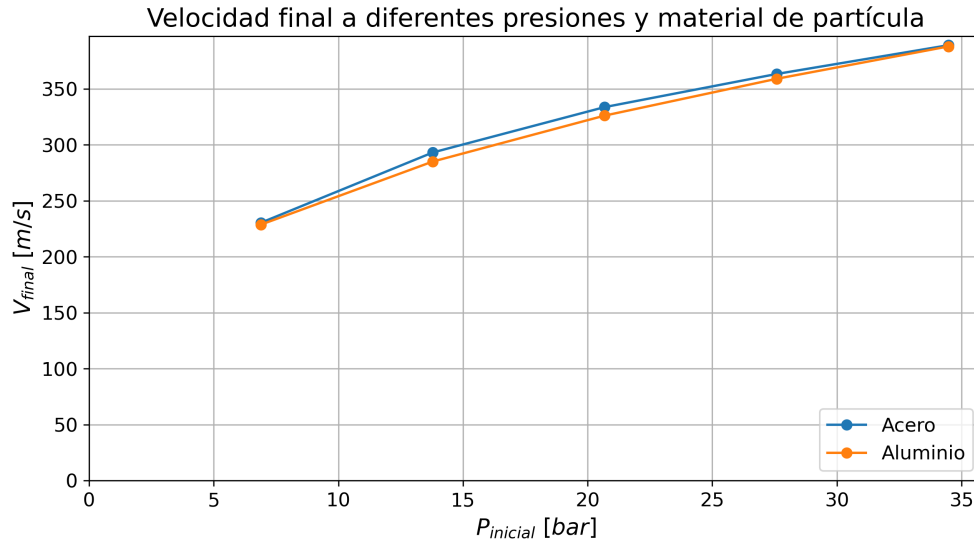


Figura 4.10: Velocidad final de partículas de acero y aluminio para diferentes presiones iniciales, obtenidas mediante simulación.

4.1.7. Efecto de la presión de la cámara de vacío

Tal como se plantea en la literatura y como se comentó en la sección 2.2, la cámara de vacío cumple el rol de disminuir la resistencia del aire en la parte frontal de la partícula. En la Figura 4.11 se muestra el resultado de la simulación al variar la presión inicial del cañón (presión de salida, p_{out}).

La curva de velocidad para el caso en que p_{out} es $-0,7$ [bar] decae a partir de los $0,75$ [m], mientras que la curva en que p_{out} es $-0,95$ [bar] es creciente hasta alcanzar un comportamiento constante a partir de los $1,25$ [m]. Este comportamiento se debe únicamente al cambio de la presión de salida, por lo tanto, la baja presión que la partícula percibe en su parte frontal es fundamental para alcanzar mayores velocidades.

Al comparar la velocidad experimental del caso con $p_{out} = -0,7$ [bar] con la velocidad en que $p_{out} = -0,95$ [bar] se tiene que la velocidad para el primer caso es de $278,5$ [m/s] y para el segundo caso es de $332,5$ [m/s], es decir, se logra un aumento de más de 50 [m/s] al disminuir $0,25$ [bar] de presión (Tabla 4.3). Con esta configuración se alcanza la máxima velocidad obtenida en todas las pruebas realizadas en el presente trabajo de título. Para obtener mayores velocidades se propone usar He como gas propulsor, debido a que la velocidad del sonido es mayor en ese gas.

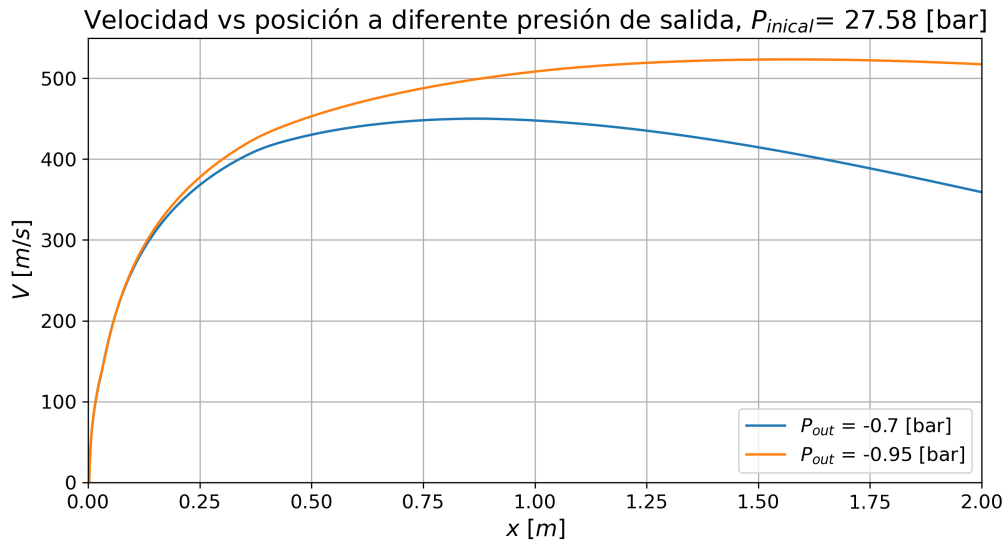


Figura 4.11: Velocidad a lo largo del cañón para partícula de aluminio con diferente presión de la cámara de vacío (p_{out}).

Tabla 4.3: Velocidad final de partícula de aluminio para el caso base ($p_{out} = -0,7$ [bar]) y el caso en que $p_{out} = -0,95$ [bar].

v_{final} [m/s]			
$p_{out} = -0,7$ [bar]		$p_{out} = -0,95$ [bar]	
Simulación	Experimental	Simulación	Experimental
358,9	278,5	517,2	332,5

Dado que en la mayoría de las pruebas realizadas se utiliza $p_{out} = -0,7$ [bar] por limitaciones propias de la bomba de vacío, se propone profundizar este estudio acercando lo más posible la presión de la cámara de vacío al *cero* absoluto (cerca a -1 [bar]), para obtener velocidades más altas y, eventualmente, lograr la deposición de partículas en el sustrato.

4.1.8. Efecto de la forma esférica y holgura

En el sistema experimental la partícula tiene forma esférica y existe una diferencia entre el diámetro de la esfera y el diámetro interno del cañón de aceleración. En las Figuras 4.12 y 4.13 se muestran las curvas de velocidad comparando el modelo tipo *pistón* y el modelo tipo *esfera* para acero y aluminio respectivamente.

Para la partícula de acero (Figura 4.12) el comportamiento de el caso pistón y el caso acero es similar. En ambos casos la velocidad presenta un rápido crecimiento en los primeros 0,5 [m], para luego tender un valor constante. La diferencia radica en que la curva de del modelo tipo esfera llega a un valor constante menor a la velocidad del modelo tipo pistón.

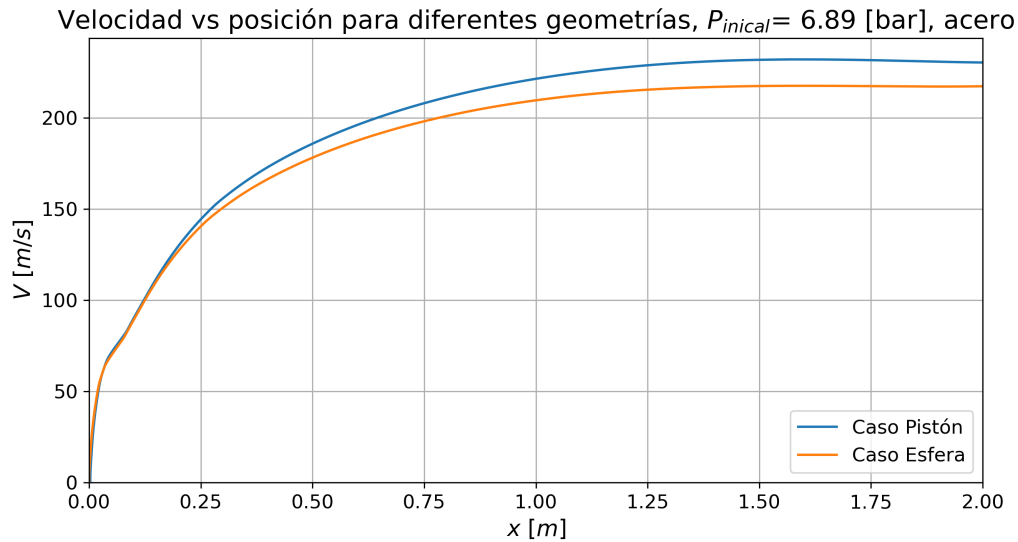


Figura 4.12: Velocidad a lo largo del cañón para partícula de acero para el caso pistón y el caso con partícula esférica. $p_{inical} = 6,89$ [bar].

Para el caso de la partícula de aluminio el comportamiento de la velocidad es similar en ambos casos, tendiendo a un valor prácticamente igual al final del tramo de aceleración.

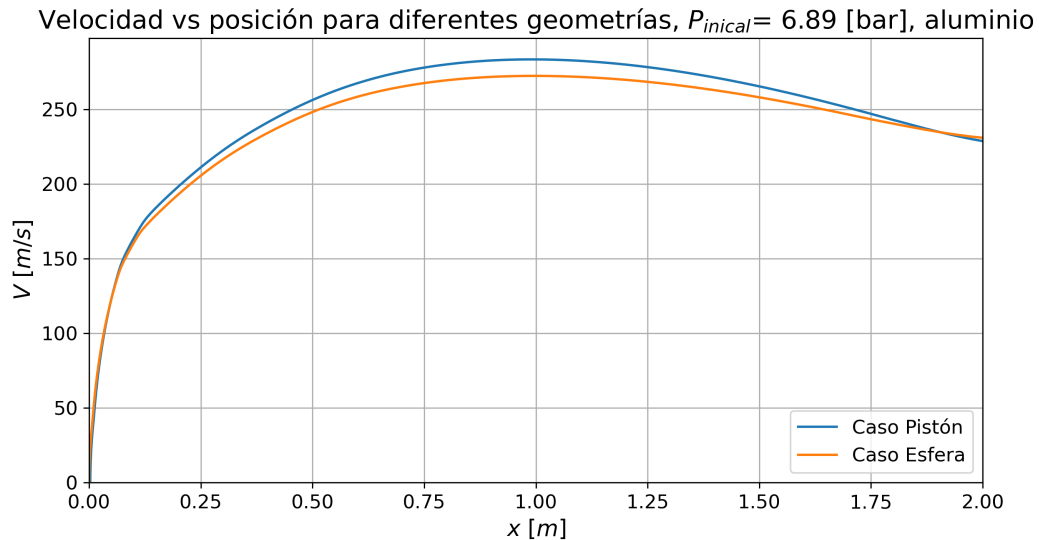


Figura 4.13: Velocidad a lo largo del cañón para partícula de aluminio para el caso pistón y el caso con partícula esférica. $p_{inical} = 6,89$ [bar].

En la Tabla 4.4 se muestra la comparación de la velocidad final para ambos casos. Se obtiene que para una partícula de acero la diferencia del caso pistón con respecto al caso esfera es de 5,6 %, mientras que para una partícula de aluminio esa diferencia es de -1 %, es decir, el valor del modelo tipo pistón resulta menor que el valor de la simulación tipo esfera.

Tabla 4.4: Velocidad final de partícula usando la geometría tipo pistón y la geometría esférica, para acero y aluminio. $p_{inical} = 6,89$ [bar].

v_{final} acero [m/s]		Diferencia [%]	v_{final} aluminio		Diferencia [%]
Pistón	Esfera		Pistón	Esfera	
230,3	217,3	5,6 %	228,6	230,8	-1,0 %

De estos resultados se desprende que para este problema en particular el modelo tipo pistón entrega resultados con una diferencia de menos del 6 %, es decir, los efectos de la forma esférica y de la holgura existente entre el diámetro de la esfera y el diámetro interior del cañón no tienen gran influencia para determinar la velocidad final de la partícula, por lo tanto el modelo tipo pistón es una opción factible y viable.

En términos de recurso computacional el modelo tipo pistón resulta ser mucho menos costoso que el modelo tipo esfera. Una simulación del modelo tipo pistón toma entre 4 a 5 horas, mientras que una simulación del modelo tipo esfera demora incluso 5 o 7 días. Por esta razón es que se hace importante este resultado, ya que para futuros estudios de esta índole en el sistema SPITS se puede utilizar el modelo tipo pistón, ahorrando recurso computacional y entregando resultados confiables.

4.1.9. Efecto de viscosidad variable y ecuación de estado de *Redlich-Kwong*

Al comparar el caso base (gas con viscosidad constante y ecuación de estado de los gases ideales) con el caso con viscosidad variable y ecuación de estado de *Redlich-Kwong* se obtiene el gráfico de la Figura 4.14.

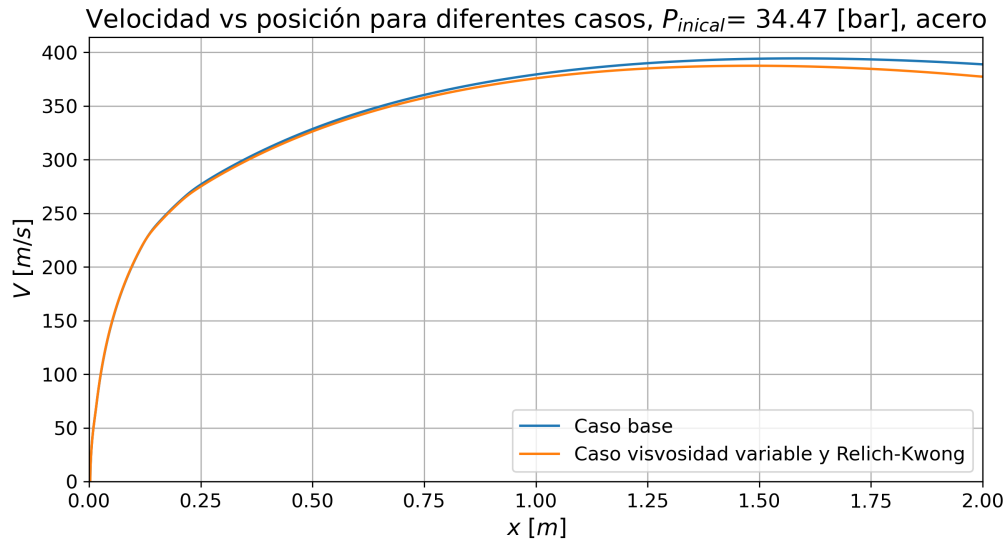


Figura 4.14: Velocidad a lo largo del cañón para partícula de acero para el caso base en comparación con el caso con viscosidad variable y ecuación de estado de *Redlich-Kwong*.

Ambas curvas son prácticamente idénticas hasta $x = 1$ [m], a partir de donde la velocidad para el caso con viscosidad variable y ecuación de *Redlich-Kwong* comienza a disminuir. Haciendo el contraste de los resultados de la velocidad final se desprende que para este caso particular la aproximación de viscosidad constante y ley de gas ideal entrega una aproximación cercana en comparación con el modelo más complejo estudiado.

4.1.10. Presión de estanque en la descarga

De acuerdo con la ley de *Boyle-Mariotte*, al aumentar el volumen la presión inicial del estanque debería disminuir. En la Figura 4.15 se observa como evoluciona la presión a medida que la partícula avanza en el cañón, obtenida de manera numérica. Se muestra que la presión disminuye a lo largo del tramo, salvo en el principio, donde tiene un *peak*, el cual se puede asociar al impacto del gas en la partícula.

En la Tabla 4.5 se comparan los valores numéricos de la presión promedio del estanque cuando la partícula llega a los 2 [m] de distancia. En todos los casos la presión obtenida de manera numérica es mayor que la obtenida por *Boyle-Mariotte* y su error es menor al 1%, teniendo así otro punto de validación de la simulación numérica.

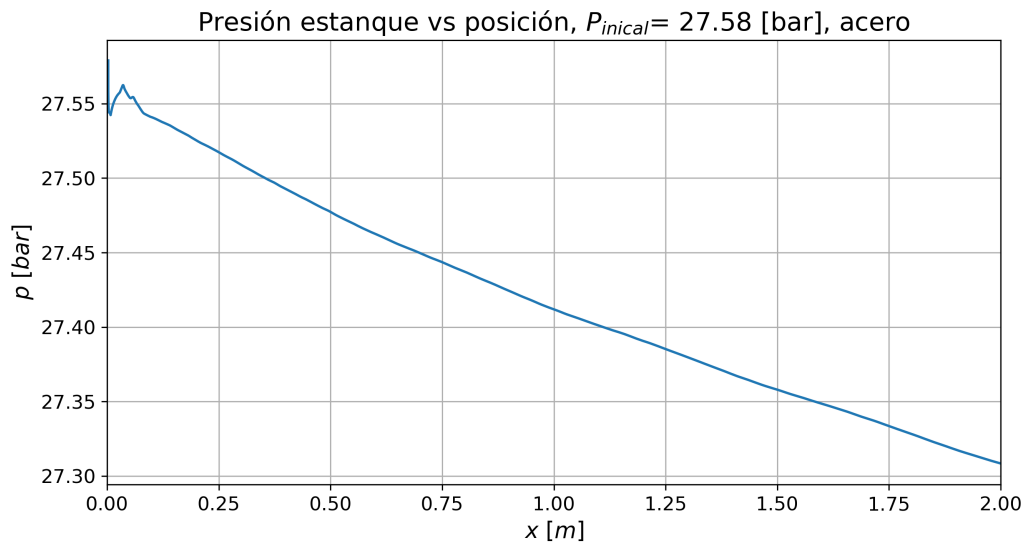


Figura 4.15: Presión promedio del estanque en función de la posición de la partícula de acero. $p_{inicial} = 27,58$ [bar].

La presión del estanque cuando la partícula llega al final del cañón es un alto porcentaje de la presión inicial (cerca al 99 %). Como propuesta de optimización de los recursos en la experimentación se propone cerrar la válvula solenoide una vez que la partícula impacte contra el sustrato. Debido a la rapidez con que sucede el fenómeno se hace imposible cerrar la válvula en el momento exacto en que la partícula impacta contra el sustrato, pero se puede cerrar antes de que todo el gas sea liberado. De esta forma se pueden aprovechar mejor los recursos disponibles.

Tabla 4.5: Presiones finales promedio del estanque obtenidas mediante simulación y con la ley de *Boyle-Mariotte*.

p [bar]	p promedio final estanque [bar]			Error [%]	
	<i>Boyle Mariotte</i>	Acero	Aluminio	Acero - <i>Boyle Mariotte</i>	Aluminio - <i>Boyle Mariotte</i>
6,89	6,80	6,80	6,81	0,1 %	0,2 %
13,79	13,59	13,63	13,65	0,3 %	0,4 %
20,68	20,39	20,47	20,49	0,4 %	0,5 %
27,58	27,18	27,31	27,34	0,5 %	0,6 %
34,47	33,98	34,15	34,19	0,5 %	0,6 %

4.2. Experimental

En la Figura 4.16 se muestra el resumen de los resultados obtenidos de manera experimental, donde se observa la velocidad final de la partícula en función de la presión inicial del estanque acumulador de gas.

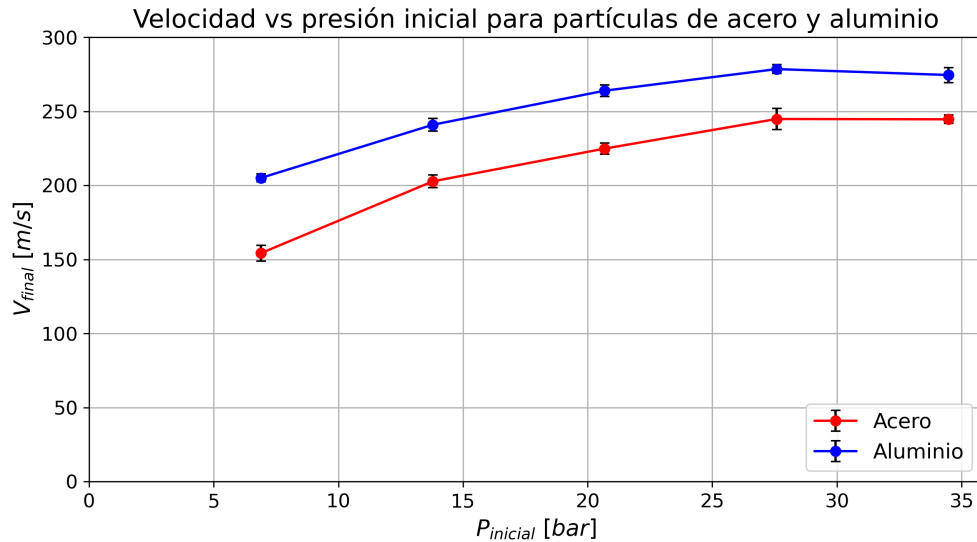


Figura 4.16: Velocidad de partícula a la salida del cañón en función de la presión inicial para partículas de acero y aluminio.

La velocidad de la partícula fue mayor para el aluminio que para el acero en todos los casos. Esto se debe a que la masa de la partícula de aluminio es menor que la masa de la partícula de acero.

En el caso de la partícula de acero la velocidad mínima alcanzada a la salida del cañón fue de alrededor de 150 [m/s], mientras que la velocidad máxima llegó cerca de los 250 [m/s] para las presiones de 27,58 [bar] y 34,47 [bar].

Un comportamiento interesante observado es que la velocidad de la partícula es mayor a medida que aumenta la presión del estanque para las presiones menores a los 27,58 [bar], sin embargo, la velocidad obtenida con presión de estanque de 34,47 [bar] es igual o menor incluso que la velocidad alcanzada con $p_{inicial}$ de 27,58 [bar], este comportamiento fue observado para partículas de acero y de aluminio. Se infiere que existe una velocidad límite que se puede alcanzar bajo ciertas condiciones de operación, tal que la presión del estanque deja de ser un factor preponderante en la velocidad alcanzada por la partícula.

Las temperaturas medidas en el estanque y en el cañón de aceleración se muestran en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Temperatura medida para cada una de las presiones de prueba utilizadas.

p_{in} [bar]	$T_{in-estanque}$ [K]	$T_{in-cannon}$ [K]
6,89	294	294
13,79	297	294
20,68	299	294
27,58	300	294
34,47	303	294

Se puede deducir que existe un leve aumento de la temperatura al aumentar la presión en el estanque acumulador. Por un lado el gas se expande desde el tanque de N_2 , lo cual significa una disminución de la temperatura con respecto a la temperatura inicial del gas en el interior del tanque de N_2 . Por otro lado, las partículas a mayor presión contenidas en un determinado volumen del estanque acumulador tendrán un mayor movimiento, lo que se cuantifica mediante la temperatura.

4.3. Comparación

En la Figura 4.17 se muestra la velocidad final de la partícula de acero a diferentes presiones iniciales obtenidas en las pruebas experimentales y en las simulaciones. La velocidad de la simulación está por sobre la velocidad de las pruebas experimentales. En la Tabla 4.7 se muestran los valores de las velocidades con su error asociado. El error entre la velocidad simulada con respecto a la velocidad medida experimentalmente se encuentra entre el 31 % y el 37 %.

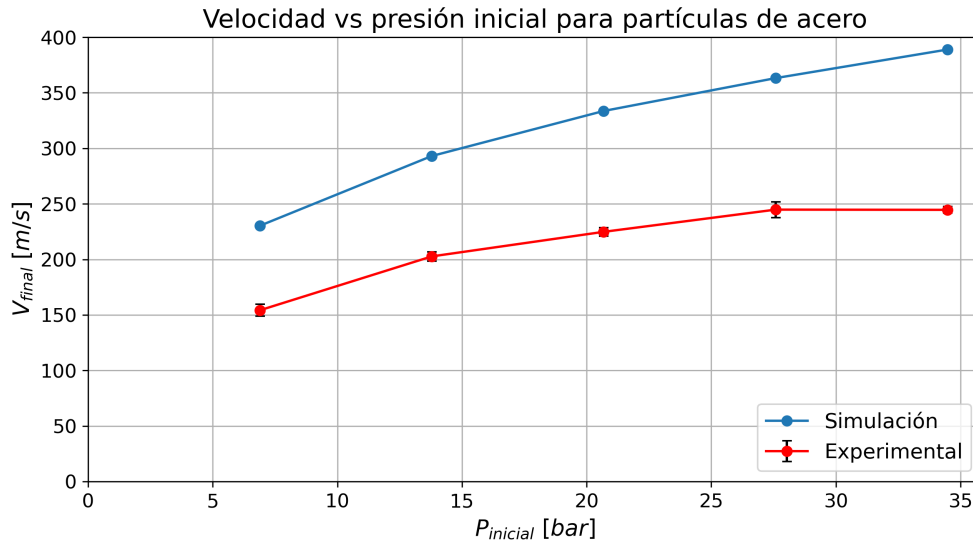


Figura 4.17: Velocidad final de partículas de acero a diferentes presiones iniciales, obtenida mediante simulaciones y pruebas experimentales.

Tabla 4.7: Velocidad de partícula de acero obtenida mediante pruebas experimentales y simulaciones.

p_{in} [bar]	$v_{final-exp}$ [m/s]	$v_{final-sim}$ [m/s]	Error [%]
6,89	154,2	230,3	33 %
13,79	202,7	293,1	31 %
20,68	224,8	333,6	33 %
27,58	244,8	363,2	33 %
34,47	244,6	388,9	37 %

En la Figura 4.18 se muestra la velocidad de la partícula de aluminio medida de forma experimental y encontrada mediante simulaciones. El error de las simulaciones con respecto a lo experimental van desde el 10 % hasta el 29 %.

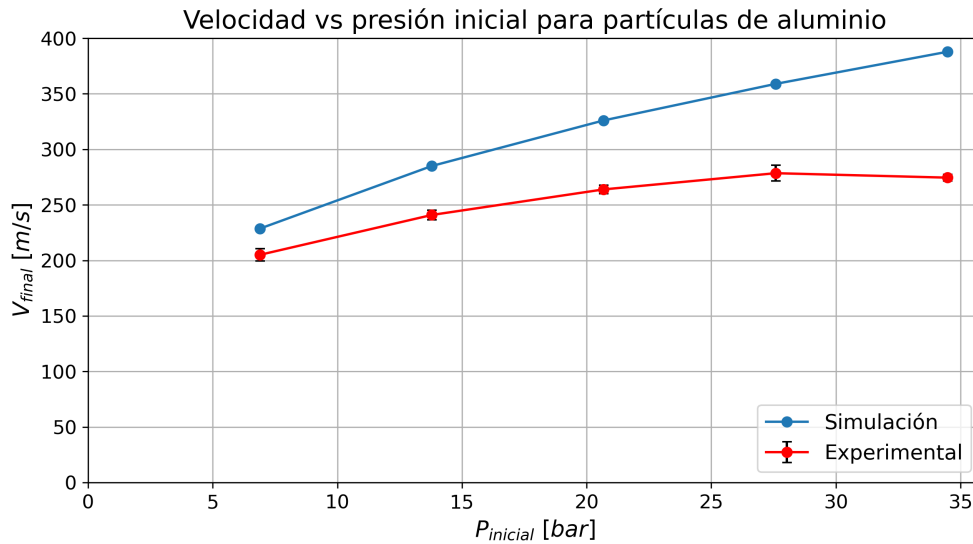


Figura 4.18: Velocidad final de partículas de aluminio a diferentes presiones iniciales, obtenida mediante simulaciones y pruebas experimentales.

Tabla 4.8: Velocidad de partícula de aluminio obtenida mediante pruebas experimentales y simulaciones.

p_{in} [bar]	$v_{final-exp}$ [m/s]	$v_{final-sim}$ [m/s]	Error [%]
6,89	205	228,6	10 %
17,79	240,9	285,0	15 %
20,68	263,9	326,0	19 %
27,58	278,5	358,9	22 %
34,47	275,5	387,8	29 %

En el trabajo de Moradi [20], el cual realizó la simulación numérica del arma de gas de una etapa, los valores de la velocidad del modelo numérico axis-simétrico fueron mayores a los resultados obtenidos de forma experimental, con un error que alcanzó 11 %. Los errores obtenidos en el presente trabajo de título son mayores, sin embargo, están dentro del mismo orden de magnitud y se mantiene el comportamiento en que los resultados mediante simulación son mayores a los obtenidos de forma experimental.

4.3.1. Posibles fuentes de error

Las posibles explicaciones a la diferencia entre la velocidad experimental y por simulaciones son las siguientes:

- El sistema SPITS cuenta con una válvula solenoide la cual tiene un tiempo de apertura. Al comenzar a abrir la válvula el gas comienza a salir del estanque. Es posible que el gas impacte a la partícula y la mueva con una presión baja, y con ello, una baja velocidad, antes que la alta presión llegue a la partícula. De esta manera en el tramo de aceleración no se aprovecharía la alta presión del gas lo produciría que se obtenga una velocidad menor a la obtenida mediante simulación, donde la válvula se abre de manera instantánea.

- En la simulación solo se considera la descarga del gas del estanque y el viaje de la partícula en el cañón, pero no se considera la salida de la partícula del cañón. Es posible que existan efectos fluidodinámicos a la salida del cañón que en la realidad sí afectan la velocidad de la partícula, pero en la simulación realizada en este trabajo no se consideran.
- En la práctica el sistema SPITS no cuenta con salidas, sino que la expansión de gas, el movimiento de la partícula y el impacto de ésta sucede en un sistema cerrado. En las simulaciones fue necesario asignar una presión de salida del cañón. Por lo tanto, puede existir acumulación de gas delante de la partícula que disminuiría la velocidad real de la partícula, pero que no se está considerando en la simulación.
- El movimiento de la partícula en la simulación ocurre solo en una dirección. En las pruebas experimentales la partícula puede girar y chocar con las paredes interiores del cañón. Estos efectos de fricción no se consideran en las simulaciones.

Capítulo 5

Conclusiones

Una vez realizado el presente trabajo de título se alcanza el objetivo general de evaluar numéricamente y validar experimentalmente la velocidad de las partículas aceleradas por el sistema SPITS diseñado por Berasaín.

Se desarrolla una metodología para simular la velocidad de la partícula. Este metodología contempla la utilización de malla dinámica con *layering* como método de actualización, además de utilizar el *solver* de *seis grados de libertad* de *Ansys Fluent*. Para el caso de partícula de acero con $p_{inical} = 27,58$ [bar] la simulación entrega una diferencia de velocidad de 33 % y una diferencia con respecto al modelo teórico usado por Berasaín de -8 %, obteniendo un modelo CFD viable.

Se consigue evaluar la velocidad de las partículas a diferentes presiones iniciales del estanque de manera numérica. Se comprueba que la velocidad de las partículas de aluminio y acero crece al aumentar la presión de entrada. Se realizan variaciones al modelo CFD inicial para estudiar el comportamiento de la velocidad en otros escenarios.

Al acercar la presión de la cámara de vacío al *cero* absoluto la velocidad de la partícula aumenta de manera significativa, lo cual comprueba que el efecto de la baja presión frente a la partícula es un factor relevante en la velocidad final de la partícula.

Se realizan simulaciones considerando la forma esférica de la partícula y la holgura entre el diámetro de la esfera y el diámetro interior del cañón, como variación al modelo inicial tipo pistón. Las simulaciones tipo pistón entregan resultados con una diferencia máxima de 5,6 % con respecto al modelo tipo esfera, por lo tanto el modelo tipo pistón es una opción confiable y óptima para resolver el problema. Este resultado es importante en términos de los recursos computacionales, puesto que la simulación tipo esfera puede demorar incluso 7 días, mientras que la simulación tipo pistón solo toma unas 5 horas.

Se evalúa experimentalmente la velocidad de las partículas de acero y aluminio en el sistema SPITS. La velocidad final aumenta a medida que la presión inicial es mayor. Este aumento sucede hasta una presión límite de 27,58 [bar] para la configuración usada. A partir de esta presión la velocidad no crece al aumentar la presión, por lo tanto se infiere que existe un límite práctico de velocidad, donde la presión no es un factor preponderante. Para aumentar más la presión se hace necesario cambiar la configuración de las prueba, como la presión de la cámara de vacío, el gas propulsor, entre otros.

Se logra comparar y analizar los resultados obtenidos de manera numérica y experimental. Los errores obtenidos de las simulaciones con respecto de los resultados experimentales van desde un 31 % al 37 % para el acero y entre un 10 % y un 29 % para el aluminio, los cuales se encuentran dentro del orden de error encontrado en la literatura para este tipo de fenómenos.

Dentro de los factores que explican la diferencia existente entre simulaciones y pruebas experimentales se encuentran el tiempo de apertura de la válvula solenoide, el cual no se considera en las simulaciones. Además en las simulaciones no se considera los efectos fluidodinámicos a la salida del cañón. Finalmente las simulaciones no consideran la posible acumulación de gas en frente de la partícula y tampoco considera las pérdidas por fricción entre la partícula y el cañón de aceleración.

5.0.1. Mejoras y trabajos futuros

Algunas de las mejoras y trabajos futuros propuestos son los siguientes:

- Para las condiciones de operación definidas en este trabajo se propone cambiar el largo del cañón de aceleración para las partículas de aluminio, para comprobar si efectivamente la velocidad es mayor cuando la posición es 1 [m] por ejemplo.
- Ampliar el presente trabajo utilizando *He* como gas propulsor.
- Ampliar este trabajo a presiones finales que se acerquen lo más posible al *cero* absoluto, para la cual la opción más adecuada sería cambiar la bomba de vacío por una de mejores características.
- Cambiar la válvula solenoide en el sistema SPITS, para que el tiempo de apertura no sea una variable de incidencia y de esa manera lograr que la partícula alcance mayores velocidades.
- Incluir el tiempo de apertura de la válvula en la simulación computacional.

Bibliografía

- [1] Yin S, Cavaliere P, Aldwell B, Jenkins R, Liao H, Li W, Lupoi R, “Cold spray additive manufacturing and repair: Fundamentals and applications,” *Additive Manufacturing*, vol. 21, pp. 628–650, 2018, [doi:https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.017](https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.017).
- [2] Berasaín J C, “Diseño y evaluación de un sistema de testeo de impacto unipartícula (spits),” Universidad de Chile, 2021, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/182160>.
- [3] Bedoya J, Cinca N, Guilemany J M, “Recubrimientos micro/nanoestructurados de aleaciones ligeras mediante proyección fría para la protección y reparación de componentes de elevado valor añadido: Estado del arte,” *Revista de Metalurgia*, vol. 49, no. 4, pp. 223–236, 2013.
- [4] Gärtner F, Stoltenhoff T, Schmidt T, Kreye H, “The cold spray process and its potential for industrial applications,” *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 223–232, 2006, [doi:10.1361/105996306X108110](https://doi.org/10.1361/105996306X108110).
- [5] Kiyohiro Ito*, Ichikawa Y, Ogawa K, “Experimental and numerical analyses on the deposition behavior of spherical aluminum particles in the cold-spray-emulated high-velocity impact process,” *Materials Transactions*, vol. 57, no. 4, pp. 525–532, 2016, [doi:https://doi.org/10.2320/matertrans.T-M2016803](https://doi.org/10.2320/matertrans.T-M2016803).
- [6] Hussain T, McCartney D G, Shipway P H, Zhang D, “Bonding mechanisms in cold spraying: The contributions of metallurgical and mechanical components,” *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 18, no. 3, pp. 364–379, 2008.
- [7] Assadi H, Gärtner F, Stoltenhoff T, Kreye H, “Bonding mechanism in cold gas spraying,” *Acta Materialia*, vol. 51, no. 1, pp. 4379–4394, 2003.
- [8] Hassani-Gangaraj M, Veysset D, Champagne V, Nelson K, Schuh C, “Adiabatic shear instability is not necessary for adhesion in cold spray,” *Acta Materialia*, vol. 158, no. 1, pp. 430–439, 2018.
- [9] Moradi A, “Study of real gas behavior in a single-state gas gun,” *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 78, pp. 1081–1085, 2011, <https://www.researchgate.net/publication/261703610>.
- [10] Engineering ToolBox, “Boyle’s law (mariotte’s law),” 2022, https://www.engineeringtoolbox.com/boyles-law-d_1276.html.
- [11] Horvath A L, “Redlich-kwong equation of state: review for chemical engineering calculations,” *Chemical Engineering Science*, vol. 29, no. 5, pp. 1334–1340, 1974, [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(74\)80147-8](https://doi.org/10.1016/0009-2509(74)80147-8).
- [12] Munson B, Young D, Okiishi T, Huebsch W, “Fundamentals of fluid mechanics,” pp. 12–13; 18;99–100; 126–128; 592–595, Sixth edition.

- [13] Anderson J, “Fundamentals of aerodynamics,” pp. 540–541, Fifth edition.
- [14] Yu W, Zhang X, “Aerodynamic analysis of projectile in gun system firing process,” *Journal of Applied Mechanics*, vol. 77, 2010, [doi:10.1115/1.4001559](https://doi.org/10.1115/1.4001559).
- [15] Xavier S, “Numerical analysis of gun barrel pressure blast using dynamic mesh adaption,” Embry-Riddle Aeronautical University, 2011, <https://commons.erau.edu/edt/258/>.
- [16] ANSYS Inc, “Ansys fluent user’s guide,” SAS IP, Inc., vol. 15, pp. 129–133; 559–616, 2013.
- [17] Simscale, “How to keep the courant number below 1?,” 2022, <https://www.simscale.com/knowledge-base/what-is-a-courant-number/>.
- [18] Cortés M, Fazio P, Rao J, Bustamante W, Vera S, “Modelación cfd de casos básicos de convección en ambientes cerrados: Necesidades de principiantes en cfd para adquirir habilidades y confianza en la modelación cfd,” *Revista ingeniería de construcción*, vol. 29, no. 1, 2014, <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732014000100002>.
- [19] Escalante A, “Numerical study of a one stage gas gun,” Universidad Carlos III de Madrid, 2017, https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/28053/TFG_Alfredo_Escalante_Lopez_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [20] Moradi A, “One-dimensional and axisymmetric numerical,” *Adv. Theor. Appl. Mech*, vol. 4, no. 3, pp. 101–111, 2011, <http://www.m-hikari.com/atam/atam2011/atam1-4-2011/moradiATAM1-4-2011.pdf>.

Anexos

Anexo A. Metodología

A.1. Métricas de calidad de malla

Skewness se define como la diferencia entre la forma de la celda y la forma de una celda equilátera de volumen equivalente. Las celdas muy sesgadas pueden disminuir la precisión y desestabilizar la solución. Por ejemplo, las mallas cuadriláteras óptimas tendrán ángulos de vértice cercanos a los 90 grados, mientras que las mallas triangulares deberían tener ángulos preferentemente cercanos a los 60 grados y tener todos los ángulos menores de 90 grados. Una regla general es que el sesgo máximo para una malla triangular/tetraédrica en la mayoría de los flujos debe mantenerse por debajo de 0,95, con un valor promedio significativamente más bajo. Un valor máximo por encima de 0,95 puede conducir a la convergencia.

Orthogonal Quality se calcula para las celdas usando el vector desde el centroide de la celda hasta cada una de sus caras, el vector del área de la cara correspondiente y el vector desde el centroide de la celda hasta los centroides de cada una de las celdas adyacentes (ver Figura A.1). Las peores celdas tendrán una calidad ortogonal más cercana a 0 y las mejores celdas más cerca de 1. La métrica *Orthogonal Quality* mínima para todos los tipos de celdas debe ser superior a 0,01, con un valor promedio significativamente mayor.

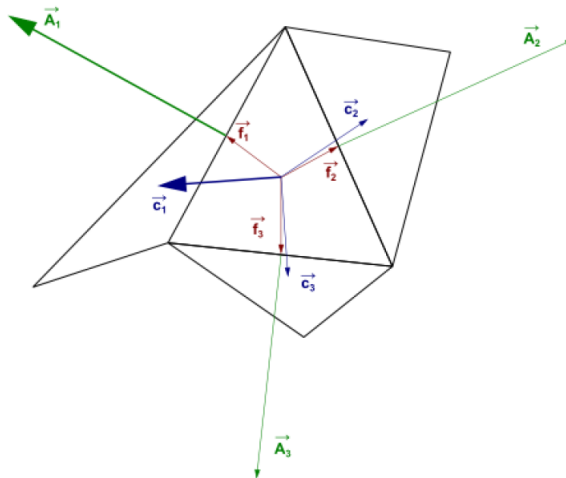


Figura A.1: Vectores usados para calcular la métrica de calidad *Orthogonal Quality* [16].

Anexo B. Resultados

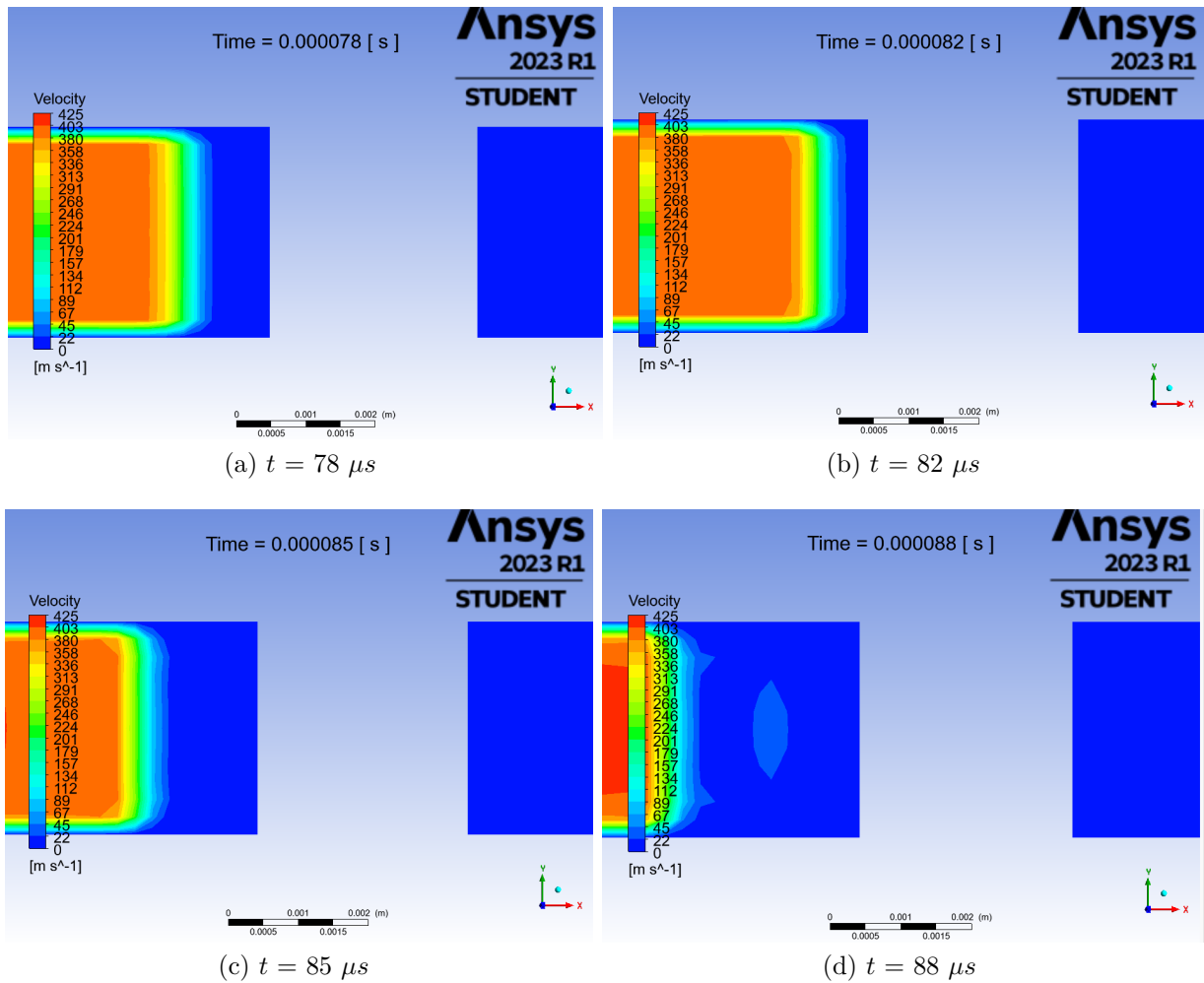
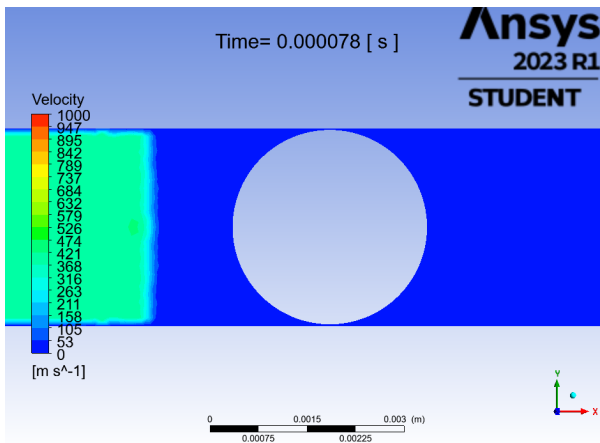
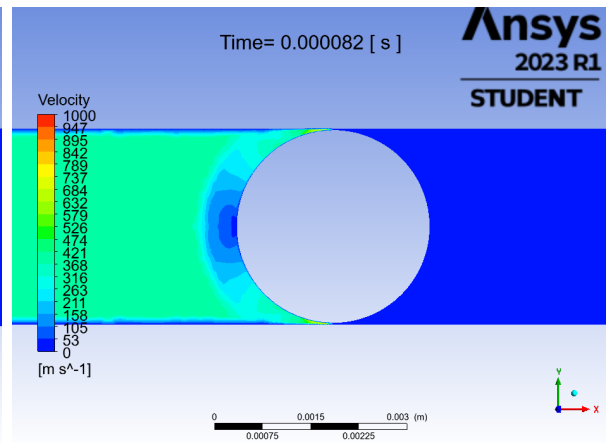


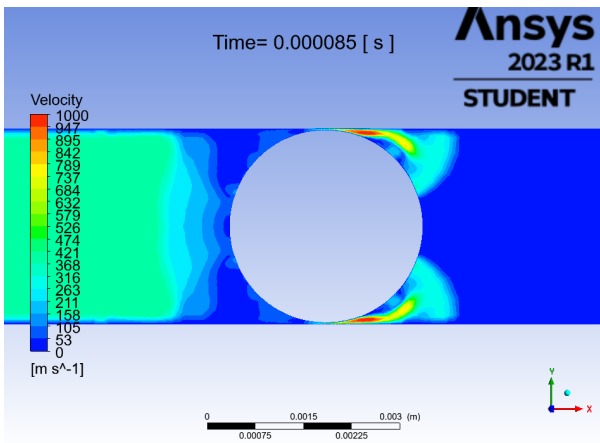
Figura B.1: Contornos de velocidad de partícula de aluminio tipo pistón en distintos instantes de tiempo. $p_{inical} = 6,89$ [bar].



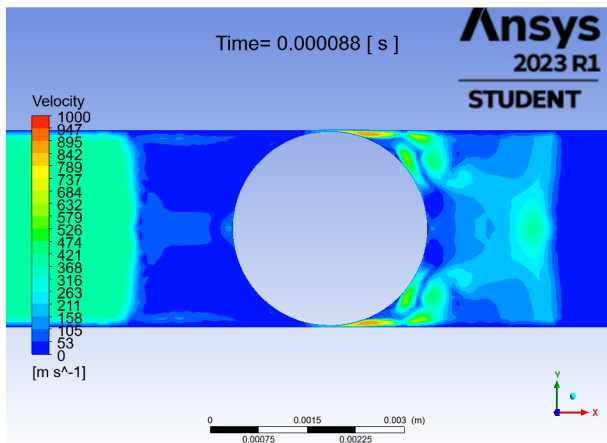
(a) $t = 78 \mu s$



(b) $t = 82 \mu s$

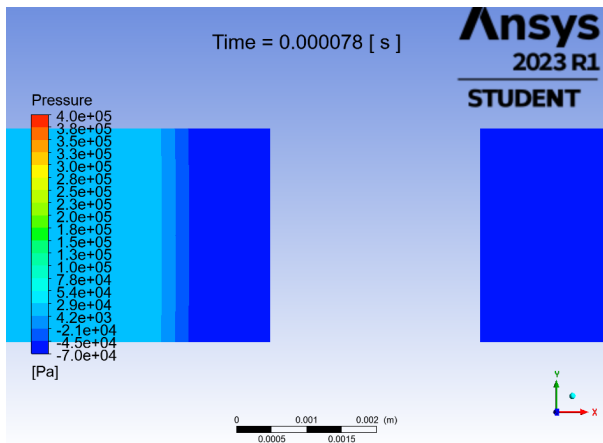


(c) $t = 85 \mu s$

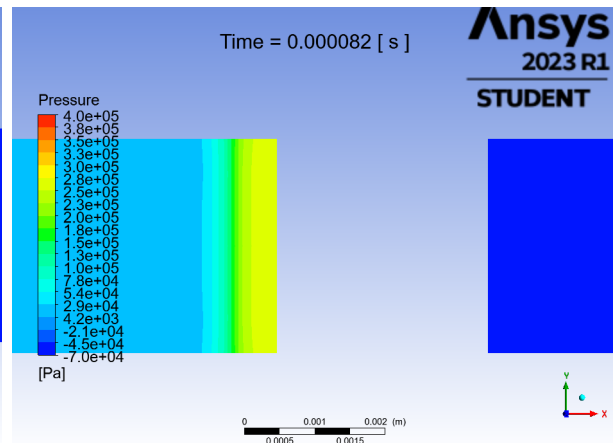


(d) $t = 88 \mu s$

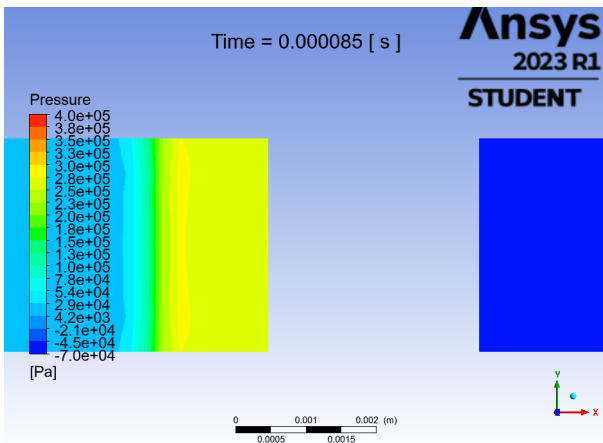
Figura B.2: Contornos de velocidad de partícula de aluminio esférica en distintos instantes de tiempo. $p_{inical} = 6,89$ [bar].



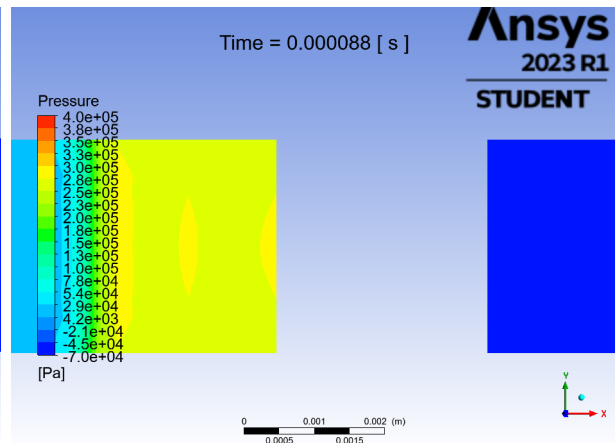
(a) $t = 78 \mu s$



(b) $t = 82 \mu s$

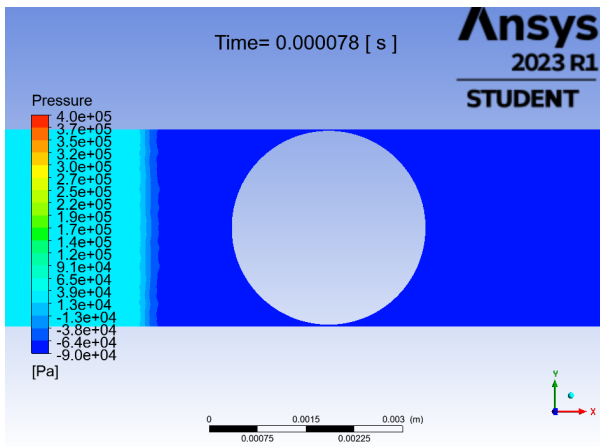


(c) $t = 85 \mu s$

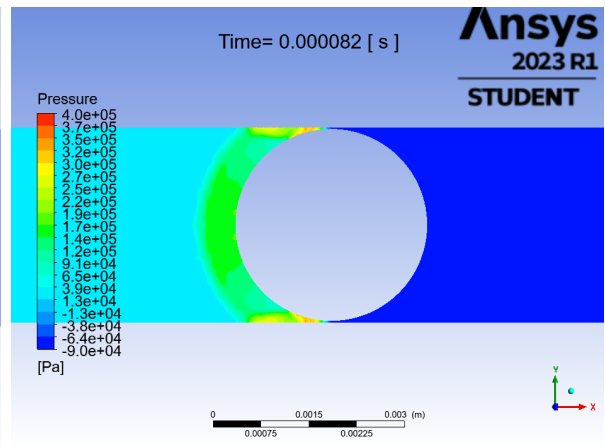


(d) $t = 88 \mu s$

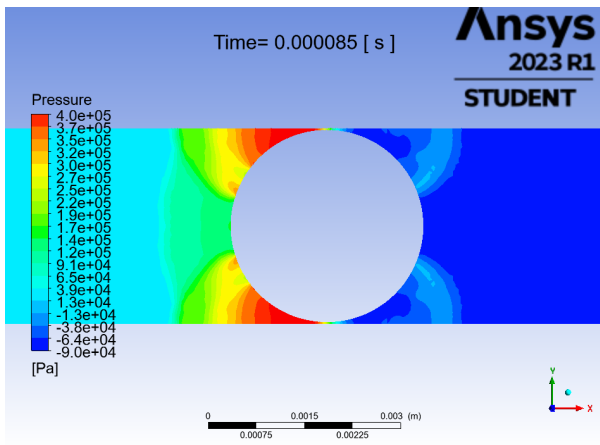
Figura B.3: Contornos de presión de partícula de aluminio tipo pistón en distintos instantes de tiempo. $p_{inical} = 6,89$ [bar].



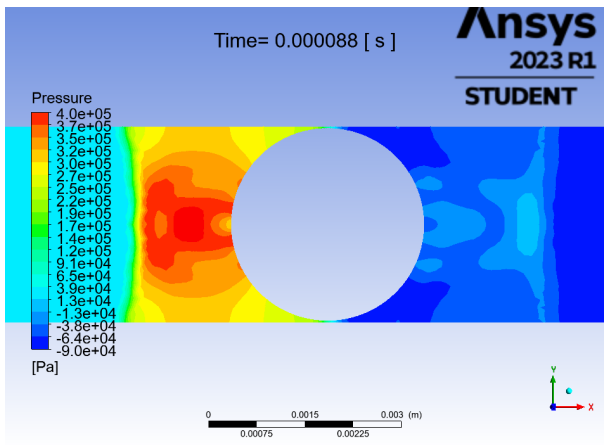
(a) $t = 78 \mu s$



(b) $t = 82 \mu s$



(c) $t = 85 \mu s$



(d) $t = 88 \mu s$

Figura B.4: Contornos de presión de partícula de aluminio esférica en distintos instantes de tiempo. $p_{inical} = 6,89$ [bar].