



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

## **SIMULACIÓN NUMÉRICA DE IMPACTO Y ADHESIÓN DE PARTÍCULAS ESFÉRICAS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

**JOAQUÍN MAURICIO MOLINA DEL RÍO**

PROFESOR GUÍA:  
RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
GABRIEL AREVALO GONZÁLEZ  
RODRIGO PALMA HILLERNS

SANTIAGO DE CHILE  
2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO  
POR: JOAQUÍN MAURICIO MOLINA DEL RÍO  
FECHA: 2020  
PROF. GUÍA: RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

## **SIMULACIÓN NUMÉRICA DE IMPACTO Y ADHESIÓN DE PARTÍCULAS ESFÉRICAS**

Uno de los tipos de manufactura que se ha hecho popular recientemente es la manufactura aditiva, debido a su gran rapidez para obtener resultados. La proyección térmica es uno de los procesos más utilizados de manufactura aditiva, y consiste en la proyección de pequeñas partículas a altas velocidades hacia una superficie, logrando su adhesión. Existen distintos tipos de proyección térmica, dependiendo de las temperaturas y velocidades de impacto utilizadas, y se suelen utilizar principalmente para elaborar recubrimientos.

Cold Spray es un proceso de proyección térmica en el que las partículas son proyectadas a altas velocidades y a temperaturas menores que la temperatura de fusión de los materiales, por lo que impactan el sustrato en estado sólido antes de adherirse. Actualmente, los mecanismos de adhesión de las partículas en Cold Spray no se comprenden completamente, y su estudio es complicado debido al pequeño tamaño de las partículas involucradas.

La presente memoria consiste en el desarrollo de un modelo computacional que permita estudiar las deformaciones experimentadas por partículas y sustratos de diversos materiales a distintas velocidades de impacto a macro escala, con el objetivo de analizar la deformación resultante y sacar conclusiones sobre los mecanismos de adhesión presentes en la micro escala, y realizar posteriores comparaciones con resultados experimentales.

En primer lugar, se desarrolla un modelo para validación de resultados basándose en una publicación de carácter similar, para posteriormente desarrollar un modelo para evaluar el impacto de partículas esféricas. En particular, se evalúa el estiramiento superficial de partículas y sustratos, utilizando seis materiales distintos como partículas sobre un sustrato duro y un sustrato blando: Aluminio Al-1100-H12, Cobre, Nickel 200, Inconel 718, Ti-6Al-4V y Acero 316.

En los resultados se encontró que para todos los casos existen velocidades de impacto a partir de las cuales hay un incremento importante en el estiramiento superficial de la partícula y/o el sustrato, lo que se asocia a inestabilidades de corte adiabático generadas por las altas tasas de deformación alcanzadas durante los impactos. Adicionalmente, se observa entrelazamiento mecánico en algunos de los casos. Se identificó que se requiere un estiramiento superficial de 150-300 % en la partícula y/o sustrato para remover las capas superficiales de óxido y lograr la adhesión.

La excesiva deformación de elementos fue un problema en algunos casos. Esto podría solucionarse utilizando una malla de elementos más fina y modelando daño material para eliminar elementos excesivamente deformados.

*Dedicado a todas las personas que  
me han acompañado hasta hoy.*

# Agradecimientos

En primer lugar, agradecer al profesor Rubén y a los Rubensitos, ya que sin ellos y su apoyo este trabajo no habría sido posible (en especial a Bryan por descubrir ese error que me tuvo atascado semanas). Se agradece enormemente la buena onda.

A mi familia, especialmente a mis padres Mauricio Molina y Verónica Del Río por brindarme todas las herramientas que he necesitado para crecer y desarrollarme como persona, y la oportunidad de estudiar una carrera universitaria. Sin ellos y su apoyo no estaría ni cerca de donde estoy ahora. A mis hermanas y hermanos por ser cada uno un aporte importante a mi forma de ser y a mis intereses, los amo a pesar de nuestras diferencias.

A mis amigos del colegio Rorro, Mato, Benja y Dani-boy, por ser mi círculo más cercano y mi más grande apoyo emocional en las malas, y por hacer que las buenas sean tan frecuentes. Al tercermundista Christian P por mantener el contacto todos estos años a pesar de la distancia. Son mis hermanos y los amo.

A mis ratas de bachi Nacho Merino, Pablomoré, Francomi, Matilei y Barba, por los buenos tiempos que pasamos no estudiando, todos los tacas, los smash, y las borracheras en esos primeros años de universidad, y que han seguido en el tiempo a pesar de bajar la frecuencia. A la Fran y las Vales por ser parte de la alcantarilla, a pesar del tiempo les tengo un tremendo cariño. Un agradecimiento especial al Nacho por ser mi compañero más cercano durante todos estos años de universidad, son incontables las veces que me ayudaste en muchos ámbitos <3. También mencionar al grupo de los cucarachos Juanca, Richy, Aiyon, Pablito, Cornejo, Papin, Gabi, Bruno, Paula, Javi, Tomi y Rorro por los innumerables buenos ratos que hubieron a través de los años, por todos los cachos jugados después del almuerzo y en especial por ser una distracción semanal en el discord durante este difícil año. Sin ustedes la pandemia sería imposible.

Al grupete de mecánica Vale, Vicho, Jose y Raúl, por el tremendo apañe en todo lo académico y por todos esos almuerzos y sacadas de vuelta diarias. Al Stef y a Don Felipes por ser dos de las personas más inteligentes que conozco, y que me inspiran a ser mejor. A Bryan por ser un tremendo amigo y un aporte clave durante todo este trabajo, sin ti habría sido imposible! A la Tiare y al Negro por hacer de esas mañanas frías en el laboratorio un agrado. Y a todos los mecánicos, ojalá tuviera más espacio! Hay demasiadas personas bacanes en el departamento.

A la Carli por ser una tremenda compañera, por apoyarme a diario con todos mis sueños y metas, por apañar siempre en el carrete en el estudio, y por ayudarme a construir una relación sana desde el minuto uno. Me encanta que seas mi polola y te amo!

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes generales . . . . .	2
1.2. Motivación . . . . .	2
1.3. Objetivo general . . . . .	3
1.4. Objetivos específicos . . . . .	3
1.5. Alcances . . . . .	3
<b>2. Antecedentes específicos</b>	<b>4</b>
2.1. Cold Spray . . . . .	4
2.1.1. Velocidad crítica . . . . .	5
2.1.2. Mecanismos de adhesión . . . . .	6
2.2. Impacto de partículas . . . . .	8
2.3. Simulaciones numéricas . . . . .	8
2.3.1. Método de elementos finitos . . . . .	8
2.3.2. Mallado . . . . .	9
2.3.3. Modelos de plasticidad . . . . .	9
2.3.4. Distorsión de elementos . . . . .	10
<b>3. Metodología</b>	<b>11</b>
3.1. Selección de parámetros . . . . .	11
3.2. Validación . . . . .	11
3.3. Desarrollo de modelo para obtención de resultados . . . . .	12
3.3.1. Dimensiones . . . . .	12
3.3.2. Materiales . . . . .	13
3.3.3. Condiciones de borde . . . . .	14
3.3.4. Campos predefinidos . . . . .	14
3.3.5. Interacciones . . . . .	14
3.3.6. Tipo de elementos y control de distorsión . . . . .	15
3.3.7. Recopilación de datos . . . . .	16
3.4. Análisis y refinamiento de malla . . . . .	16
3.5. Obtención de resultados y post-procesamiento . . . . .	18
3.6. Análisis de resultados . . . . .	20
<b>4. Validación</b>	<b>21</b>
4.1. Artículo utilizado . . . . .	21
4.2. Modelo para validación . . . . .	21
4.2.1. Dimensiones y mallado . . . . .	21
4.2.2. Materiales . . . . .	22

4.2.3.	Condiciones de borde . . . . .	23
4.2.4.	Campos predefinidos . . . . .	23
4.2.5.	Interacciones . . . . .	23
4.2.6.	Tipo de elementos y control de distorsión . . . . .	23
4.3.	Resultados . . . . .	23
<b>5.</b>	<b>Resultados y análisis</b>	<b>26</b>
5.1.	Aluminio Al-1100-H12 . . . . .	26
5.1.1.	Sustrato duro . . . . .	26
5.1.2.	Sustrato blando . . . . .	29
5.2.	Cobre . . . . .	31
5.2.1.	Sustrato duro . . . . .	31
5.2.2.	Sustrato blando . . . . .	33
5.3.	Nickel 200 . . . . .	36
5.3.1.	Sustrato duro . . . . .	36
5.3.2.	Sustrato blando . . . . .	38
5.4.	Inconel 718 . . . . .	41
5.4.1.	Sustrato duro . . . . .	41
5.4.2.	Sustrato blando . . . . .	43
5.5.	Ti-6Al-4V . . . . .	46
5.5.1.	Sustrato duro . . . . .	46
5.5.2.	Sustrato blando . . . . .	48
5.6.	Acero 316 . . . . .	51
5.6.1.	Sustrato duro . . . . .	51
5.6.2.	Sustrato blando . . . . .	53
5.7.	Observaciones generales . . . . .	55
<b>6.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>59</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>60</b>

# Índice de Tablas

2.1.	Velocidades críticas para partículas de aluminio en distintos sustratos. [6] . . . .	6
3.1.	Propiedades usadas para los materiales.[12][17][18] . . . . .	13
3.2.	Parámetros para Johnson-Cook.[12][19][20][21][22] . . . . .	13
3.3.	Rangos de velocidad crítica para los materiales considerados. [15][16] . . . . .	13
3.4.	Coeficientes de fricción usados entre materiales. [23][24] . . . . .	15
4.1.	Parámetros utilizados para cobre. [12] . . . . .	22
4.2.	Parámetros para Johnson-Cook. [12] . . . . .	22
4.3.	Razón de compresión obtenida del modelo para validación. . . . .	23
5.1.	Resultados para Aluminio Al-1100-H12 sobre Acero 316. . . . .	26
5.2.	Resultados para Aluminio Al-1100-H12 sobre Al-1100-H12. . . . .	29
5.3.	Resultados para Cobre sobre Acero 316. . . . .	31
5.4.	Resultados para Cobre sobre Al-1100-H12. . . . .	33
5.5.	Resultados para Nickel 200 sobre Acero 316. . . . .	36
5.6.	Resultados para Nickel 200 sobre Aluminio Al-1100-H12. . . . .	38
5.7.	Resultados para Inconel 718 sobre Acero 316. . . . .	41
5.8.	Resultados para Inconel 718 sobre Al-1100-H12. . . . .	43
5.9.	Resultados para Ti-6Al-4V sobre Acero 316. . . . .	46
5.10.	Resultados para Ti-6Al-4V sobre Aluminio Al-1100-H12. . . . .	48
5.11.	Resultados para Acero 316 sobre Acero 316. . . . .	51
5.12.	Resultados para Acero 316 sobre Aluminio Al-1100-H12. . . . .	53
5.13.	Relaciones de durezas Brinell entre partículas y sustratos. . . . .	56

# Índice de Ilustraciones

2.1.	Proyección térmica en general. [1]	4
2.2.	Velocidades y temperaturas para distintas técnicas de proyección térmica. [4]	5
2.3.	Eficiencia en la adhesión según la velocidad de la partícula. [5]	6
2.4.	Tipos de deformación esperables en simulaciones numéricas según relación entre dureza de la partícula y el sustrato. [5]	7
3.1.	Metodología a seguir durante el desarrollo de la memoria.	11
3.2.	Ensamble de partícula y sustrato.	12
3.3.	Condiciones de borde.	14
3.4.	Opciones utilizadas para el tipo de elemento.	15
3.5.	Partícula con set de elementos P1 destacado.	16
3.6.	Tamaño de malla vs. Diferencia de PEEQ promedio normalizado.	17
3.7.	Mallado de partícula y sustrato.	17
3.8.	Gráfico típico de área de contacto en función el tiempo.	18
3.9.	Nodos de la partícula en contacto en el punto de máxima área de contacto.	19
3.10.	Mismos nodos de la Figura 3.9 previos al impacto.	19
4.1.	Comparación entre modelos.	22
4.2.	Comparación entre resultados para razón de compresión.	24
4.3.	Comparación entre resultados para PEEQ.	25
5.1.	Estiramiento Aluminio Al-1100-H12 sobre Acero 316.	27
5.2.	Impacto de Aluminio Al-1100-H12 sobre Acero 316.	28
5.3.	Separación entre elementos en la interfase. Aluminio Al-1100-H12 sobre Acero 316 a 700 (m/s).	28
5.4.	Estiramiento Aluminio Al-1100-H12 sobre Aluminio Al-1100-H12.	29
5.5.	Impacto de Aluminio Al-1100-H12 sobre Aluminio Al-1100-H12.	30
5.6.	Estiramiento Cobre sobre Acero 316.	31
5.7.	Impacto de Cobre sobre Acero 316 a 300 (m/s).	32
5.8.	Chorro de material formado a partir del sustrato.	32
5.9.	Estiramiento Cobre sobre Aluminio Al-1100-H12.	33
5.10.	Impacto de Cobre sobre Aluminio Al-1100-H12.	34
5.11.	Estiramiento Nickel 200 sobre Acero 316.	36
5.12.	PEEQ en impacto de Nickel 200 sobre Acero 316.	37
5.13.	Temperatura en impacto de Nickel 200 sobre Acero 316.	37
5.14.	Estiramiento Nickel 200 sobre Aluminio Al-1100-H12.	38
5.15.	Impacto de Nickel 200 sobre Aluminio Al-1100-H12 a 800 (m/s). Formación de chorro en el sustrato.	39
5.16.	Impacto de Nickel 200 sobre Aluminio Al-1100-H12.	39
5.17.	Estiramiento Inconel 718 sobre Acero 316.	41
5.18.	Impacto de Inconel 718 sobre Acero 316.	42

5.19.	Estiramiento Inconel 718 sobre Aluminio Al-1100-H12. . . . .	43
5.20.	Impacto de Inconel 718 sobre Aluminio Al-1100-H12. . . . .	44
5.21.	Estiramiento Ti-6Al-4V sobre Acero 316. . . . .	46
5.22.	Impacto de Ti-6Al-4V sobre Acero 316. . . . .	47
5.23.	Estiramiento Ti-6Al-4V sobre Aluminio Al-1100-H12. . . . .	48
5.24.	Impacto de Ti-6Al-4V sobre Aluminio Al-1100-H12. . . . .	49
5.25.	Deformación excesiva de elementos en el sustrato para el impacto de Ti-6Al-4V sobre Aluminio Al-1100-H12. . . . .	49
5.26.	Estiramiento Acero 316 sobre Acero 316. . . . .	51
5.27.	Impacto de Acero 316 sobre Acero 316. . . . .	52
5.28.	Estiramiento Acero 316 sobre Aluminio Al-1100-H12. . . . .	53
5.29.	Impacto de Acero 316 sobre Aluminio Al-1100-H12. . . . .	54
5.30.	Ejemplos de gráficos obtenidos para área total de contacto. . . . .	57
5.31.	Comparación del estiramiento de las partículas. . . . .	58

# Capítulo 1

## Introducción

En la actualidad, existen diversos procesos de manufactura que dan la posibilidad de utilizar distintos tipos de materiales según el resultado que se quiera obtener. Uno de estos procesos, que ha ganado una gran popularidad en los últimos años, es la manufactura aditiva.

Este proceso consiste en la deposición de finas capas de material que se superponen sobre un sustrato, lo que eventualmente da forma a la pieza final. Uno de los métodos más conocidos de manufactura aditiva que se utiliza actualmente es la impresión 3D, en el que se construye una pieza a partir de un modelo 3D desarrollado computacionalmente mediante la deposición de capas de distintos tipos de plástico fundido que se endurece al enfriarse.

También es posible llevar a cabo manufactura aditiva usando metales mediante la proyección térmica, en la cual pequeñas partículas son proyectadas hacia una superficie, logrando su adhesión. Las partículas pueden proyectarse a distintas temperaturas (sobre o bajo su temperatura de fusión) y velocidades, según el tipo de proyección térmica que se utiliza.

Cold Spray es una técnica de proyección térmica en la que las partículas son proyectadas a altas velocidades y bajas temperaturas, por lo que impactan el sustrato en estado sólido antes de adherirse. Los mecanismos físicos por los cuales estas partículas se adhieren luego del impacto no se conocen con certeza, debido a que el estudio *in situ* de estos tiene una alta complejidad asociada a la escala de los polvos utilizados (25  $\mu\text{m}$  aproximadamente).

Esta memoria consta de la simulación numérica de impactos de partículas más grandes (al rededor de 1 [mm] de diámetro), con el fin de estudiar la deformación que sufren estas partículas al impactar a altas velocidades contra un sustrato y así sacar conclusiones sobre los posibles mecanismos de adhesión.

## 1.1. Antecedentes generales

Cold Spray es un proceso de manufactura aditiva perteneciente a la categoría de proyección térmica. A diferencia de otros procesos de proyección térmica, en los que las partículas proyectadas se funden para lograr su adhesión a un material (sustrato), en Cold Spray las partículas son proyectadas por debajo de su temperatura de fusión, por lo que impactan el sustrato en estado sólido antes de adherirse. Esto permite obtener recubrimientos con propiedades mecánicas distintas a las que se obtendrían al utilizar otros métodos de proyección térmica.

En este proceso, se utilizan partículas de tamaño muy reducido (5-100 [ $\mu\text{m}$ ]) de diversos materiales, los que son acelerados a velocidades supersónicas mediante el uso de un flujo de gas a alta velocidad y presión que pasa a través de una boquilla convergente-divergente. [1] Actualmente, se piensa que la adhesión ocurre gracias a una unión metalúrgica entre sustrato y partícula luego de la remoción de la capa de óxido superficial, y a un entrelazamiento mecánico, ambos debido a la deformación por el impacto en la interfase sustrato-partícula. [2][3]

## 1.2. Motivación

Esta memoria tiene como motivación el estudio de la deformación de partículas y sustratos durante el impacto a altas velocidades, con el fin de analizar de una forma macroscópica los fenómenos físicos que permiten la adhesión de las partículas a los sustratos luego del impacto. El estudio *in situ* es muy difícil por la dificultad para controlar los factores que influyen en la deposición en partículas micrométricas (como velocidad, tamaño, forma y condición superficial de las partículas). En contraste, el uso de partículas más grandes permite un mayor control sobre estos factores y podría contribuir a comprender de mejor manera la deposición de partículas en Cold Spray.

### 1.3. Objetivo general

Simular numéricamente el impacto de partículas de diversos materiales a altas velocidades sobre sustratos y analizar la deformación resultante.

### 1.4. Objetivos específicos

- Desarrollar modelo para validación de resultados.
- Definir materiales y velocidades para las simulaciones de los impactos de partículas.
- Desarrollar modelo de impacto de una partícula para obtención de resultados.
- Realizar análisis de refinamiento de malla.
- Simular impactos variando velocidad de las partículas y material de la partícula y el sustrato.
- Analizar deformación resultante y comparar entre configuraciones.
- Evaluar relación entre comportamiento macro y micro métrico.

### 1.5. Alcances

Los alcances de este trabajo incluyen la creación de un modelo computacional para la evaluación de resultados, junto con las simulaciones, considerando dos materiales distintos para los sustratos (uno duro y uno blando) y 6 materiales distintos para las partículas, utilizando velocidades de impacto entre 100 y 1000 [m/s].

Se espera obtener resultados tanto cualitativos como cuantitativos de la deformación durante el proceso de impacto de las partículas.

# Capítulo 2

## Antecedentes específicos

### 2.1. Cold Spray

El proceso de Cold Spray es una técnica de manufactura basada en la deposición de material. En este proceso, pequeñas partículas de metales en polvo son lanzadas a velocidades supersónicas hacia algún material (sustrato), provocando una unión entre el sustrato y el material y formando un revestimiento. Los polvos utilizados tienen tamaños de partícula entre los 5 y los 100  $\mu\text{m}$ , y se puede usar una gran variedad de materiales según los requerimientos, incluso siendo posible la mezcla de distintos polvos para crear aleaciones. Estos polvos son acelerados mediante el uso de un flujo de gas a alta velocidad y presión a través de una boquilla convergente-divergente. [1]

Aunque el proceso de Cold Spray tiene bastantes similitudes con otros procesos de proyección térmica, también presenta importantes diferencias que lo presentan como una mejor opción dependiendo de los resultados que se quieran obtener. En general, los procesos de proyección térmica consisten en lo siguiente: se utiliza energía para crear pequeñas gotas de material fundido o semi fundido, las que son lanzadas hacia una pieza de trabajo a grandes velocidades mediante el uso de un flujo de gas. Estas gotas impactan con la pieza de manera aleatoria y se enfrían rápidamente, quedando unidas y formando capas que eventualmente componen el revestimiento. [1]

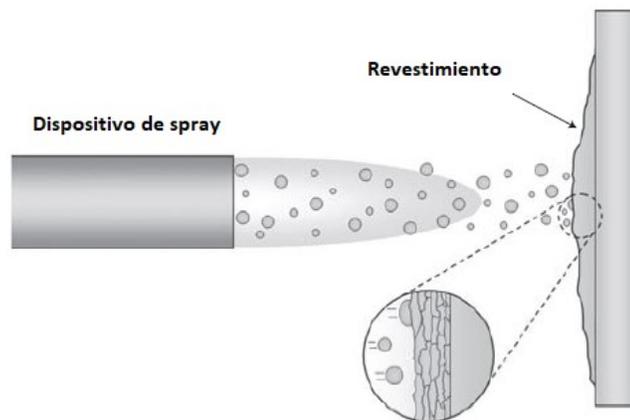


Figura 2.1: Proyección térmica en general. [1]

Lo que diferencia al proceso de Cold Spray de los demás procesos de proyección térmica, es que el gas no se calienta para derretir las partículas. En Cold Spray, el gas es calentado para aumentar su velocidad, y así tener mayores velocidades de eyección de las partículas. El gas se enfría rápidamente al pasar por la parte divergente de la boquilla, haciendo que disminuya su temperatura significativamente. Esto implica que las partículas impactan la superficie de trabajo a una temperatura mucho más baja que su temperatura de fusión, en estado sólido. Si las partículas impactan la superficie con la suficiente velocidad, entonces quedan adheridas y forman el revestimiento.

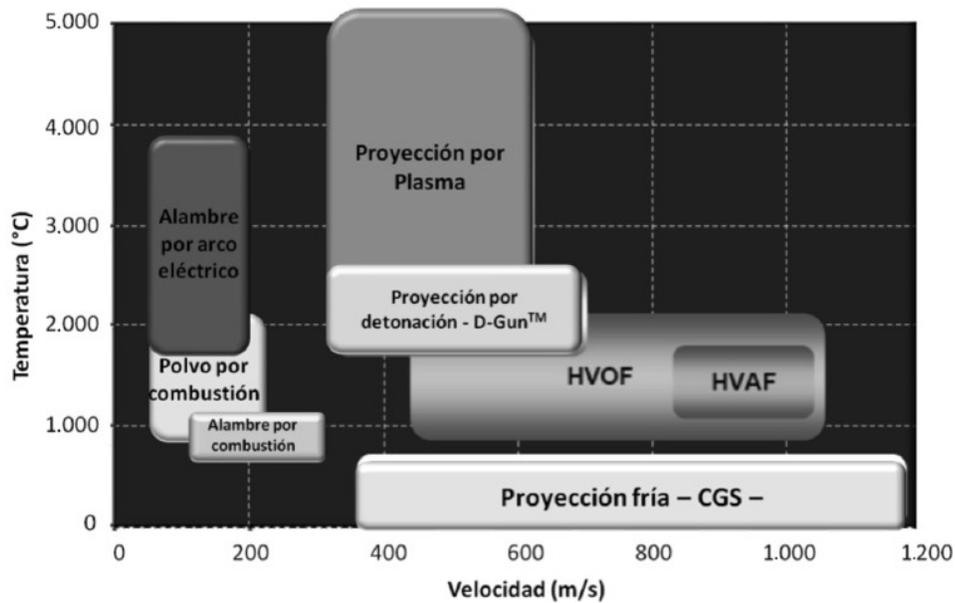


Figura 2.2: Velocidades y temperaturas para distintas técnicas de proyección térmica. [4]

### 2.1.1. Velocidad crítica

La velocidad crítica  $V_{crit}$  es la velocidad mínima que deben alcanzar las partículas antes de impactar el sustrato para poder adherirse. Si la velocidad de la partícula es menor a  $V_{crit}$  al momento de impactar al sustrato, entonces rebotará sin adherirse o causará abrasión en la superficie, mientras que si es mayor a  $V_{crit}$ , quedará adherida. Esto puede verse en la siguiente figura:

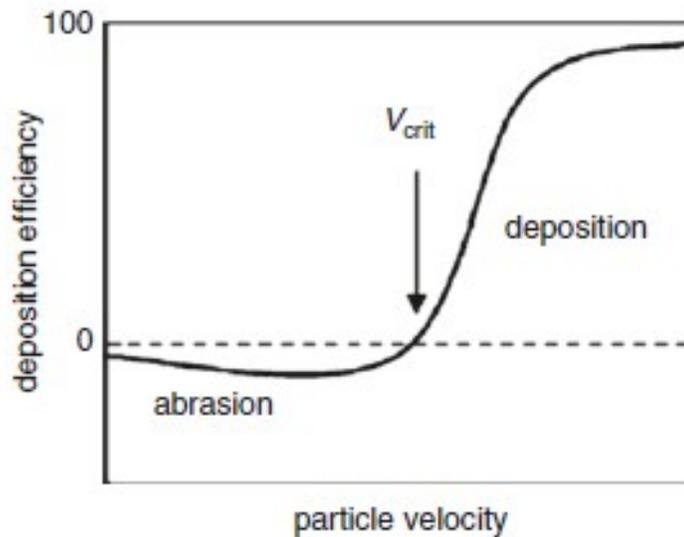


Figura 2.3: Eficiencia en la adhesión según la velocidad de la partícula. [5]

La velocidad crítica depende de varios factores: el tipo de material de los polvos y el sustrato, el tamaño de la partícula, temperatura, presión y la removabilidad de la capa de óxido natural de las partículas [6]. La eficiencia de la deposición aumenta a medida que aumenta la velocidad para valores sobre la velocidad crítica [7]. Además, se sabe que partículas pequeñas se pueden acelerar a velocidades mayores que partículas más grandes [10], por lo que se hace más fácil alcanzar la velocidad crítica y lograr una mayor eficiencia en la adhesión al usar partículas de menor tamaño. Sin embargo, existe evidencia de que la velocidad crítica es independiente del tamaño de las partículas [8]. También debe señalarse que la velocidad crítica varía ampliamente dependiendo del contenido de oxígeno de las partículas y del ángulo de incidencia [8]. A continuación, se presenta una tabla con valores de velocidad crítica para partículas de aluminio de 1 [mm] de diámetro al impactar con diferentes sustratos, con el objetivo de ejemplificar el orden de magnitud de estos valores:

Tabla 2.1: Velocidades críticas para partículas de aluminio en distintos sustratos. [6]

Material del sustrato	Velocidad crítica [m/s]
Ni	296
Cu	301
Al	353
Acero	432
Ti	500

### 2.1.2. Mecanismos de adhesión

En la actualidad, los mecanismos de adhesión en el proceso de Cold Spray no se comprenden en su totalidad, aunque existen algunas propuestas validadas a través de simulaciones y experimentos. El primero de estos mecanismos consiste en lo siguiente: durante el impacto,

las interfaces partícula-partícula y sustrato-partícula sufren deformaciones por esfuerzos de corte muy localizadas, lo que provoca que se remueva la fina capa de óxido de las partículas y permite un fuerte contacto entre sustrato y partícula. Estas altas deformaciones están ligadas a la rápida deformación que sufren las superficies durante el impacto, asociadas a inestabilidades de corte adiabáticas [9] Este fenómeno, junto con los elevados esfuerzos de compresión durante el impacto, permiten la adhesión [2]. Sin embargo, este mecanismo no es necesario para que exista adhesión de las partículas [5].

Otro mecanismo propuesto es el de entrelazamiento mecánico. En este, el impacto de las partículas sobre el sustrato provoca una deformación plástica que permite la formación de aletas en el sustrato, las que luego envuelven a la partícula, lo que provoca que sustrato y partícula queden entrelazados mecánicamente [3].

Los mecanismos de adhesión predominantes dependen de los parámetros utilizados y, en especial, de la relación entre las durezas de la partícula y el sustrato. A continuación, se presenta una figura con los distintos tipos de resultados que se pueden esperar en simulaciones numéricas dependiendo de la dureza del sustrato y de la partícula.

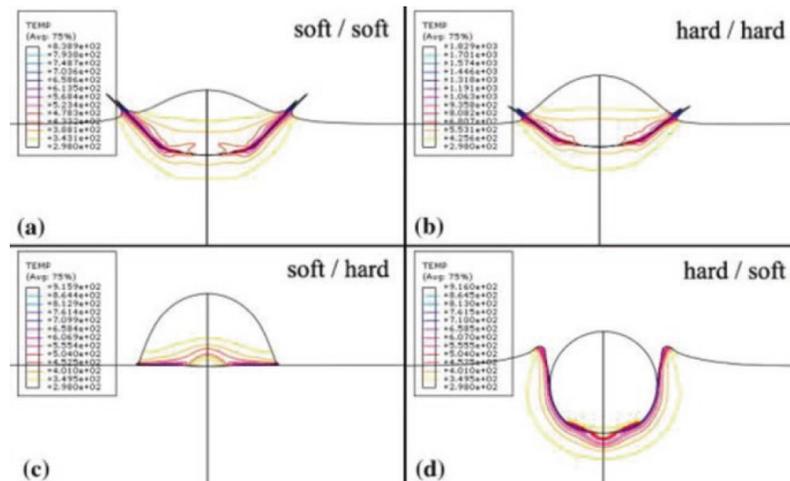


Figura 2.4: Tipos de deformación esperables en simulaciones numéricas según relación entre dureza de la partícula y el sustrato. [5]

## 2.2. Impacto de partículas

Como fue mencionado en la sección anterior, en Cold Spray se utilizan partículas con tamaños que van desde los 5 a los 100 [ $\mu\text{m}$ ]. El reducido tamaño de estas partículas se traduce en una gran dificultad para evaluar experimentalmente los factores que influyen en su deposición, ya que es complicado controlar su velocidad, tamaño, forma y condición superficial. [6]

Sin embargo, es posible medir estos factores y evaluar sus efectos al utilizar partículas de mayor tamaño. Adicionalmente, es posible evaluar el efecto que tiene el tamaño de las partículas sobre su deposición. De esta forma, evaluar la deposición de partículas de mayor tamaño bajo factores bien definidos puede ser un aporte significativo a comprender los mecanismos de adherencia de las partículas más pequeñas utilizadas en Cold Spray. [6]

Se han realizado estudios experimentales de este tipo, impactando partículas de 1 [mm] [6] y 20 [mm] [9] de diámetro en condiciones normales. En particular, se ha encontrado que la velocidad crítica para lograr la adherencia de partículas disminuye al aumentar su tamaño, lo que puede estar ligado a distintos factores dependiendo de los materiales utilizados, como la conducción de calor o el endurecimiento por tasa de deformación. [9]

## 2.3. Simulaciones numéricas

En la actualidad, existen muchos problemas de ingeniería mecánica cuyo estudio resulta complejo, debido a la gran cantidad de variables que presentan. Un ejemplo de estos problemas, es el cálculo de esfuerzos y desplazamientos de un sistema mecánico sometido a distintas fuerzas y condiciones, en especial para casos en que se tiene cuerpos de geometría compleja.

En el caso particular de Cold Spray, se utilizan polvos de tamaño microscópico (entre 5 y 100 [ $\mu\text{m}$ ] de diámetro). Debido a este tamaño, se hace muy difícil el estudio de los fenómenos de deformación y propagación de esfuerzos en las partículas utilizadas, por lo que es necesario recurrir a herramientas que permitan estudiar estos fenómenos de manera efectiva, y una de estas herramientas corresponde al método de elementos finitos.

### 2.3.1. Método de elementos finitos

El método de elementos finitos corresponde a una técnica de simulación numérica que permite representar un sistema como un conjunto de elementos discretos relacionados entre sí, sujetos a las leyes de la física [11].

Utilizando el método de los elementos finitos, es posible plantear una serie de ecuaciones diferenciales que relacionan estos elementos entre sí y resolverlas usando un computador, todo esto con la ayuda de un software de análisis de elementos finitos, como Abaqus, ADINA, ANSYS y similares. Estos softwares permiten la definición de varios parámetros y modelos para la descripción de un problema mecánico, como propiedades de los materiales, tipos de interacción entre cuerpos, condiciones de borde y condiciones iniciales del sistema, entre otros.

Los problemas que se solucionan con este método pueden separarse en dos tipos de análisis: implícito y explícito. En un análisis implícito, se resuelve una ecuación que involucra el estado actual y el posterior de un sistema simultáneamente, mientras que en el análisis explícito, el estado actual del sistema se deriva directamente a partir del estado inmediatamente anterior. Debido a estas diferencias, el análisis implícito es más estable que el explícito, pero tiene un mayor costo computacional. En contraste, el análisis explícito es más inestable pero más rápido, lo que puede resultar conveniente si se utilizan pasos de tiempo pequeños que permiten minimizar los errores. De cualquier manera, el tipo de análisis utilizado depende totalmente del tipo de problema a resolver.

### 2.3.2. Mallado

El mallado o la generación de malla, corresponde al proceso de creación de una malla. Una malla es la división de un cuerpo o espacio geométrico en cuerpos o espacios discretos, con el objetivo de tener una aproximación de la geometría original. Una buena malla describe precisamente una geometría con elementos de forma adecuada, y con tamaños lo suficientemente finos como para asemejarse a la realidad. [11]

Existen distintos tipos de malla dependiendo del tipo de elemento que se utiliza, y que se adecúan a distintos tipos de problemas. La principal distinción que puede hacerse es entre elementos bidimensionales y tridimensionales, los cuales pueden ser rectangulares o triangulares. Los elementos bidimensionales son más simples y en general permiten tiempos de cálculo menores, por lo que resultan muy útiles si los problemas a resolver pueden simplificarse a un modelo 2D. [11]

La calidad y precisión de los resultados obtenidos por simulaciones numéricas depende directamente de la calidad del mallado, ya que un mallado más fino resulta generalmente en resultados más cercanos a la realidad. Es por esto que es necesario realizar estudios de convergencia de mallado, en los que se evalúa la convergencia de un resultado del modelo a medida que se refina la malla (se usan elementos cada vez más pequeños). [11]

### 2.3.3. Modelos de plasticidad

Durante el proceso de impacto de partículas, se producen deformaciones muy altas de los materiales a una tasa muy elevada, lo que además se traduce en aumentos de temperatura. Debido a esto, es necesario utilizar un modelo de plasticidad que tome en cuenta los efectos de estos fenómenos, ya que una curva de esfuerzo-deformación no logra ser suficiente.

Uno de estos modelos corresponde al modelo de plasticidad de Johnson-Cook. Este modelo se basa en datos empíricos para la creación de una ecuación para el esfuerzo de flujo de von Mises que toma en cuenta los efectos del ablandamiento térmico, endurecimiento por deformación y por tasa de deformación. [19]

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n][1 + C \ln(\dot{\varepsilon}^*)][1 - (T^*)^m] \quad (2.1)$$

En la Ecuación 2.1,  $A$ ,  $B$ ,  $n$  y  $m$  son constantes que dependen del material,  $\varepsilon$  corresponde a la deformación plástica equivalente (PEEQ),  $\dot{\varepsilon}^*$  es la tasa de deformación plástica equivalente,

normalizada con respecto a una tasa de deformación referencial ( $\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ ), y  $T^*$  es la temperatura homóloga, definida de la siguiente forma, donde  $T_m$  es la temperatura de fusión y  $T_r$  es la temperatura de referencia. [19]

$$T^* = \begin{cases} 0 & \text{para } T < T_r \\ (T - T_r)/(T_m - T_r) & \text{para } T_r \leq T \leq T_m \\ 1 & \text{para } T > T_m \end{cases} \quad (2.2)$$

En la Ecuación 2.1, la expresión dentro del primer par de corchetes entrega el esfuerzo en función de la deformación. La expresión del segundo par de corchetes representa los efectos de la velocidad con que se deforma el material, mientras que la última expresión toma en cuenta los efectos de la temperatura. Este modelo es ampliamente utilizado para simulaciones de impacto en las que se tienen altas tasas de deformación, y permite obtener resultados muy similares a los resultados empíricos. [12] [13]

### 2.3.4. Distorsión de elementos

Durante las simulaciones numéricas los elementos que componen la malla sufren deformaciones, ya que están expuestos a distintos esfuerzos. Sin embargo, en ocasiones, esta deformación puede ser excesiva, y mostrar algunos patrones que no son realistas, lo que puede llevar a resultados erróneos. Por este motivo, existen técnicas de control de distorsión que pueden ser aplicadas a los modelos con el objetivo de obtener mejores resultados.

Una de estas técnicas es conocida como "Hourglass Control". El Hourglass es un tipo de deformación no física con energía nula que puede darse en los elementos de una malla, especialmente cuando se usan elementos de integración reducida. Cuando ocurre, se obtienen resultados no reales, por lo que es necesario controlar este fenómeno. [14]

# Capítulo 3

## Metodología

La metodología a utilizar en esta memoria se resume en el siguiente diagrama:

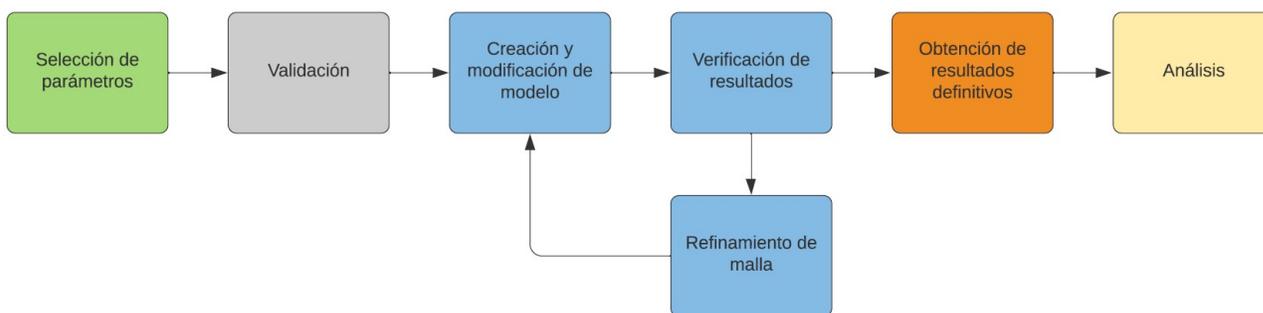


Figura 3.1: Metodología a seguir durante el desarrollo de la memoria.

### 3.1. Selección de parámetros

El primer paso es la selección de los parámetros que se variarán durante las simulaciones para la obtención de resultados, y los parámetros que se mantendrán fijos. En particular, el tamaño de la partícula y el sustrato se mantendrán fijos a través de todas las simulaciones. La partícula tendrá forma esférica, con un diámetro de 1 [mm], mientras que el sustrato tendrá forma cilíndrica con un radio y altura de 5 [mm].

Los parámetros que variarán son las velocidades de impacto de la partícula, y los materiales de la partícula y el sustrato. Esta combinación de parámetros fijos y variables permitirá realizar un análisis significativo de los distintos tipos de deformación que podrán observarse como resultado de los impactos.

### 3.2. Validación

Antes de desarrollar el modelo que se utilizará para las simulaciones, es necesario desarrollar un modelo que sirva como validación de los resultados que se obtendrán en esta memoria. Se validará contra un artículo titulado "Some aspects on 3D numerical modeling of high velocity impact of particles in cold spraying by explicit finite element analysis", en el que se

realizan varias simulaciones de impactos de partículas variando distintas configuraciones en el software Abaqus/Explicit y evaluando su influencia en los resultados obtenidos. El desarrollo de este modelo es explicado en detalle en el capítulo 4.

### 3.3. Desarrollo de modelo para obtención de resultados

Para poder obtener resultados que se asemejen a la realidad, se deben seleccionar cuidadosamente los parámetros que se utilizarán en las simulaciones. Debido a las características del problema, el software utilizado para la creación de este modelo es Abaqus/Explicit. En esta sección, se especifican las opciones elegidas para el modelo.

#### 3.3.1. Dimensiones

En primer lugar se especifican las dimensiones utilizadas para la creación de los cuerpos involucrados en la simulación. Para la partícula, se considera una esfera con un diámetro de 1 [mm]. Para el sustrato, se considera un cilindro con un radio de 5 [mm] y una altura de 5 [mm]. Para reducir el costo computacional del modelo, y tomando en cuenta el carácter de simetría axial del problema, se utilizan partes axisimétricas. En la figura 3.2 se puede ver el ensamble de estas partes.

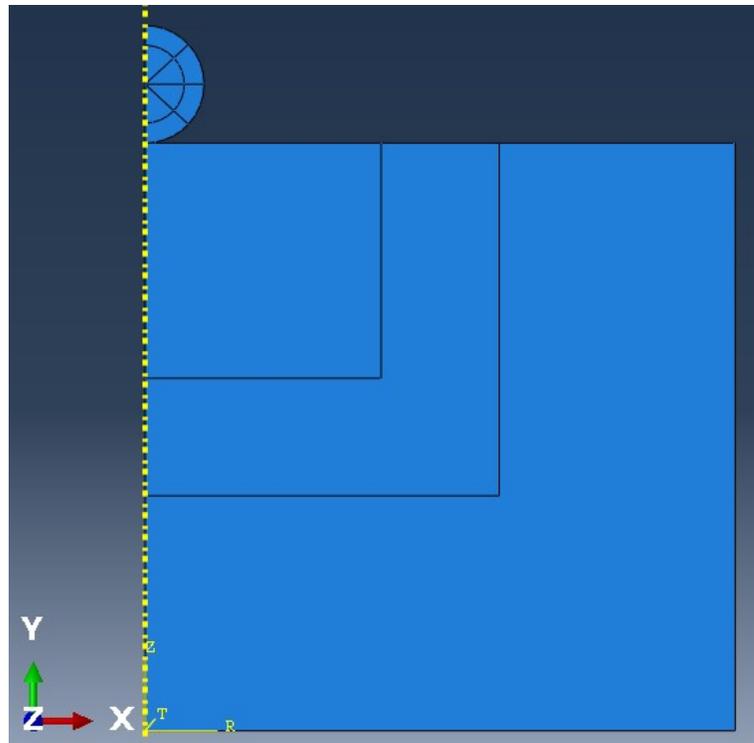


Figura 3.2: Ensamble de partícula y sustrato.

Como puede verse en la figura 3.2, tanto la partícula como el sustrato presentan divisiones de su geometría. En el caso del sustrato, la división se realiza con el objetivo de tener un mayor control sobre el tamaño de malla y el tipo de elemento de cada sección. De esta manera, es posible refinar la malla de la sección que está en contacto con la partícula, lo que permite ahorrar el gran costo computacional que significaría el refinar la malla completa. De manera

similar, la partícula presenta divisiones que permiten la creación de sets de elementos, los cuales permiten analizar resultados de ciertas regiones de esta (algo que resulta útil durante el proceso de análisis y refinamiento de malla). También se puede observar la simetría respecto al eje y.

### 3.3.2. Materiales

Para este modelo se consideran 6 materiales diferentes: Acero 316, Al-1100-H12, Cobre, Inconel 718, Nickel 200 y Ti-6Al-4V. Todos estos materiales son usados para la partícula, pero solo el Al-1100-H12 el Acero 316 son utilizados para el sustrato. Para cada uno, se especifica conductividad térmica, densidad, módulo de Young, coeficiente de Poisson, calor específico y dureza Brinell. Además, se utiliza el modelo de Johnson-Cook para modelar la plasticidad, especificando también los parámetros necesarios. En las tablas siguientes se especifican los parámetros utilizados para cada material, junto con los rangos de velocidad crítica experimental encontrados en la bibliografía.

Tabla 3.1: Propiedades usadas para los materiales.[12][17][18]

	Al-1100-H12	Acero 316	Cobre	Nickel 200	Inconel 718	Ti-6Al-4V
Cond. [mW/mm <sup>2</sup> K]	220	16.3	386	70.2	11.4	7.3
Densidad [ton/mm <sup>3</sup> ]	2.7e-9	80.7e-9	8.96e-9	8.89e-9	8.2e-9	4.51e-9
M. Young [MPa]	65762	205000	124000	210000	200000	119000
E. Fluencia [MPa]	75	290	330	148	1034	828
Poisson	0.3	0.275	0.34	0.3	0.29	0.37
C. Esp. [mJ/ton <sup>2</sup> K]	920e6	530e6	383e6	446e6	435e6	570e6
Dureza Brinell	28	149	89	100	329	334

Tabla 3.2: Parámetros para Johnson-Cook.[12][19][20][21][22]

	A [MPa]	B [MPa]	n	C	m	Melt [°K]
Al-1100-H12	148.316	345.513	0.183	0.001	0.859	893
Cobre	90	292	0.31	0.025	1.09	1356
Nickel 200	163	648	0.33	0.006	1.44	1726
Acero 316	305	1161	0.61	0.01	0.517	1673
Inconel 718	860	1100	0.5	0.0082	1.05	1533
Ti-6Al-4V	1098	1092	0.93	0.014	1.1	1933

Tabla 3.3: Rangos de velocidad crítica para los materiales considerados.  
[15][16]

Material	Velocidad crítica [m/s]
Al-1100-H12	620 - 660
Cu	460 - 500
Ni 200	610 - 680
Inconel 718	700 - 800
Ti-6Al-4V	700 - 890
Acero 316	700 - 750

Estos materiales son asignados a las partes mediante la creación de secciones homogéneas, las que posteriormente son asignadas a cada cuerpo.

### 3.3.3. Condiciones de borde

Es necesario definir condiciones de borde adecuadas para que el modelo describa correctamente la realidad. Sobre el sustrato se plantean dos condiciones de borde: la primera es de tipo empotramiento a lo largo del borde inferior ( $U1 = U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0$ ), y la segunda es de simetría a lo largo del eje central ( $U1 = UR2 = UR3 = 0$ ). Estas condiciones de borde pueden observarse gráficamente en la figura 3.3.

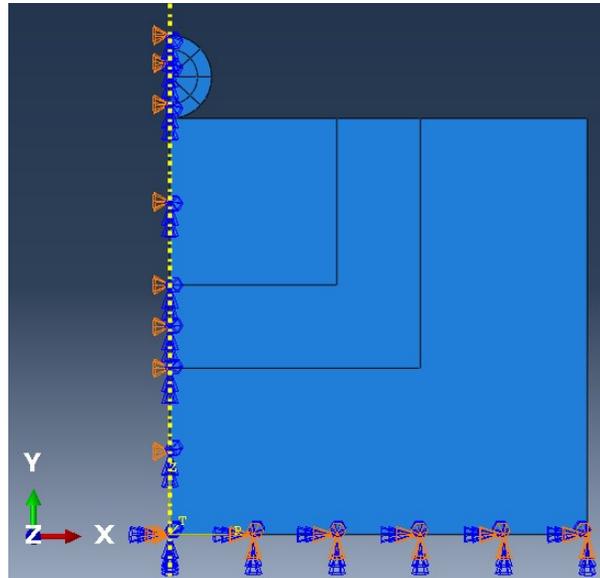


Figura 3.3: Condiciones de borde.

### 3.3.4. Campos predefinidos

Estos corresponden a las condiciones iniciales de temperatura y velocidad de las partes. Para este modelo, se considera que tanto la partícula como el sustrato se encuentran a una temperatura de 20 [°C] (293 [°K]), ya que se busca emular las condiciones normales de estudios experimentales, y los resultados de esta memoria serán eventualmente comparados con resultados experimentales en estas condiciones. La velocidad inicial de la partícula se varía entre 100 y 1000 [m/s] en intervalos de 100 [m/s], por lo que se tiene un total de 10 simulaciones para cada par partícula - sustrato.

### 3.3.5. Interacciones

Se deben definir interacciones entre las distintas partes del modelo para que puedan interactuar entre sí (en este caso, que la partícula pueda impactar con el sustrato). Se definen algunas características comunes para todas las interacciones entre ambas partes, como la generación de calor y el que se permita la separación de los elementos después del contacto.

Respecto a la generación de calor, se supone que un 100% de la energía disipada por

fricción es liberada como calor [12], mientras que un 50% de este calor es transferido a la superficie esclava.

Pasando a la fricción, se consideran distintos coeficientes de fricción cinética dependiendo de cual es el par de materiales que está interactuando. Debe mencionarse que, debido a la falta de referencias para algunos casos, se usa un valor del coeficiente de fricción igual a 0,5, con el objetivo de evitar subestimar el efecto que tiene la fricción en el impacto.

Tabla 3.4: Coeficientes de fricción usados entre materiales. [23][24]

	Al-1100-H12	Acero 316	Cu	Nickel 200	Inconel 718	Ti-6Al-4V
Al-1100-H12	0.34	0.25	0.23	0.5	0.5	0.29
Acero 316	0.25	0.23	0.21	0.31	0.5	0.31

El tipo de contacto se define como "Surface-to-Surface contact (Explicit)", seleccionando la superficie exterior de la partícula como superficie maestra y la superficie del sustrato como superficie esclava. Adicionalmente, se crea este mismo tipo de interacción para la partícula consigo misma y el sustrato con sí mismo, con el objetivo de evitar problemas ligados a la deformación excesiva.

### 3.3.6. Tipo de elementos y control de distorsión

Debido a las altas deformaciones y tasas de deformación que se tienen durante el proceso de impacto, es necesario usar las opciones de control de distorsión que ofrece Abaqus/Explicit para evitar que las simulaciones fallen por la excesiva deformación de los elementos. Los elementos utilizados para el mallado son del tipo CAX4RT: elementos axisimétricos de 4 nodos con desplazamiento y temperatura bilineales, integración reducida y control de Hourglass.

Como puede apreciarse en la figura 3.4, se utilizan las opciones de control de distorsión con una razón de largo de 0,1, y un control de Hourglass de tipo Stiffness.

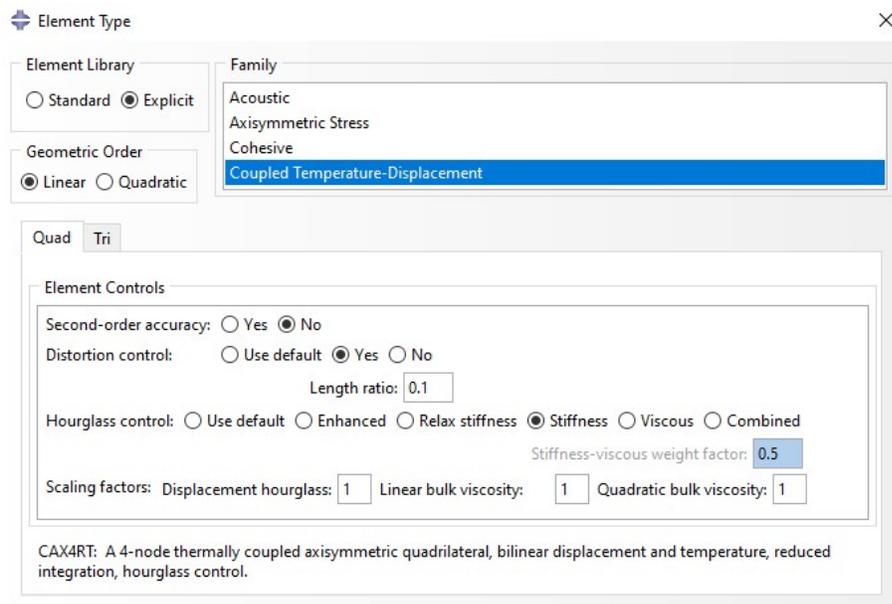


Figura 3.4: Opciones utilizadas para el tipo de elemento.

### 3.3.7. Recopilación de datos

Se deben definir los datos que se recopilan de cada simulación, y cuántos puntos de recopilación de datos se tienen. Se define un tiempo de simulación de  $4e-6$  segundos, lo que basta para observar todo el proceso de impacto y separación de la partícula en todos los casos. Este tiempo se divide en 200 cuadros, recopilando datos de posición, desplazamiento, temperatura, esfuerzo y deformación de todos los elementos y nodos. Adicionalmente, se recopila información del área de contacto total entre las superficies de la partícula y el sustrato.

## 3.4. Análisis y refinamiento de malla

Al resolver problemas usando el modelo de elementos finitos, generalmente se obtienen resultados más precisos al utilizar una malla más refinada. Sin embargo, una malla más refinada se traduce en elementos más pequeños, lo que implica un aumento del número de elementos necesarios para describir el problema. Por lo tanto, no es posible refinar la malla indefinidamente, ya que se incrementa considerablemente el costo computacional del modelo, aumentando los tiempos de cálculo. De esta manera, se presenta el problema de decidir el tamaño de malla óptimo que permita obtener los resultados más precisos posibles sin elevar demasiado los tiempos de cálculo.

Es debido a esto que es necesario realizar un estudio de convergencia de malla. Esto consiste en seleccionar una serie de parámetros entre los resultados del modelo y compararlos entre sí a medida que se reduce el tamaño de malla. De esta forma, el tamaño de malla óptimo se decide al ver que los resultados convergen a un valor determinado.

Para este caso, se analiza el PEEQ (deformación plástica equivalente) promedio de un set de elementos de la partícula con el nombre P1, el cual se puede ver resaltado en la figura 3.5.

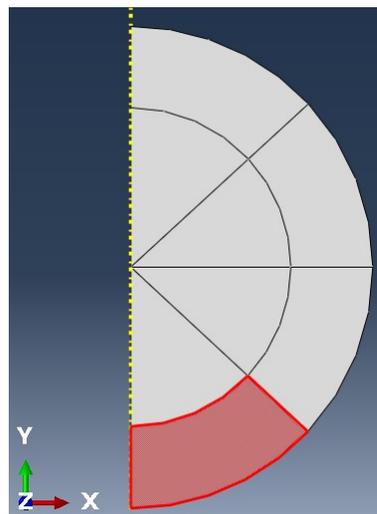


Figura 3.5: Partícula con set de elementos P1 destacado.

Como parámetros para el análisis, se utiliza como material cobre tanto para la partícula como para el sustrato. La velocidad de impacto se fija en  $300$  [m/s] y el coeficiente de fricción utilizado es  $0,2$ . El tamaño del mallado de la partícula y de la zona de impacto del sustrato

varían empezando en 0,1 y bajando hasta 0,01, con intervalos de 0,01. De esta forma, se obtiene el siguiente gráfico para la diferencia de PEEQ promedio del set P1 normalizado en función del tamaño de malla.

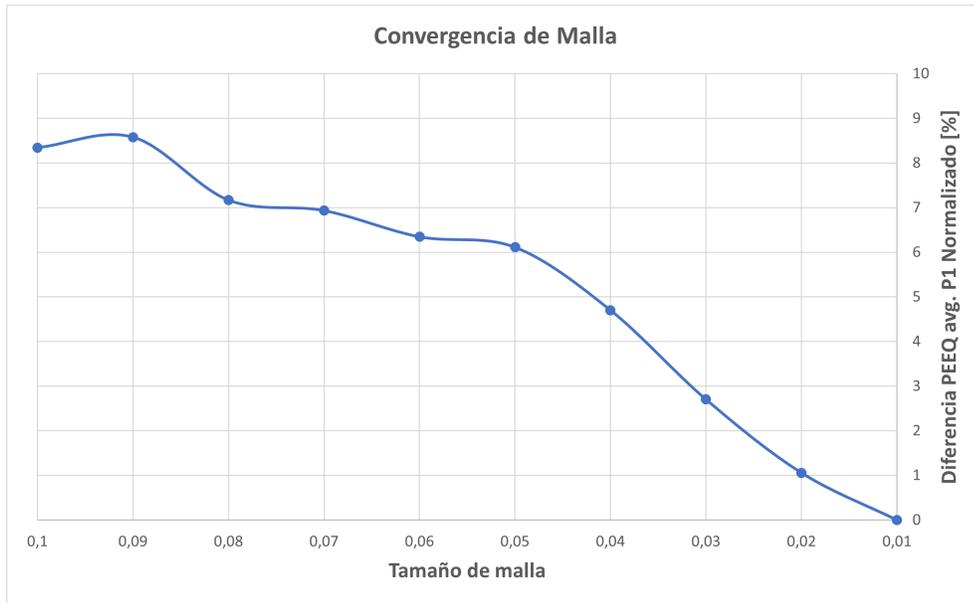


Figura 3.6: Tamaño de malla vs. Diferencia de PEEQ promedio normalizado.

En la figura 3.6, se puede observar que, a medida que decrece el tamaño de malla, la diferencia del PEEQ promedio normalizado en P1 decrece. Basado en este gráfico, el tamaño de malla para el modelo se establece en 0,02, ya que una disminución a 0,01 proporciona una diferencia en los resultados de aproximadamente un 1% y eleva los tiempos de cálculo considerablemente. El tamaño de malla final puede observarse en las Figuras 3.7 y (a) y (b).

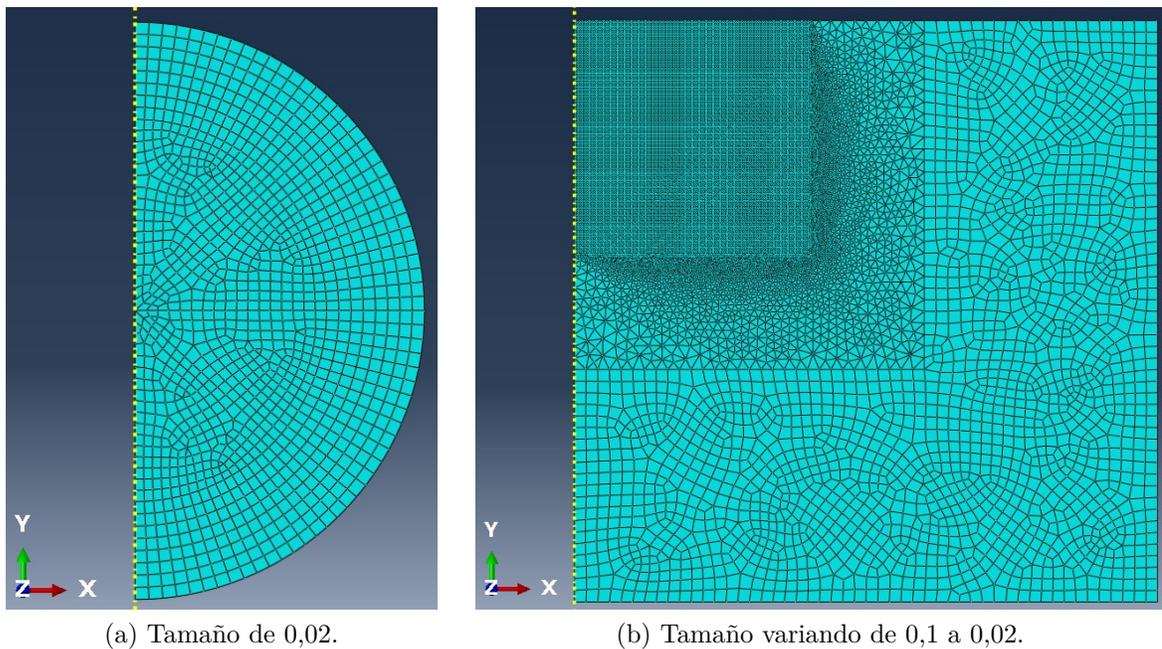


Figura 3.7: Mallado de partícula y sustrato.

### 3.5. Obtención de resultados y post-procesamiento

Una vez definido el modelo y el tamaño de malla adecuado, se puede proceder a la obtención de resultados de la memoria. Para esto, se ejecutan las simulaciones para cada configuración establecida. Los seis materiales descritos en la sección 3.3.2 son utilizados para la partícula, mientras que sólo dos (Al-1100-H12 y Acero 316) son utilizados para el sustrato, con el objetivo de tener resultados de impacto de partículas sobre una superficie blanda y otra más dura. Para cada combinación de materiales se ejecutan 10 simulaciones, variando la velocidad del impacto desde 100 hasta 1000 [m/s] en intervalos de 100 [m/s], por lo que se tiene un total de 120 simulaciones.

Una vez obtenidos los resultados, es necesario hacer el post-procesamiento de estos. A continuación, se detalla el proceso de post-procesamiento que se utiliza para todas las simulaciones.

En primer lugar, se grafica el área total de contacto entre las superficies de la partícula y el sustrato utilizando las herramientas de Abaqus/Explicit, con lo que se obtiene un gráfico como el siguiente:

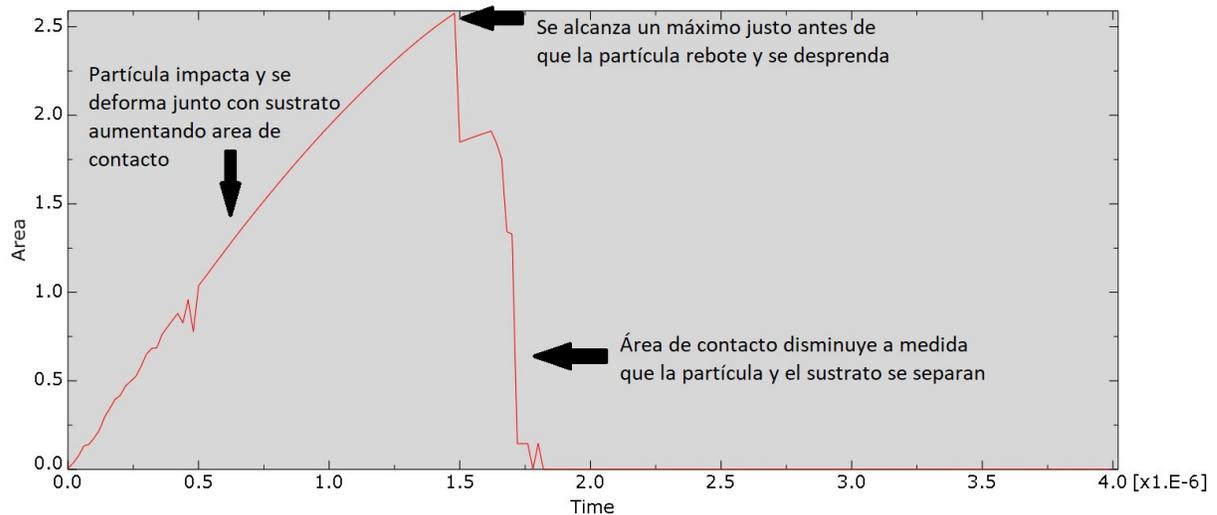


Figura 3.8: Gráfico típico de área de contacto en función el tiempo.

En este gráfico se busca el punto en el que el área de contacto es mayor y se identifica el cuadro exacto en el que se encuentra, ya que corresponde al momento en el que la partícula comienza a separarse del sustrato debido al rebote. En el caso de la figura 3.8, este instante corresponde al cuadro número 75.

Una vez identificado el cuadro con la mayor área de contacto, se utilizan las herramientas de Abaqus/Explicit para determinar el último nodo que se encuentra en contacto entre la partícula y el sustrato. De esta forma, es posible calcular el área superficial de la partícula y del sustrato previo al impacto mediante la determinación de la distancia entre estos puntos. Posteriormente, se puede determinar el porcentaje de estiramiento que sufren ambas superficies al comparar el área calculada con el área de contacto de la figura 3.8. En las figuras 3.9 y 3.10 se puede ver un ejemplo gráfico de este procedimiento.

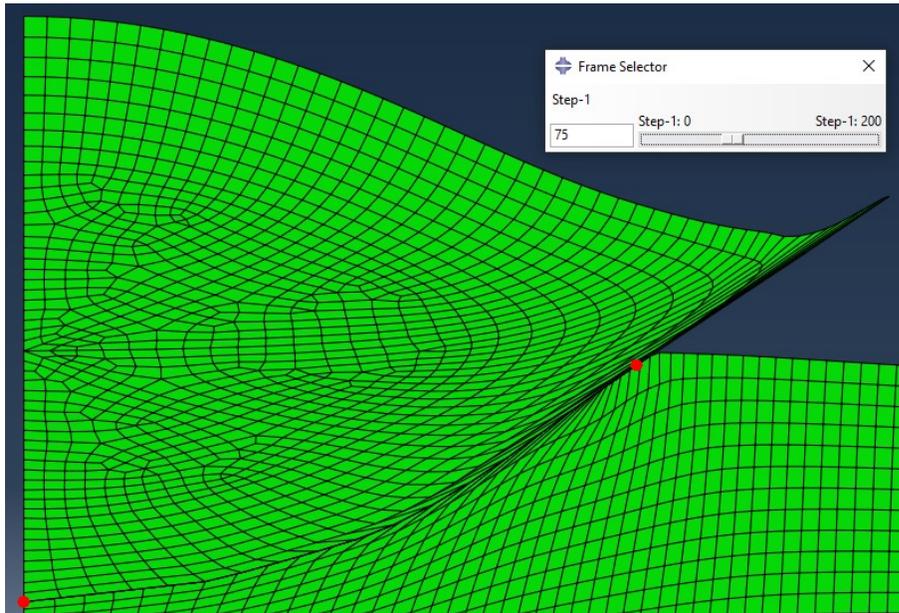


Figura 3.9: Nodos de la partícula en contacto en el punto de máxima área de contacto.

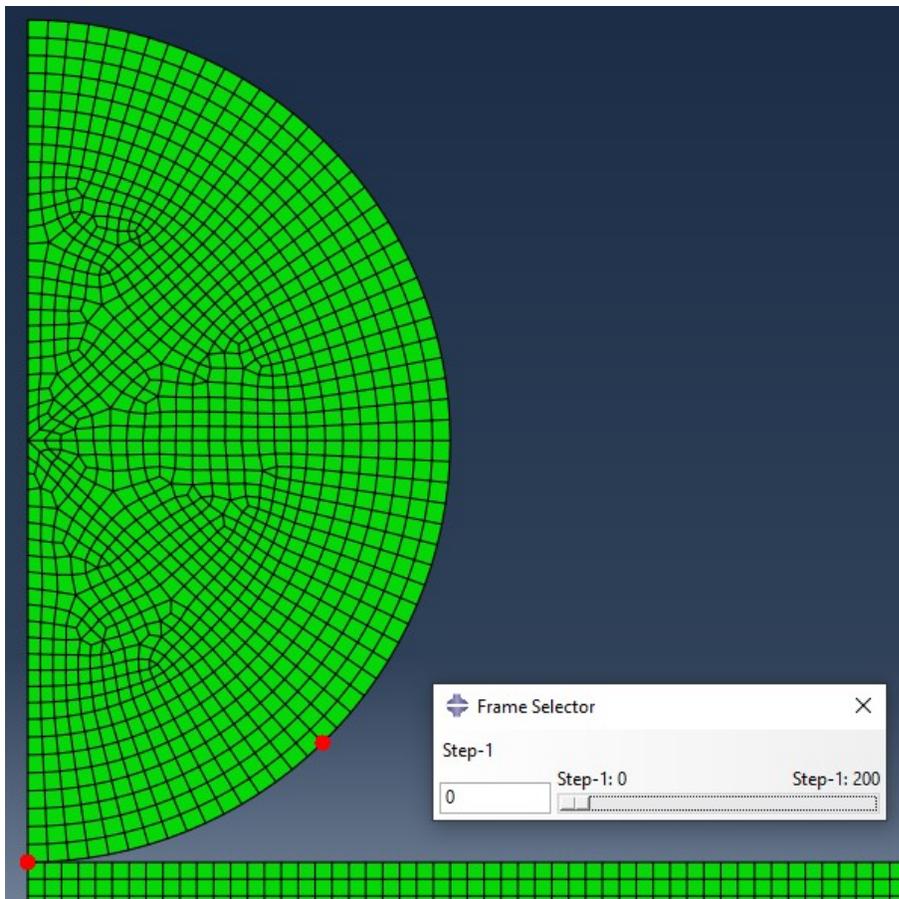


Figura 3.10: Mismos nodos de la Figura 3.9 previos al impacto.

### 3.6. Análisis de resultados

Una vez completas las simulaciones y el post-procesamiento de los resultados, se puede proceder a analizar los datos obtenidos, con el objetivo de determinar si la velocidad crítica de adhesión de las partículas está relacionada de alguna manera con el porcentaje de estiramiento de la partícula o del sustrato.

Para determinar si existe esta relación, se estimará una velocidad crítica en base a los valores obtenidos para el estiramiento, y se compararán estas velocidades con los valores experimentales que se encuentran en literatura. Para calcular el estiramiento superficial de la partícula y del sustrato se utilizará la siguiente fórmula, que considera el área máxima de contacto antes de que se desprenda la partícula y la compara con el área inicial previa al inicio de la deformación.

$$Estiramiento = \left( \frac{A.ContactoMáxima}{A.Inicial} \cdot 100 \right) - 100 \quad (3.1)$$

Adicionalmente, se evaluará cualitativamente la deformación resultante para evaluar la participación de distintos mecanismos de adhesión.

# Capítulo 4

## Validación

En este capítulo se detalla el proceso seguido para realizar la validación del modelo descrito en la metodología. Esto es necesario para reconocer los resultados obtenidos en esta memoria como válidos. En primer lugar, se describe el artículo utilizado como base.

### 4.1. Artículo utilizado

El artículo utilizado para la validación se titula "Some aspects on 3D numerical modeling of high velocity impact of particles in cold spraying by explicit finite element analysis"[12]. En el, se modela en tres dimensiones el impacto de partículas usando Abaqus/Explicit, usando varias combinaciones de parámetros y analizando los resultados. Algunos de los parámetros que varía el paper son: simulación de daño material, uso de ALE, uso de control de Hourglass, coeficiente de fricción y tamaño de la partícula.

### 4.2. Modelo para validación

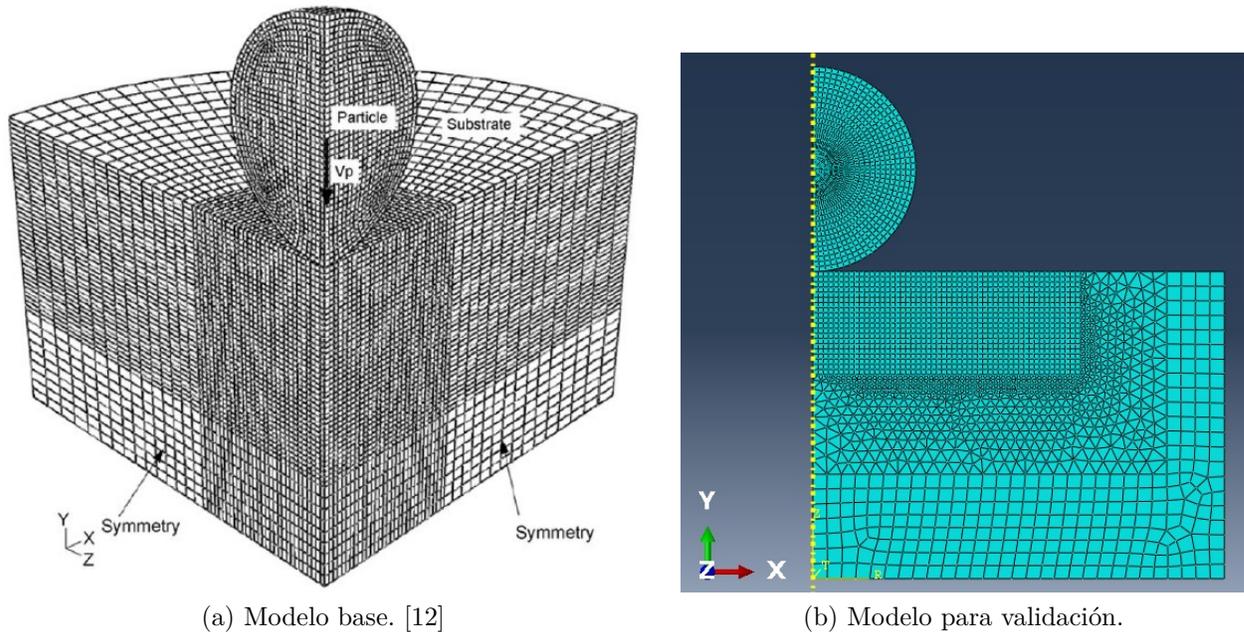
A continuación, se describe el modelo creado en base al artículo mencionado anteriormente. Al igual que el modelo del artículo, este modelo para validación fue creado en Abaqus/Explicit. La principal diferencia a destacar es que el modelo utilizado para validación es axisimétrico, mientras que el modelo del artículo utiliza partes 3D. Sin embargo, todas las demás características, como tamaño de malla, tipo de contacto, materiales y otros, se tomaron directamente del paper.

#### 4.2.1. Dimensiones y mallado

En el artículo, se utiliza una partícula de 20  $[\mu\text{m}]$  de diámetro. El sustrato se modela como un cilindro cuyo radio y altura son 4 y 3 veces el radio de la partícula respectivamente (40  $[\mu\text{m}]$  y 30  $[\mu\text{m}]$ ). El tamaño de malla fue tomado como 1/40 veces el radio de la partícula, usando el mismo tamaño en la partícula y en la zona de contacto del sustrato. Se modela un cuarto de la partícula y el sustrato, tomando ventaja del carácter simétrico del problema, para disminuir el costo computacional.

Similarmente, en el modelo para esta memoria, se utilizan las mismas proporciones para el tamaño del sustrato, pero considerando una partícula de 1  $[\text{mm}]$  de diámetro. Se utiliza

un modelo axisimétrico 2D para disminuir el costo computacional. En la Figura 4.1 se puede ver una comparación lado a lado de ambos modelos.



(a) Modelo base. [12]

(b) Modelo para validación.

Figura 4.1: Comparación entre modelos.

#### 4.2.2. Materiales

En el artículo se utiliza cobre como material para la partícula y el sustrato. Se utiliza el modelo de Johnson-Cook para plasticidad. A continuación se muestran los parámetros utilizados para definir este material, los cuales fueron utilizados para el modelo de validación. Se asume que estas propiedades tienen un comportamiento isotrópico.

Tabla 4.1: Parámetros utilizados para cobre. [12]

Parámetro	Valor	Unidades
Densidad	8960	[Kg/m <sup>3</sup> ]
C. térmica	386	[W/(m°C)]
C. específico	383	[J/(Kg°C)]
Punto fusión	1083	[°C]
M. Young	124	[GPa]
Poisson	0.34	-
T. referencia	25	[°C]

Tabla 4.2: Parámetros para Johnson-Cook. [12]

A [MPa]	B [MPa]	n	C	m
90	292	0.31	0.025	1.09

### 4.2.3. Condiciones de borde

En el artículo no se mencionan las condiciones de borde que fueron usadas. Para este modelo, se utilizan las mismas condiciones de borde descritas en la Sección 3.3.3.

### 4.2.4. Campos predefinidos

La temperatura inicial de la partícula y del sustrato se definen en 25°C (298 °K), al igual que en el artículo. Se hacen pruebas utilizando una velocidad inicial de 300, 400 y 500 [m/s].

### 4.2.5. Interacciones

En el artículo, el contacto se define como "Surface-to-Surface contact (Explicit)", utilizando un coeficiente de fricción de 0,2. Se supone que un 100 % del trabajo de fricción es disipado como calor. Para el modelo de validación se utilizan estos mismos parámetros, creando además interacciones entre partícula-partícula y sustrato-sustrato.

### 4.2.6. Tipo de elementos y control de distorsión

Mientras que en el artículo se utilizan elementos hexaédricos de 8 nodos, en el modelo para validación se utilizan elementos axisimétricos de 4 nodos del tipo CAX4RT. En ambos modelos se considera la conducción de calor, usando elementos que consideran desplazamiento y temperatura. Además, en ambos se considera el uso de integración reducida y control de Hourglass de tipo Stiffness. Adicionalmente, se utiliza control de distorsión, con una razón de largo igual a 0,1. Las mismas opciones pueden observarse en la Figura 3.4.

## 4.3. Resultados

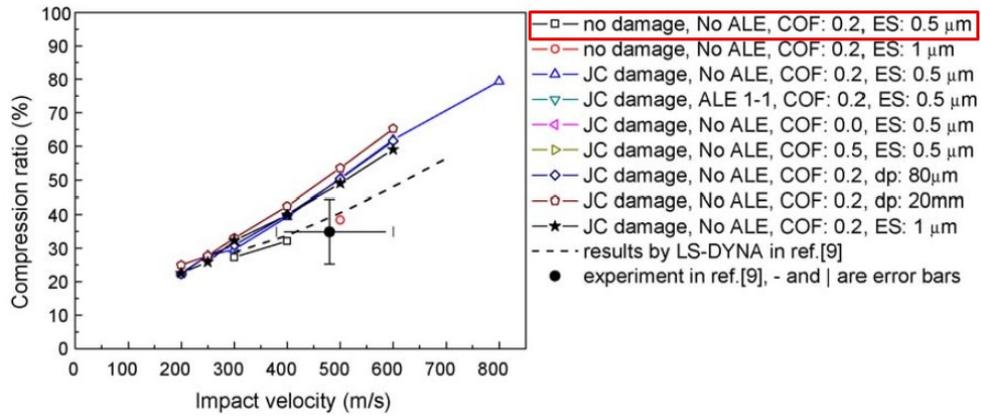
En esta sección se comparan los resultados obtenidos con el modelo construido para validación y los resultados del artículo. El principal parámetro usado para la comparación es la razón de compresión de la partícula, definido por la Ecuación 4.1.

$$R_c = \frac{d_p - h_p}{d_p} \cdot 100 \% \quad (4.1)$$

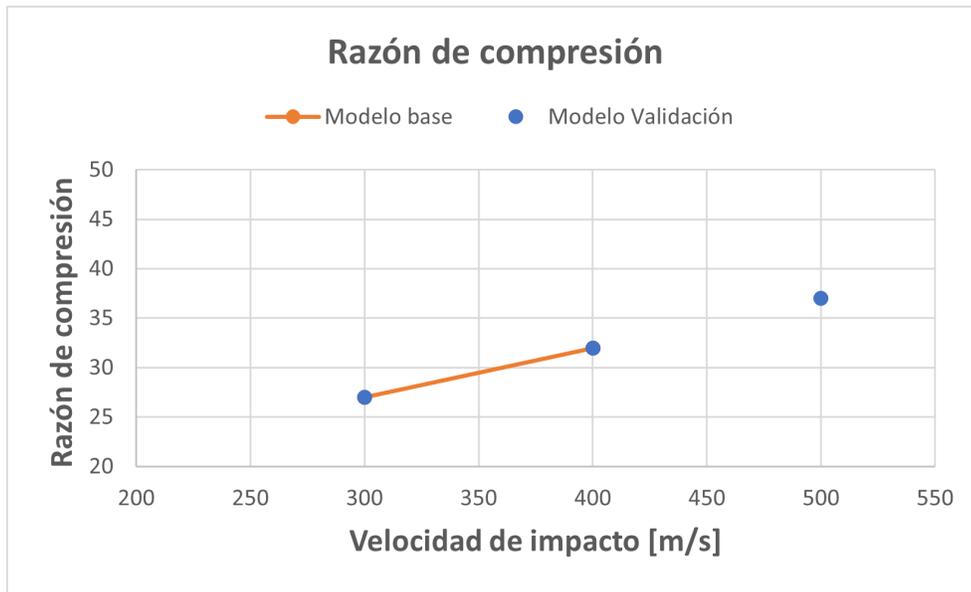
En la siguiente tabla, se pueden observar los resultados obtenidos para este parámetro en el modelo utilizado.

Tabla 4.3: Razón de compresión obtenida del modelo para validación.

Velocidad [m/s]	Razón de compresión [%]
300	27
400	32
500	37



(a) Modelo base. [12]



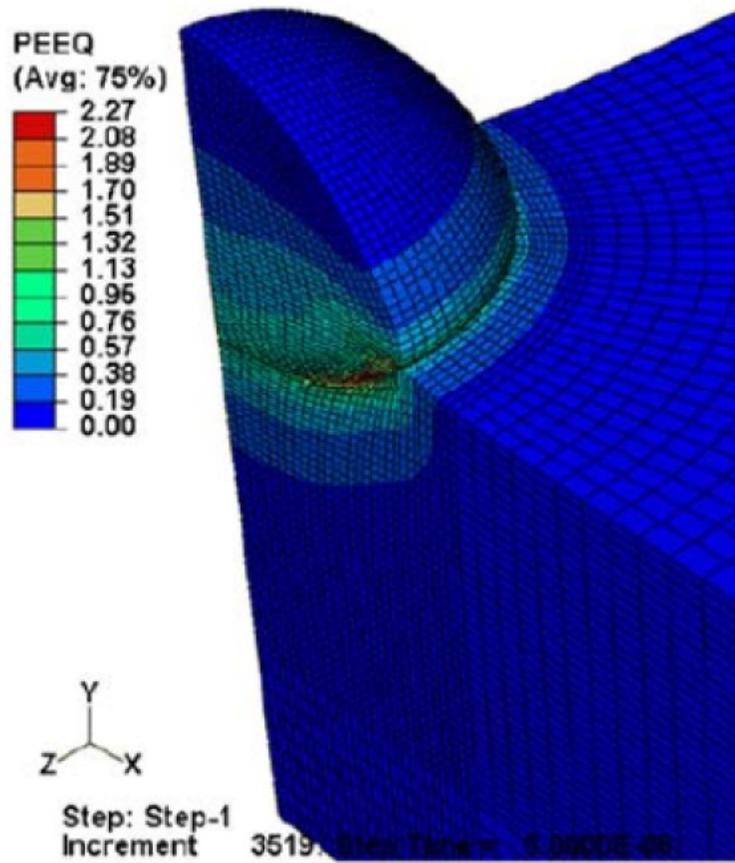
(b) Modelo para validación.

Figura 4.2: Comparación entre resultados para razón de compresión.

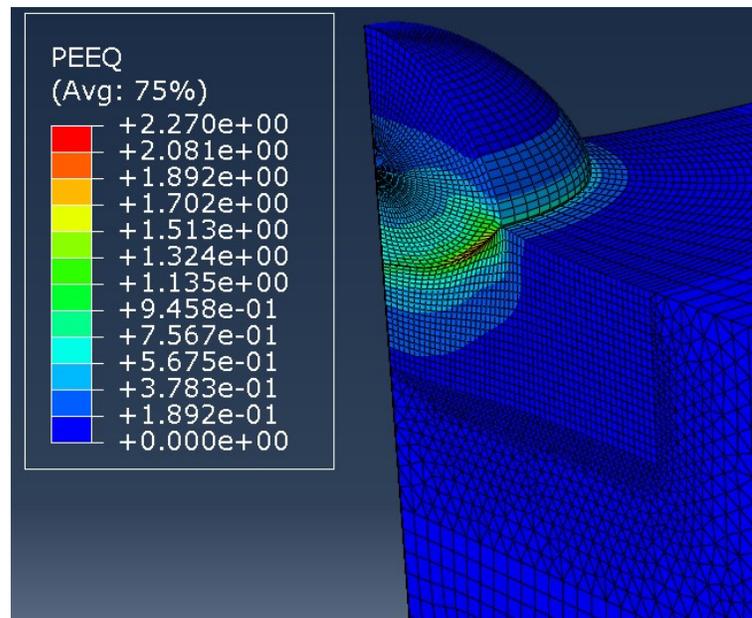
En la Figura 4.2, se comparan los resultados obtenidos para este parámetro en el artículo y en el modelo utilizado. Al graficar ambas curvas en el apartado (b), se puede ver que los valores obtenidos para las velocidades de 300 y 400 [m/s], en el caso sin daño material y sin ALE, son muy similares, ya que las curvas se alinean perfectamente.

Adicionalmente, en la Figura 4.3, se puede observar una comparación para la distribución de la deformación plástica equivalente (PEEQ) entre ambos modelos. Para una comparación más directa, los resultados del modelo para validación se han revolucionado en 90 grados para formar un cuarto de partícula en 3D. Observando estas figuras, se puede notar una alta similitud en las distribuciones del PEEQ.

Estos resultados obtenidos son suficientes para considerar validado el modelo utilizado en esta memoria.



(a) Modelo base. [12]



(b) Modelo para validación.

Figura 4.3: Comparación entre resultados para PEEQ.

# Capítulo 5

## Resultados y análisis

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en esta memoria, junto con su respectivo análisis. Los resultados pueden dividirse en dos grupos según el tipo de sustrato utilizado: duro (Acero 316) o blando (Al-1100-H12). Se muestran resultados para cada material usado como partícula impactando en estos dos tipos de sustrato. Se presentan tablas con la máxima área de contacto alcanzada, el porcentaje de estiramiento de la partícula y el sustrato, y el cuadro del que fueron extraídos los datos (correspondiente al instante de máxima área de contacto) para cada velocidad de lanzamiento. Adicionalmente, se muestran figuras con el estiramiento de las partículas y sustratos, y el rango de velocidad crítica para las partículas según datos experimentales (rectángulo verde). Las figuras que se muestran corresponden al momento en el que se registró la máxima área de contacto durante la simulación de los impactos.

### 5.1. Aluminio Al-1100-H12

#### 5.1.1. Sustrato duro

Tabla 5.1: Resultados para Aluminio Al-1100-H12 sobre Acero 316.

Velocidad [m/s]	A. contacto [mm <sup>2</sup> ]	Estiramiento P [%]	Estiramiento S [%]	Frame
100	0,25	18	20	68
200	0,49	25	9	49
300	0,73	47	10	59
400	0,96	178	13	61
500	1,84	480	154	66
600	2,38	649	160	47
700	3,19	1107	890	59
800	5,11	1604	551	47
900	6,10	1822	566	53
1000	12,90	3630	1209	28

Tanto en la tabla 5.1 como en la figura 5.1 se puede ver un aumento del porcentaje de estiramiento de la partícula a medida que aumenta la velocidad de impacto. Esto está ligado directamente a la mayor deformación que sufre la partícula a velocidades más altas, como se ha visto en los resultados de otros estudios [12]. Otra prueba de esto es el aumento que se ve en el área de contacto.

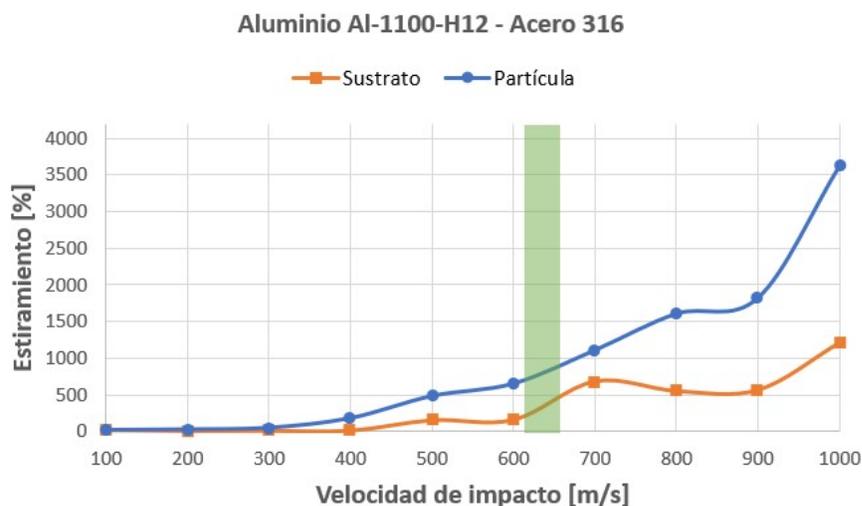


Figura 5.1: Estiramiento Aluminio Al-1100-H12 sobre Acero 316.

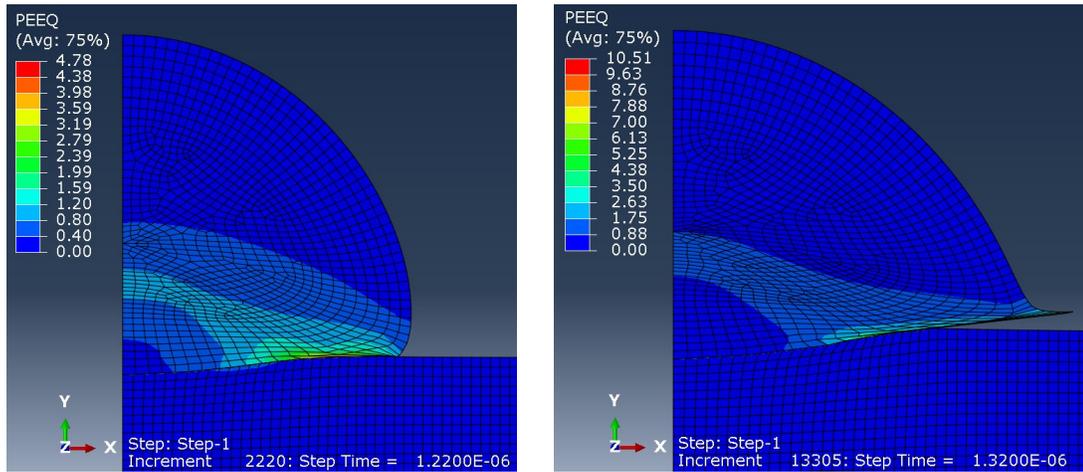
Puede observarse en la figura 5.1 que el estiramiento de la partícula fue mayor que el del sustrato, con diferencias más pronunciadas a mayores velocidades. Esto tiene sentido, ya la dureza del aluminio es mucho menor que la del acero 316, lo que se traduce en una menor resistencia a la deformación.

El impacto a 500 [m/s] es de especial interés, ya que se observó un aumento significativo en el valor del estiramiento de la partícula. Al comparar la deformación de la partícula a esta velocidad con la deformación a 400 [m/s] (figura 5.2 (a) y (b)), se puede observar que los elementos de la interfase fueron expulsados hacia el exterior formando un ‘chorro’ de material, efecto que se ve acentuado a medida que aumenta la velocidad de impacto a partir de los 500 [m/s]. Adicionalmente, como se ve en la figura 5.2 (c) y (d), se produjo un aumento de temperatura localizado en un sector de la interfase, el que se ve pronunciado en la zona del chorro de material. Esto puede ser indicativo de una inestabilidad de corte adiabático, lo que explicaría la formación del chorro de material. En base a estos resultados, podría decirse que la velocidad crítica para esta combinación de materiales y con los parámetros utilizados en esta simulación está entre 400 y 500 [m/s].

Respecto al estiramiento del sustrato, se puede ver que también aumentó con la velocidad de impacto, aunque en menor medida que el de la partícula, ya que es mucho más duro que esta. Se puede observar un aumento significativo del estiramiento a velocidades de impacto por sobre los 700 [m/s] en la figura 5.1 lo que puede deberse nuevamente a inestabilidades de corte adiabático. Esto podría implicar un velocidad crítica más alta, ya que es posible que el estiramiento de la partícula por sí sola no sea suficiente para remover la capa de óxido del sustrato y permitir la formación de enlaces metálicos. Este argumento toma mayor peso considerando que la velocidad crítica documentada para el aluminio está entre 620 y 660 [m/s].

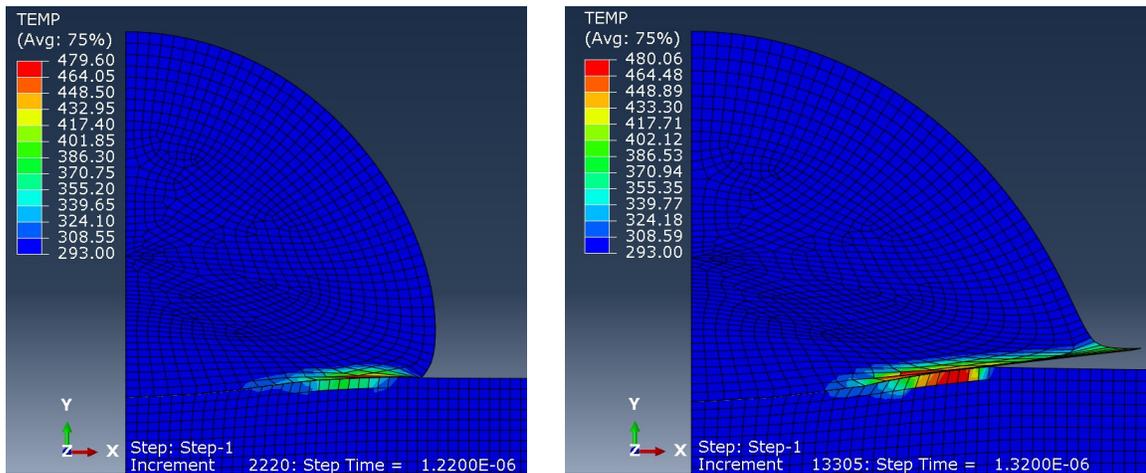
Debe mencionarse que existieron posibles errores en la simulación, ya que la deformación de los elementos tuvo un comportamiento no esperado que se tradujo en una reducción del

área de contacto en la interfase (como se puede observar en la figura 5.3) a velocidades más altas, lo que implica una disminución en el valor del estiramiento calculado. Esto es un problema que se repitió en varias de las configuraciones, y estuvo especialmente presente en aquellas en que había una gran diferencia entre las durezas de la partícula y del sustrato.



(a) PEEQ a 400 (m/s).

(b) PEEQ a 500 (m/s).



(c) Temperatura a 400 (m/s).

(d) Temperatura a 500 (m/s).

Figura 5.2: Impacto de Aluminio Al-1100-H12 sobre Acero 316.

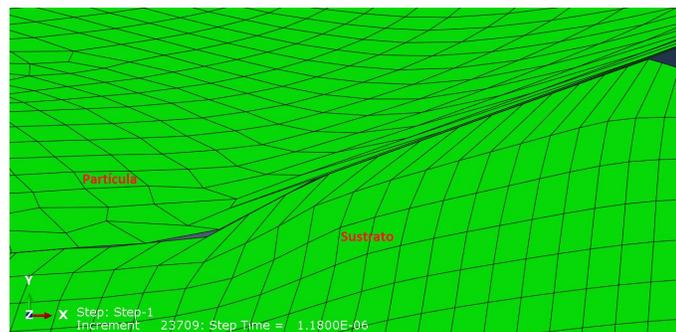


Figura 5.3: Separación entre elementos en la interfase. Aluminio Al-1100-H12 sobre Acero 316 a 700 (m/s).

### 5.1.2. Sustrato blando

Tabla 5.2: Resultados para Aluminio Al-1100-H12 sobre Al-1100-H12.

Velocidad [m/s]	A. contacto [mm <sup>2</sup> ]	Estiramiento P [%]	Estiramiento S [%]	Frame
100	0,25	15	17	72
200	0,47	19	15	71
300	0,78	39	28	60
400	1,01	35	19	55
500	1,29	45	41	59
600	1,49	82	76	60
700	1,84	268	352	60
800	2,07	363	469	44
900	2,14	519	489	46
1000	2,13	610	562	46

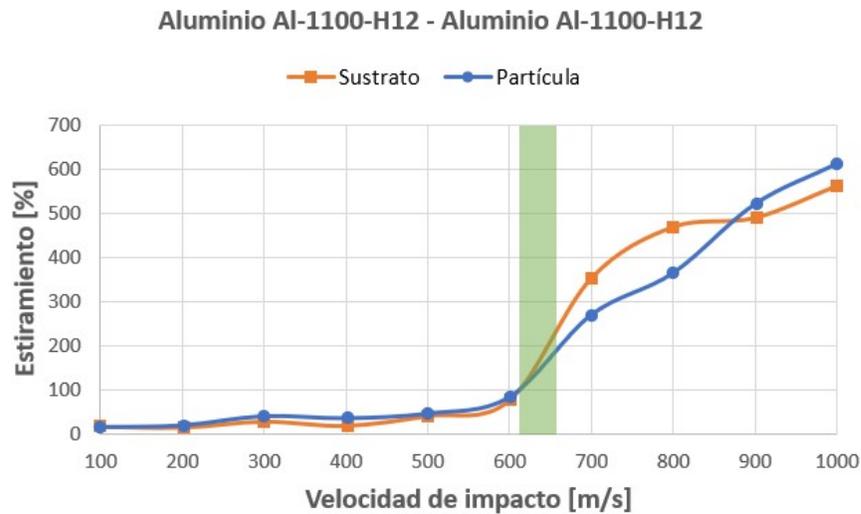
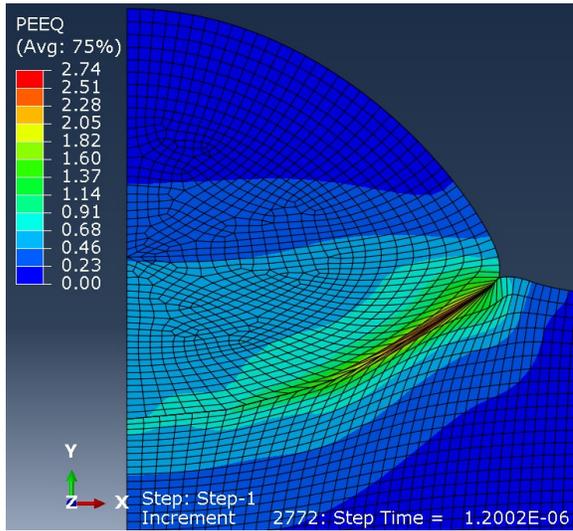


Figura 5.4: Estiramiento Aluminio Al-1100-H12 sobre Aluminio Al-1100-H12.

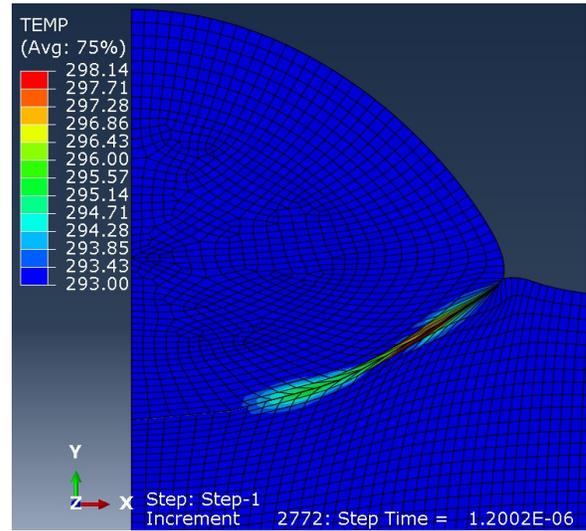
En la tabla 5.2 se puede observar que el área de contacto aumentó junto con la velocidad de impacto, lo que tiene sentido tomando en cuenta el aumento de la deformación con velocidades más altas.

En la figura 5.4 se puede ver que el estiramiento fue muy bajo para velocidades menores a 700 [m/s], y tuvo un aumento tanto para la partícula como para el sustrato a esta velocidad. Este aumento en el estiramiento se explica por la formación de chorros de material a partir de la partícula y del sustrato, como puede observarse en la figura 5.5 (c). Esto se soporta por el aumento de temperatura local en la interfase que se ve en los apartados (b) y (d) de la misma figura, lo que es indicativo de la formación de bandas de corte adiabático.

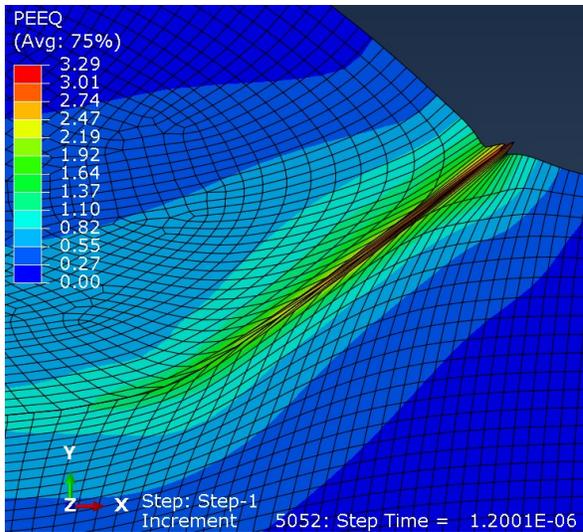
En la figura 5.5 (a) y (c) se puede ver que la partícula no fue envuelta por el sustrato, por lo que podría suponerse que el entrelazamiento mecánico no es el mecanismo principal de adhesión en esta configuración.



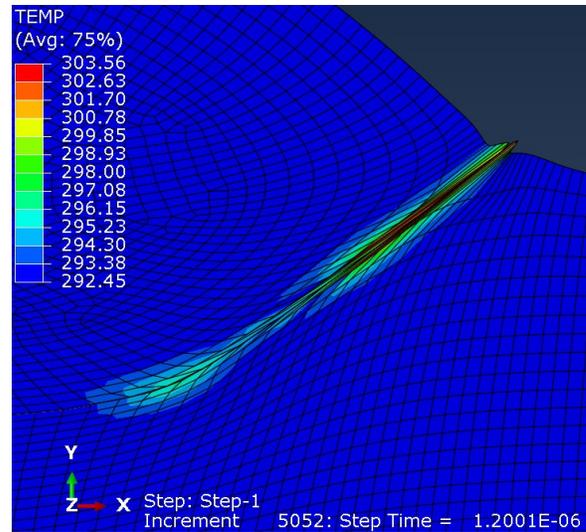
(a) PEEQ a 600 (m/s).



(b) Temperatura a 600 (m/s).



(c) PEEQ a 700 (m/s). Aparece chorro en partícula y en sustrato.



(d) Temperatura a 700 (m/s).

Figura 5.5: Impacto de Aluminio Al-1100-H12 sobre Aluminio Al-1100-H12.

Puede destacarse que el comportamiento de la curva en la figura 5.4 es muy similar al caso del impacto de la partícula de Acero 316 sobre Acero 316: el estiramiento de la partícula y del sustrato fueron muy similares para la mayoría de las velocidades de impacto. Adicionalmente, el aumento en el estiramiento se vio a la misma velocidad (700 [m/s]). Esto podría tener relación con el hecho de que en ambos casos se utilizó el mismo material para la partícula y el sustrato.

Respecto a la velocidad crítica, se obtuvo un valor muy cercano a los valores experimentales, según la figura 5.4. Esto nuevamente apoya la idea de que en este caso es necesario el estiramiento de ambas superficies para lograr la adhesión.

## 5.2. Cobre

### 5.2.1. Sustrato duro

Tabla 5.3: Resultados para Cobre sobre Acero 316.

Velocidad [m/s]	A. contacto [mm <sup>2</sup> ]	Estiramiento P [%]	Estiramiento S [%]	Frame
100	0,49	23	7	102
200	0,99	59	8	116
300	1,59	341	73	118
400	2,31	418	152	77
500	2,58	478	181	75
600	2,38	434	142	52
700	2,83	617	594	60
800	2,77	521	580	43
900	2,83	466	680	44
1000	3,11	521	663	38

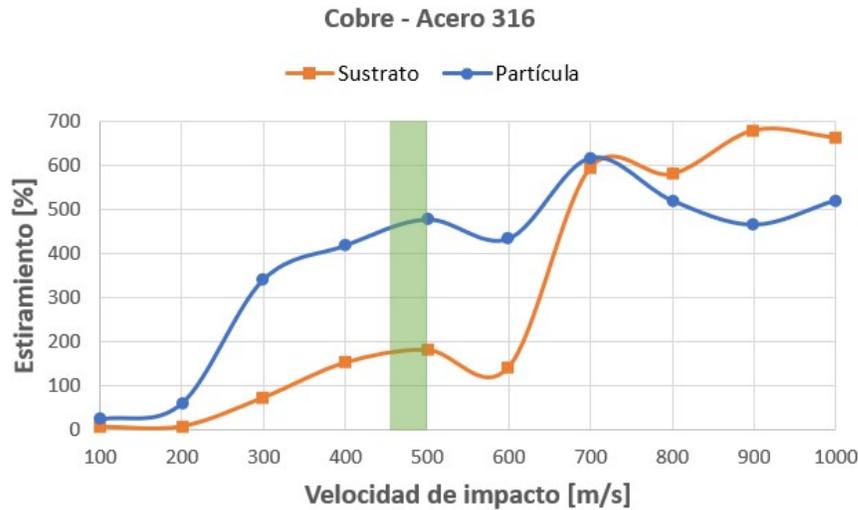


Figura 5.6: Estiramiento Cobre sobre Acero 316.

En la tabla 5.3 y en la figura 5.6 se puede observar un aumento en el estiramiento tanto de la partícula como del sustrato, con curvas de forma muy parecida hasta los 800 [m/s], a partir de donde el estiramiento del sustrato supera al de la partícula. A partir de los 300 [m/s] empezó a formarse el chorro de material a partir de la partícula (asociado al aumento local de temperatura en la interfase) como puede observarse en la figura 5.7. Esto puede estar ligado a la formación de bandas de corte adiabático.

Los resultados para el impacto a 600 (m/s) muestran un descenso del estiramiento (figura 5.6), y la deformación para este caso puede observarse en la figura 5.8. Aquí se puede notar que a partir de los 600 (m/s) se empezó a formar un segundo chorro de material en el sustrato, que se ve como una pequeña punta. Este chorro provocó una separación entre los elementos de la partícula y del sustrato, lo que podría explicar la disminución en el área de contacto

que se ve en la tabla 5.3 y, en consecuencia, la disminución del estiramiento. A partir de este punto, los chorros de la partícula y del sustrato se separaron cada vez más al aumentar la velocidad de impacto, afectando las medidas del estiramiento, por lo que el comportamiento que se ve en la figura 5.6 a partir de los 800 [m/s] (descenso del estiramiento de la partícula por debajo de el del sustrato) puede deberse a errores en el post-procesamiento, ya que lo esperado es que el cobre se deforme más que el acero 316 al ser un material más blando.

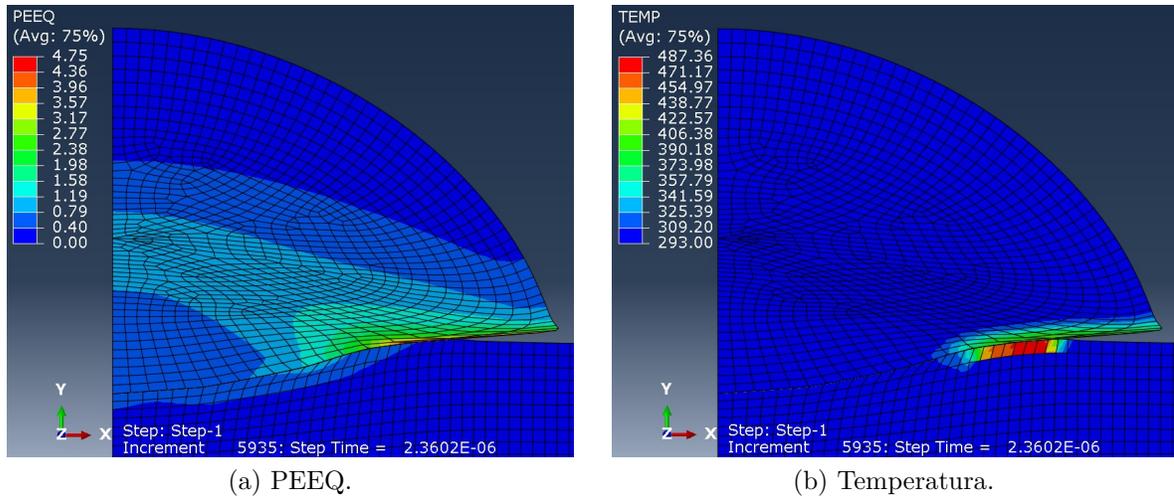


Figura 5.7: Impacto de Cobre sobre Acero 316 a 300 (m/s).

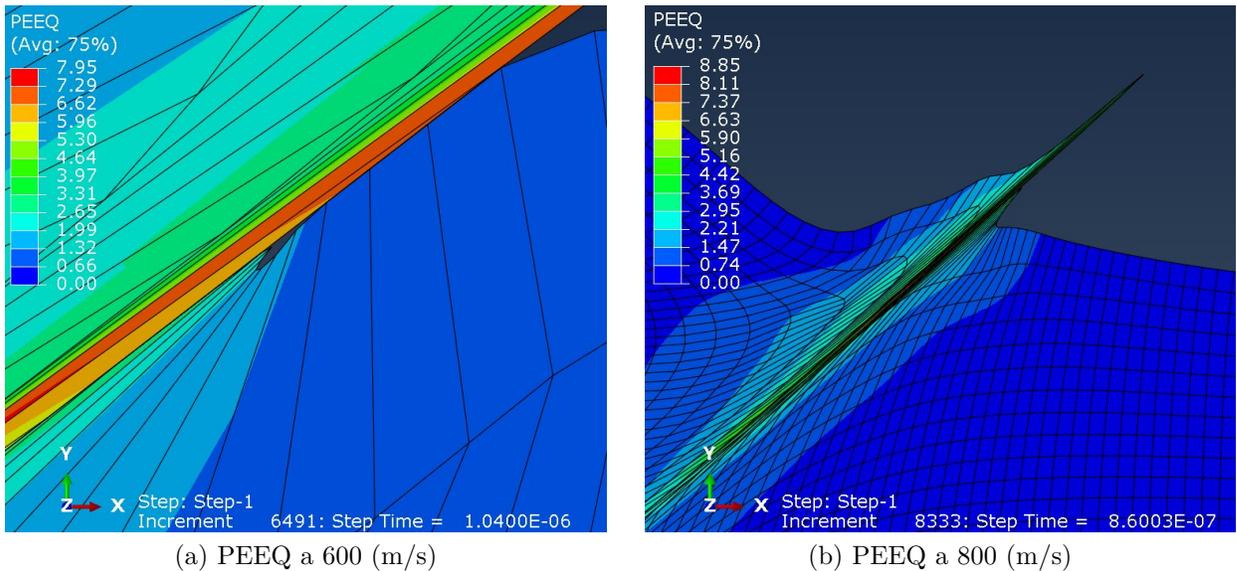


Figura 5.8: Chorro de material formado a partir del sustrato.

Según estos resultados, la velocidad crítica para esta configuración estaría entre 500 y 600 [m/s] (tomando como criterio la aparición del chorro de material en ambas superficies), y el mecanismo predominante sería la formación de enlaces metálicos gracias a la remoción de la capa de óxido superficial por el elevado estiramiento del sustrato y de la partícula. Este valor es un poco mayor al que se ha visto en bibliografía (entre 460 y 500 [m/s]). Sin embargo, debe destacarse que la velocidad crítica varía considerablemente con el contenido de oxígeno de las partículas (factor que no se consideró en estas simulaciones).

## 5.2.2. Sustrato blando

Tabla 5.4: Resultados para Cobre sobre Al-1100-H12.

Velocidad [m/s]	A. contacto [mm <sup>2</sup> ]	Estiramiento P [%]	Estiramiento S [%]	Frame
100	0,48	22	6	99
200	0,98	43	15	120
300	1,45	64	59	102
400	1,80	52	129	109
500	2,13	184	563	89
600	2,02	260	613	74
700	2,01	301	610	56
800	2,01	410	524	66
900	2,85	1010	1776	95
1000	2,37	995	1456	65

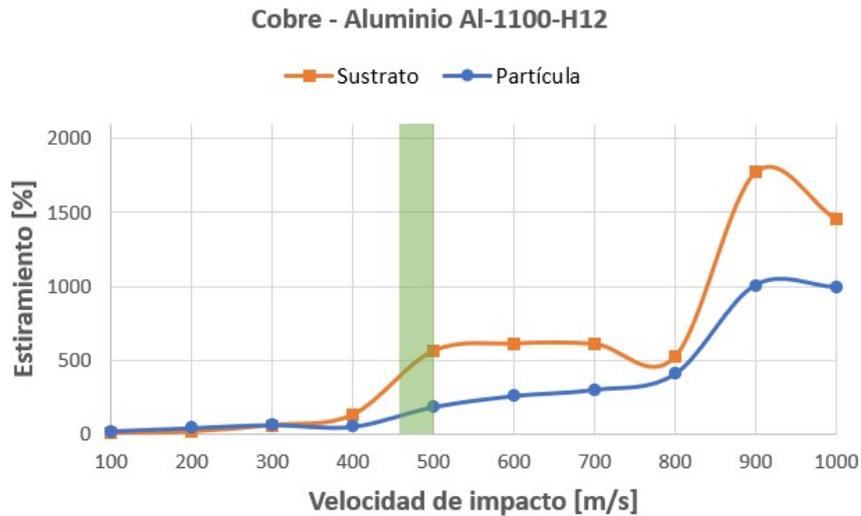
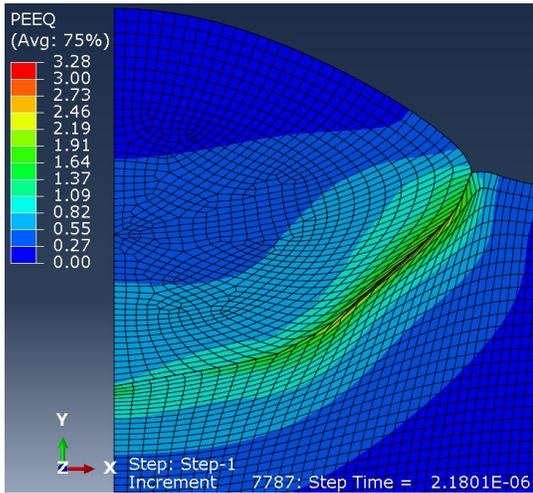
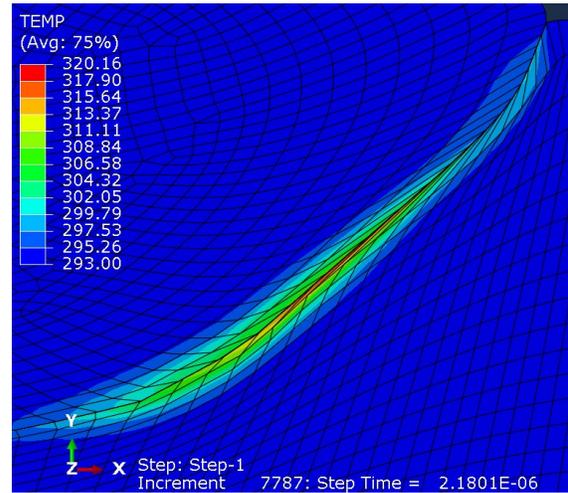


Figura 5.9: Estiramiento Cobre sobre Aluminio Al-1100-H12.

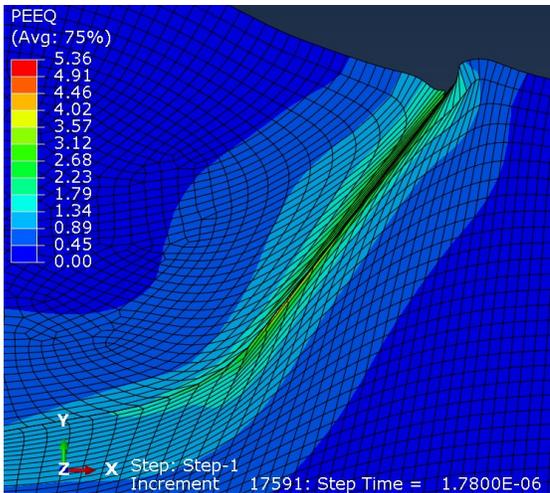
En la tabla 5.3 se puede ver que el área de contacto se mantuvo relativamente constante en los impactos entre 500 y 800 [m/s]. Sin embargo, al revisar los cuadros en los que se registró la máxima área de contacto, se puede notar que ésta se alcanzó más rápidamente a velocidades más altas. Esto tiene sentido, ya que se espera que la tasa de deformación sea más alta a medida que aumenta la velocidad de impacto. Por otro lado, en este caso, al igual que en el impacto de Al-1100-H12 sobre Acero 316, hubo separaciones de los elementos en la interfase debido a la deformación irregular de estos (figura 5.3), lo que claramente impacta negativamente el valor obtenido del área de contacto.



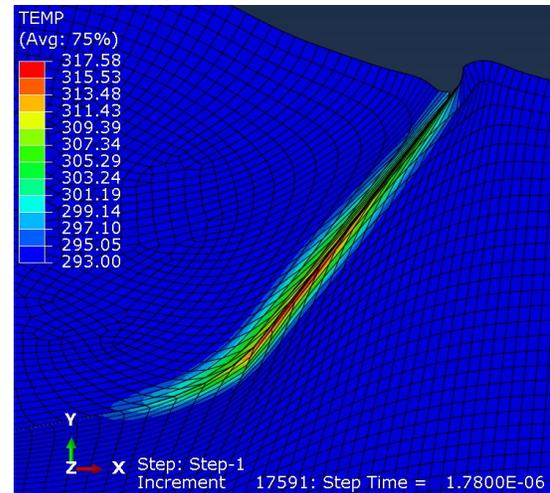
(a) PEEQ a 400 (m/s). Previo a formación de chorro.



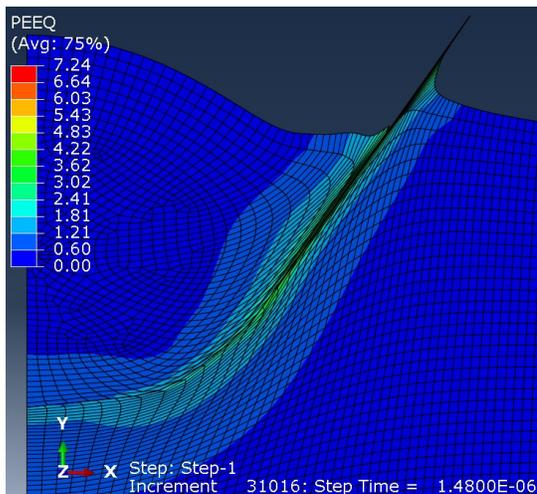
(b) Temperatura a 400 (m/s).



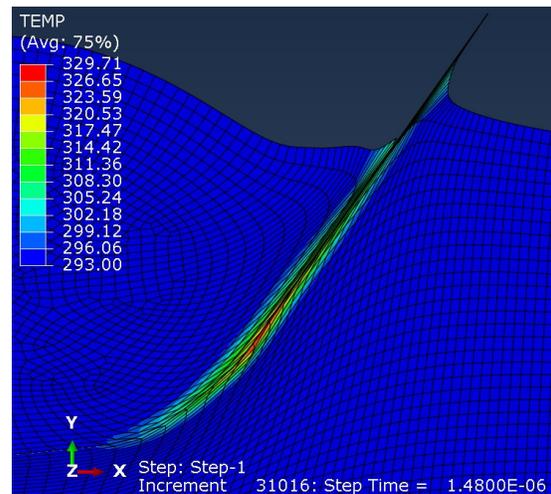
(c) PEEQ a 500 (m/s). Aparece chorro en partícula.



(d) Temperatura a 500 (m/s).



(e) PEEQ a 600 (m/s). Aparece chorro en sustrato.



(f) Temperatura a 600 (m/s).

Figura 5.10: Impacto de Cobre sobre Aluminio Al-1100-H12.

Adicionalmente, en la figura 5.9 se puede ver que el estiramiento de la partícula y del sustrato también se mantuvieron relativamente iguales entre las mismas velocidades. Como puede verse en la figura 5.10, a partir de los 500 [m/s] comenzó la formación de chorro de material a partir de la partícula, y a partir de los 600 [m/s] en el sustrato. Sin embargo, se puede notar que la formación del chorro a partir del sustrato fue de manera mucho más súbita que en casos anteriores, ya que entre el impacto a 500 [m/s] y el impacto a 600 [m/s] se pasó de no tener formación de chorro, a tener un chorro muy pronunciado. Esto es indicativo de una muy rápida deformación de los elementos en el sustrato, y provocó una leve separación entre los elementos pertenecientes al chorro de la partícula y del sustrato, afectando la medición del área de contacto y, en consecuencia, de porcentaje de estiramiento.

Otra consecuencia de la excesiva deformación de los elementos en el sustrato, es que se produjo gran dificultad para identificar el último nodo en contacto perteneciente al sustrato, haciendo difícil la medición exacta del estiramiento de la superficie. Este es un problema que se repite en varios casos, especialmente en los que hay una gran diferencia entre las durezas de la partícula y el sustrato.

Respecto al mecanismo de adhesión, viendo el aumento de temperatura local en las figuras 5.10 (b), (d) y (f), además del alza repentina en el estiramiento de la partícula y del sustrato, se puede suponer que se formaron bandas de corte adiabático. Adicionalmente, se puede observar en la figura 5.10 (c) que el sustrato envuelve levemente a la partícula, por lo que también puede haber entrelazamiento mecánico. Basado en estos resultados, la velocidad crítica para esta combinación de materiales estuvo en torno a los 500 [m/s], con ambos mecanismos de adhesión pudiendo ser un aporte. Comparando con los valores experimentales (entre 460 y 500 [m/s]), se puede ver en la figura 5.9 que estos resultados se asemejan mucho, nuevamente apoyando la idea de que la adherencia ocurre al estirarse de manera suficiente la partícula y el sustrato.

## 5.3. Nickel 200

### 5.3.1. Sustrato duro

Tabla 5.5: Resultados para Nickel 200 sobre Acero 316.

Velocidad [m/s]	A. contacto [mm <sup>2</sup> ]	Estiramiento P [%]	Estiramiento S [%]	Frame
100	0,35	17	9	65
200	0,72	28	8	68
300	1,09	46	11	91
400	1,38	101	30	79
500	1,60	113	62	68
600	2,00	300	103	70
700	2,14	328	426	59
800	2,17	451	434	47
900	2,24	549	598	46
1000	2,39	591	643	41

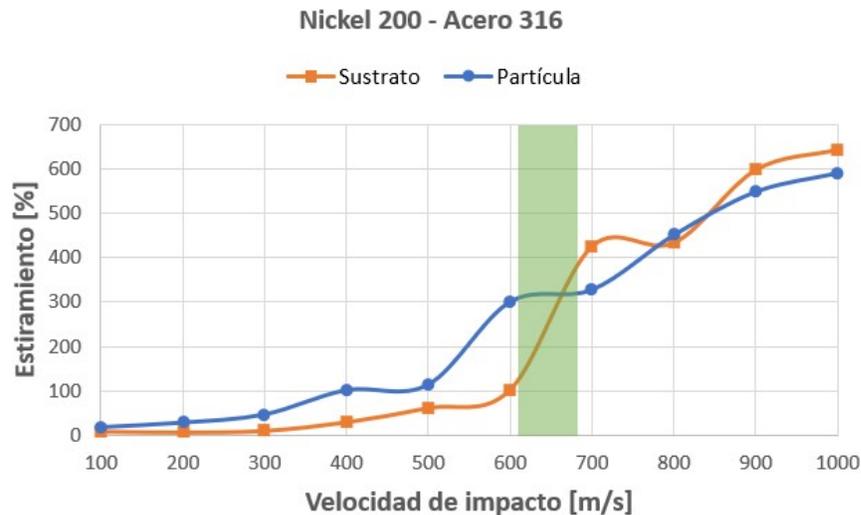


Figura 5.11: Estiramiento Nickel 200 sobre Acero 316.

Como puede se puede notar en la tabla 5.5 y en la figura 5.11, el estiramiento tanto de la partícula como del sustrato aumentan con la velocidad de impacto, lo que tiene sentido tomando en cuenta la mayor deformación que sufren los cuerpos. Sin embargo, puede observarse que el valor del área de contacto no aumenta en gran medida pasados los 600 [m/s]. Esto puede deberse a que la formación de los chorros de material a partir de la partícula y del sustrato aparecieron en velocidades muy similares (600 y 700 [m/s] respectivamente), lo que provoca una mayor separación de los elementos en la interfase que conforman los chorros. Este fenómeno puede observarse en la figura 5.12 (c).

Adicionalmente, en la figura 5.13 se puede observar el aumento de temperatura local que ocurrió en una zona de la interfase, lo que permite la alta deformación de la partícula y el sustrato, posiblemente ligado a una inestabilidad de corte adiabático.

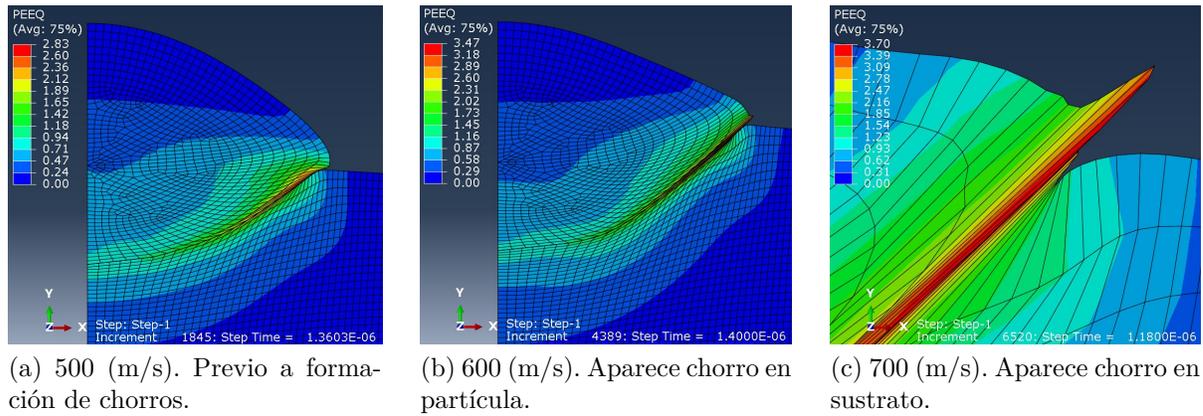


Figura 5.12: PEEQ en impacto de Nickel 200 sobre Acero 316.

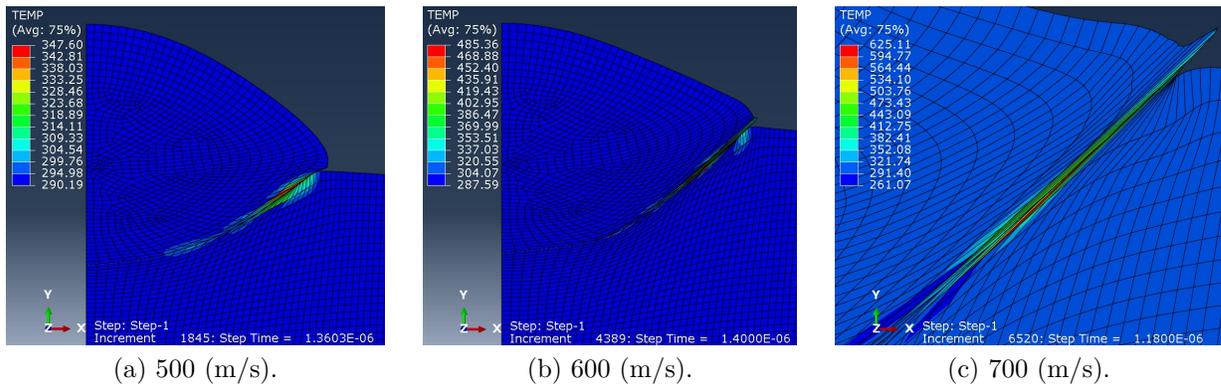


Figura 5.13: Temperatura en impacto de Nickel 200 sobre Acero 316.

Otro punto a destacar es la cercanía de las curvas del estiramiento del Nickel 200 y al Acero 316, lo que se puede apreciar en la figura 5.11. Esto puede deberse a que tanto el Nickel 200 como el Acero 316 poseen durezas similares, lo que podría implicar un comportamiento similar al deformarse.

Observando la figura 5.11, se puede ver que la formación de los chorros de material (y el aumento del estiramiento) para la partícula y el sustrato se dio entre los 600 y 700 [m/s], lo que calza muy bien con los valores de velocidad crítica documentados para el Nickel (610 a 680 [m/s]), por lo que puede concluirse que en este caso es necesario el estiramiento en ambos para que ocurra la adhesión.

### 5.3.2. Sustrato blando

Tabla 5.6: Resultados para Nickel 200 sobre Aluminio Al-1100-H12.

Velocidad [m/s]	A. contacto [mm <sup>2</sup> ]	Estiramiento P [%]	Estiramiento S [%]	Frame
100	0,39	12	20	118
200	0,78	14	29	92
300	1,22	18	56	96
400	1,62	21	124	98
500	1,77	49	252	101
600	2,16	163	571	105
700	2,22	297	686	70
800	1,30	109	304	45
900	1,67	384	825	113
1000	1,63	83	349	29

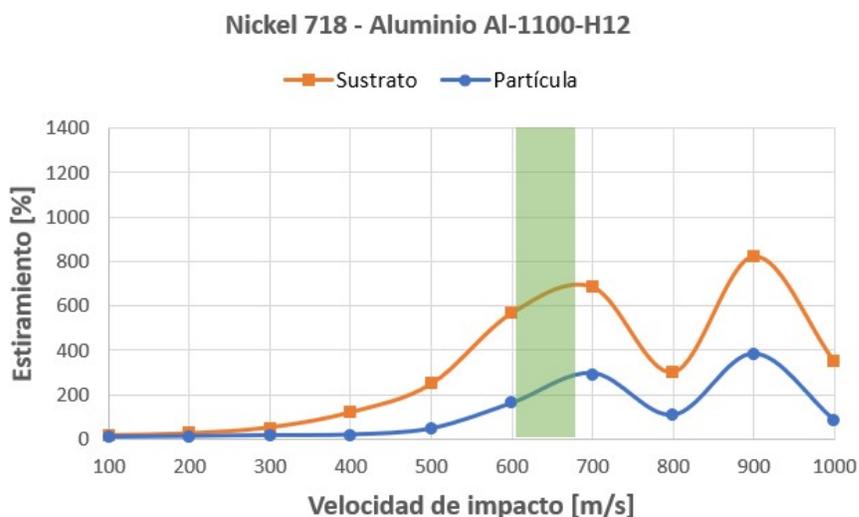


Figura 5.14: Estiramiento Nickel 200 sobre Aluminio Al-1100-H12.

Observando la tabla 5.6, se puede observar que el área de contacto aumentó de forma constante hasta los 700 [m/s]. Sin embargo, en velocidades más altas disminuyó su valor considerablemente, junto con el estiramiento de la partícula y del sustrato, lo que puede observarse en la figura 5.14. Esto puede deberse a las altas deformaciones que sufrió el sustrato, lo que resultó en la formación de un chorro de material excesivo a velocidades de impacto sobre 800 [m/s], lo que se puede ver en la figura 5.15. Esto presentó un problema para tomar los datos necesarios para calcular el porcentaje de estiramiento, ya que se dificultó enormemente la identificación de los últimos nodos en contacto entre la partícula y el sustrato. Adicionalmente, la deformación excesiva se tradujo en la aparición de muchos espacios con separaciones minúsculas entre la partícula y el sustrato. Esto implica que el comportamiento que se ve en la figura 5.14 (disminución y aumento del estiramiento) se puede deber a errores de medición, y no necesariamente a un fenómeno real. Basándose en estas observaciones, la velocidad crítica para la adhesión en esta configuración estaría entre 500 y 600 [m/s], y el mecanismo de adhesión predominante sería la formación de enlaces metálicos por la remoción de la capa de óxido.

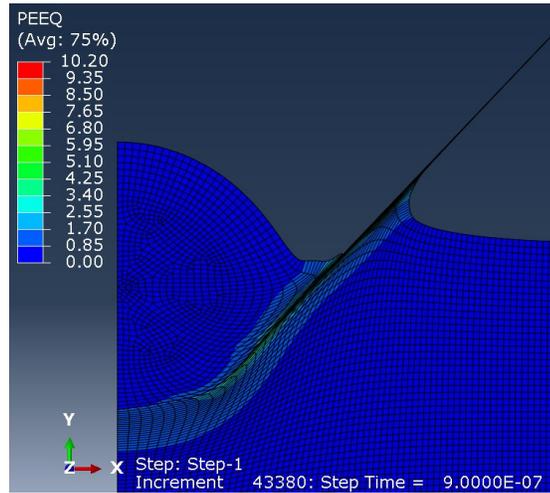
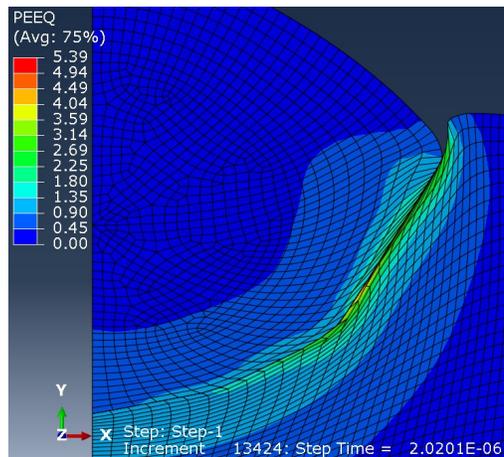
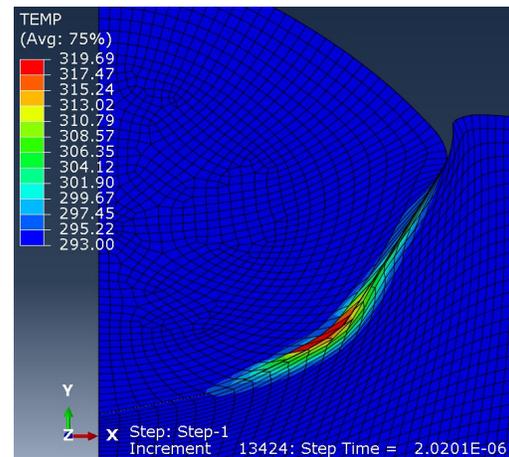


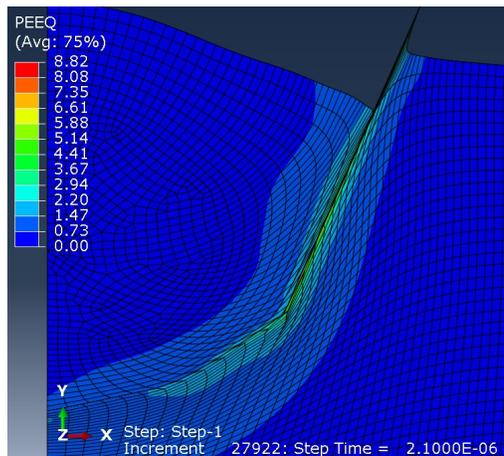
Figura 5.15: Impacto de Nickel 200 sobre Aluminio Al-1100-H12 a 800 (m/s).  
Formación de chorro en el sustrato.



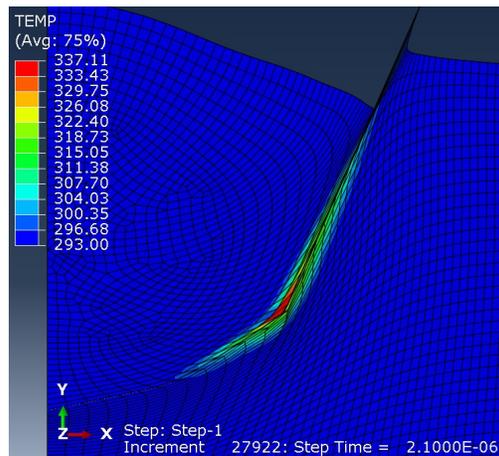
(a) PEEQ a 500 (m/s). Previo a formación de chorro.



(b) Temperatura a 500 (m/s).



(c) PEEQ a 600 (m/s). Aparece chorro en sustrato y en partícula.



(d) Temperatura a 600 (m/s).

Figura 5.16: Impacto de Nickel 200 sobre Aluminio Al-1100-H12.

Otro punto que se puede notar es que, para casi todas las velocidades, el porcentaje de estiramiento del sustrato fue mayor que el de la partícula. Esto tiene sentido considerando que la dureza del Nickel es superior a la del Aluminio.

Por otro lado, se puede observar un aumento importante en el porcentaje de estiramiento del sustrato en el impacto a 600 [m/s]. Este está asociado al comienzo de la formación del chorro de material, fenómeno que se puede ver en la figura 5.16 (c). Junto con el aumento de temperatura local observado en las figuras 5.16 (b) y (d), puede suponerse que la formación del chorro está asociada a inestabilidades de corte adiabático. Adicionalmente, en el apartado (a) de esta Figura, se puede observar que el sustrato envuelve levemente a la partícula en el impacto a 500 [m/s], por lo que se puede suponer que a velocidades más bajas puede ocurrir entrelazamiento mecánico.

Observando la figura 5.14, se puede notar que el aumento en el estiramiento de la partícula y el sustrato comenzó entre los 500 y 600 [m/s], por lo que podría suponerse que la adhesión ocurre a una velocidad más baja que la documentada. Esto se ve apoyado además por la formación del entrelazamiento mecánico antes mencionado.

## 5.4. Inconel 718

### 5.4.1. Sustrato duro

Tabla 5.7: Resultados para Inconel 718 sobre Acero 316.

Velocidad [m/s]	A. contacto [mm <sup>2</sup> ]	Estiramiento P [%]	Estiramiento S [%]	Frame
100	0,28	8	30	75
200	0,48	8	32	77
300	0,75	9	34	61
400	0,94	14	41	57
500	1,17	20	61	57
600	1,43	28	81	57
700	1,34	51	196	56
800	1,67	198	268	39
900	1,94	287	375	56
1000	2,03	414	398	69

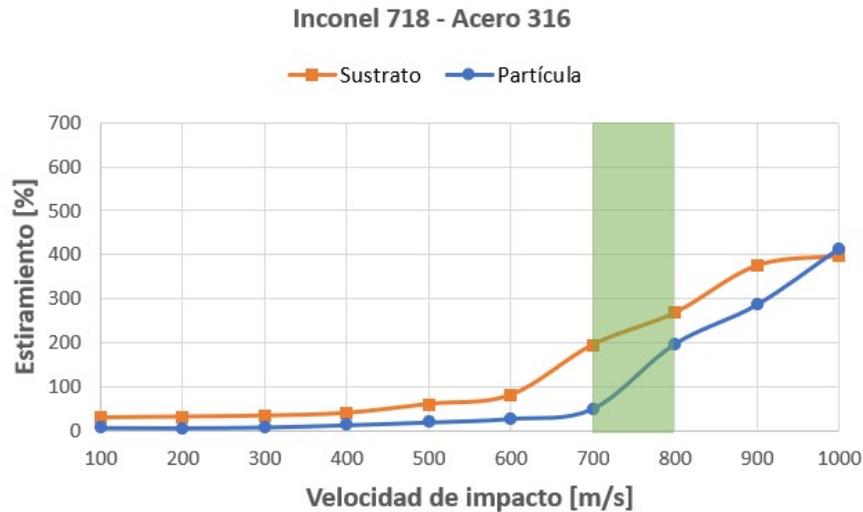
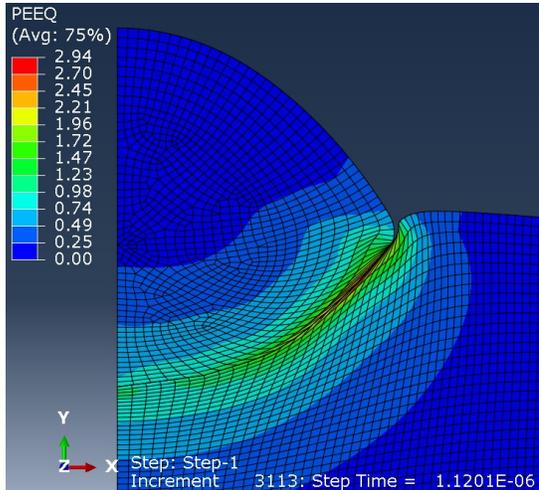


Figura 5.17: Estiramiento Inconel 718 sobre Acero 316.

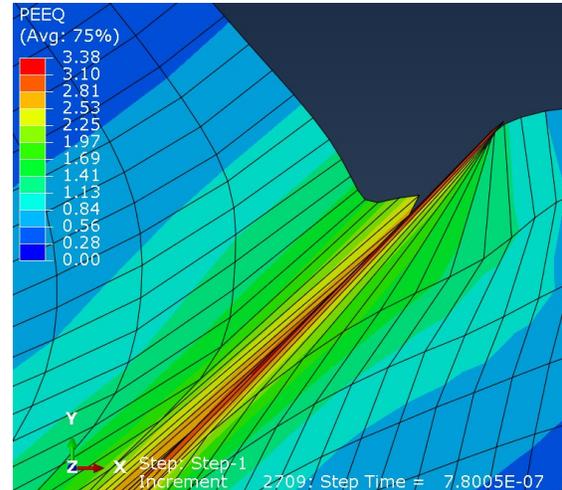
Para este caso, se puede observar en la figura 5.17 que el estiramiento de la partícula es muy bajo en comparación a lo que se ha observado en los casos anteriores. Se vio un aumento importante en el estiramiento de la partícula recién en el impacto a 800 [m/s], y del sustrato en el impacto a 700 [m/s]. También puede notarse que el estiramiento del sustrato fue mayor al de la partícula para todas las velocidades de impacto, menos para los 1000 [m/s]. Esto puede estar ligado a la gran diferencia que hay entre la dureza del Inconel 718 y del Acero 316, siendo la del Inconel 718 mucho mayor, lo que implicaría una mayor dificultad para deformarse plásticamente dado un mismo esfuerzo.

Observando la figura 5.18, se puede notar que los chorros de material de la partícula y del sustrato aparecieron simultáneamente en el impacto a 800 [m/s], lo que podría ser indicativo del comienzo de la aparición de bandas de corte adiabático, basándose en el aumento

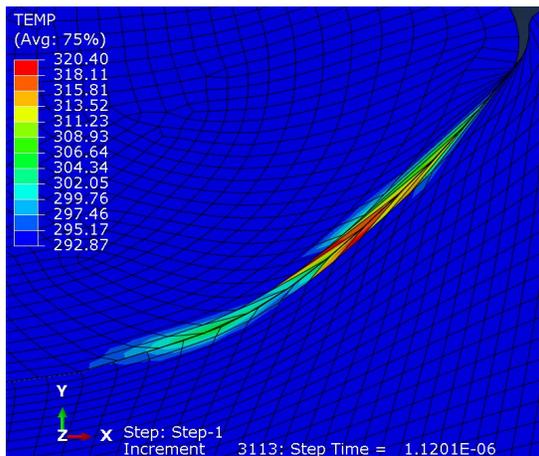
de temperatura localizado observado en la figura 5.18. Adicionalmente, en el impacto a 700 [m/s], se puede observar que el sustrato envolvió levemente a la partícula. Esto sugiere que el mecanismo de entrelazamiento mecánico podría haber actuado a una velocidad menor para lograr la adhesión. Basándose en estas observaciones, la velocidad crítica para esta combinación de materiales estuvo entre los 700 y 800 [m/s], con ambos mecanismos de adhesión siendo un aporte.



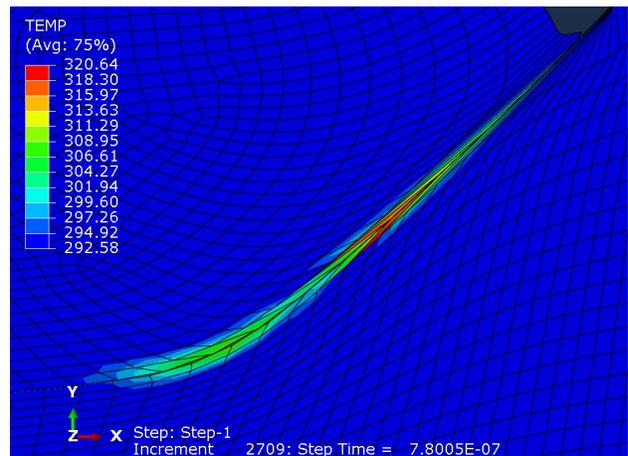
(a) PEEQ a 700 (m/s). Previo a formación de chorros.



(b) PEEQ a 800 (m/s). Aparece chorro en partícula y en sustrato.



(c) Temperatura a 700 (m/s).



(d) Temperatura a 700 (m/s).

Figura 5.18: Impacto de Inconel 718 sobre Acero 316.

Considerando que la velocidad crítica para el Inconel 718 ha sido documentada entre 700 y 800 [m/s], se puede concluir que estos resultados concuerdan con los datos empíricos, y que el mecanismo de adhesión predominante podría variar dependiendo de la velocidad de impacto.

## 5.4.2. Sustrato blando

Tabla 5.8: Resultados para Inconel 718 sobre Al-1100-H12.

Velocidad [m/s]	A. contacto [mm <sup>2</sup> ]	Estiramiento P [%]	Estiramiento S [%]	Frame
100	0,37	7	31	99
200	0,72	15	76	101
300	1,00	12	98	106
400	1,31	18	221	91
500	1,10	6	242	83
600	1,08	5	237	90
700	1,29	46	302	87
800	1,17	42	221	39
900	1,52	122	373	75
1000	2,04	172	534	44

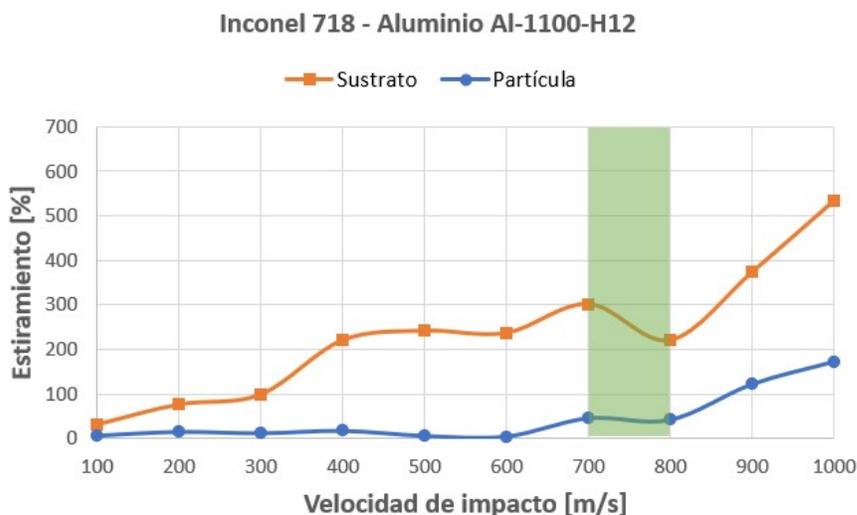


Figura 5.19: Estiramiento Inconel 718 sobre Aluminio Al-1100-H12.

En la tabla 5.8 se puede observar que los valores del área de contacto no tuvieron una tendencia clara, ya que aumentó y disminuyó en los impactos entre los 300 y 800 [m/s]. Por otro lado, si se observa la figura 5.19, se puede notar que el estiramiento de la partícula fue muy bajo para casi todas las velocidades de impacto, y aumentó recién a los 700 [m/s]. Al ver esto, tiene sentido el comportamiento que se ve en el área de contacto: como la partícula se deformó muy poco durante estos impactos, no aumentó el área superficial de esta, como si ocurrió en el sustrato. Por lo tanto, es lógico que el área de contacto se haya mantenido relativamente constante. Esto puede observarse gráficamente en los resultados de la figura 5.20.

La diferencia en la cantidad de estiramiento entre la partícula y el sustrato tiene mucho sentido, ya que la dureza del Inconel 718 es muy superior a la del Aluminio. Esto se ve claramente en la figura 5.19, en la que el estiramiento del sustrato fue superior para la mayoría de las velocidades de impacto.

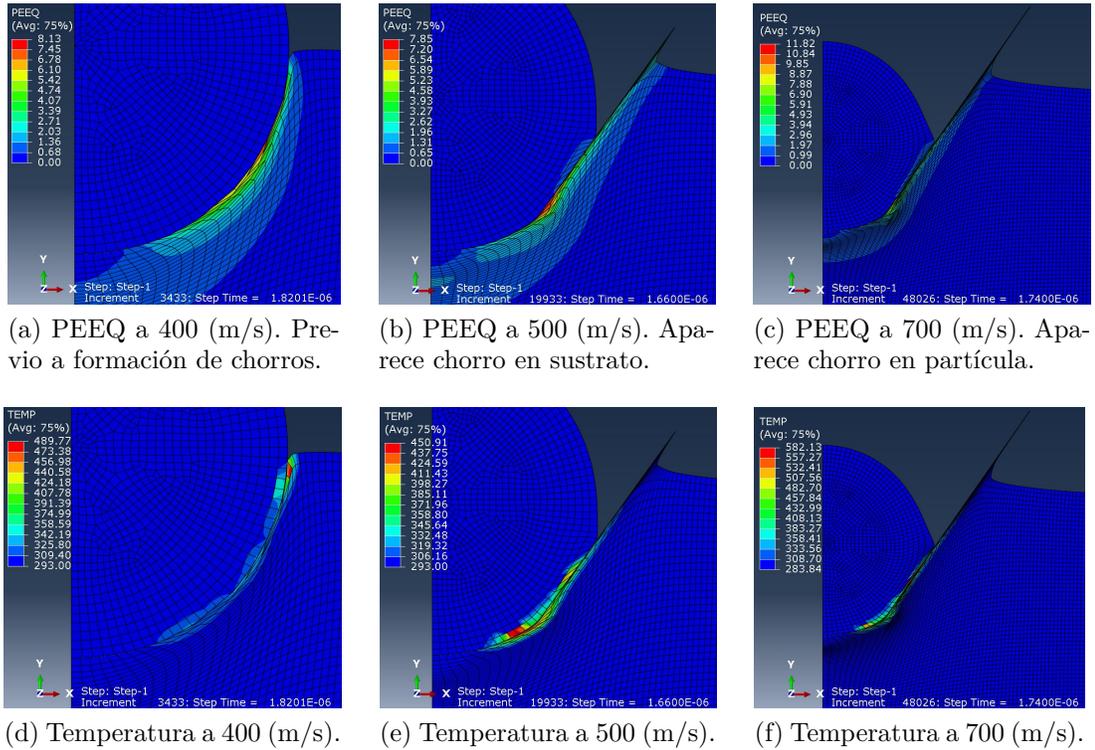


Figura 5.20: Impacto de Inconel 718 sobre Aluminio Al-1100-H12.

Por otro lado, se ve un aumento en el área de contacto relativamente lineal entre los impactos a 800 y 1000 [m/s]. Esto puede estar ligado a la formación del chorro de material a partir de la partícula, que se dio a partir del impacto a 700 [m/s]. La aparición del chorro implica un aumento en el estiramiento de la partícula y en su área superficial, lo que se traduce en un aumento en la superficie que está en contacto en la interfase.

Observando la figura 5.20 (e) y (f), se puede ver un aumento local de temperatura, por lo que se puede suponer que la formación de chorro de material estuvo ligada a inestabilidades de corte adiabático. Basado en esto, la velocidad crítica para la adhesión en esta configuración estuvo entre los 500 y 700 [m/s]. Sin embargo, observando el apartado (a) de la misma Figura, se puede observar que el sustrato envuelve levemente a la partícula a una velocidad más baja (400[m/s]). Por este motivo, la velocidad crítica podría estar en torno a este valor. Estos valores son bastante inferiores a los documentados (700 a 800 [m/s]), lo que podría ser producto de la gran diferencia entre las durezas de ambos materiales.

Similarmente al caso del impacto de Nickel 200 sobre Aluminio, se observó la formación de un chorro de material excesivo en el sustrato a velocidades altas. Nuevamente esto presentó dificultades en la identificación de los últimos nodos en contacto, por lo que puede haber errores en los resultados obtenidos en impactos a velocidades sobre los 700 [m/s].

Al comparar el impacto de Inconel 718 sobre el sustrato duro y el blando, se puede ver que en el sustrato blando la partícula apenas se estiró a bajas velocidades, mientras que en el sustrato duro, la partícula y el sustrato se estiraron en cantidades similares. Basado en esto, el mecanismo de adhesión dominante en el sustrato duro podría ser la unión metálica por la remoción de capas de óxido ligadas al alto estiramiento, mientras que en el sustrato blando podría ser el entrelazamiento mecánico ligado a la alta deformación del sustrato al rededor de la partícula.

## 5.5. Ti-6Al-4V

### 5.5.1. Sustrato duro

Tabla 5.9: Resultados para Ti-6Al-4V sobre Acero 316.

Velocidad [m/s]	A. contacto [mm <sup>2</sup> ]	Estiramiento P [%]	Estiramiento S [%]	Frame
100	0,20	10	9	45
200	0,37	7	31	43
300	0,54	8	33	42
400	0,73	18	46	48
500	0,92	12	51	47
600	1,05	18	58	37
700	1,20	25	80	37
800	1,26	42	127	36
900	1,35	202	168	33
1000	1,77	349	219	44

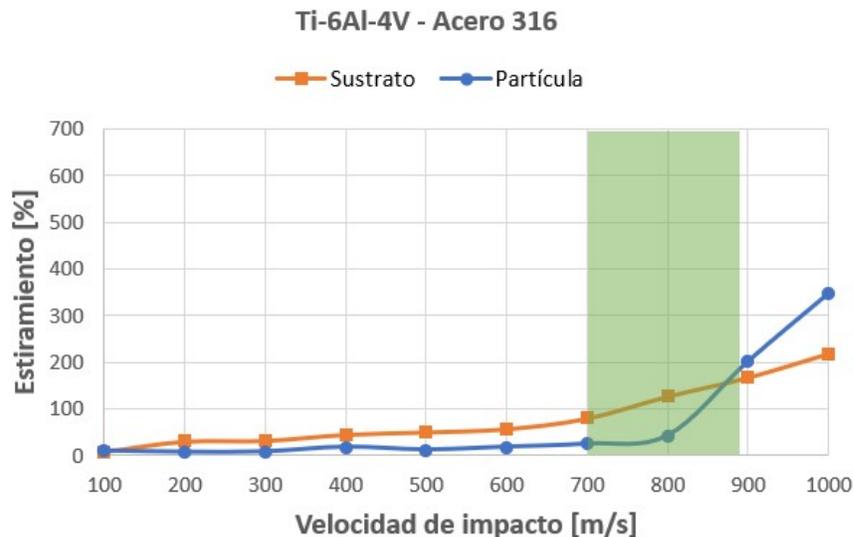


Figura 5.21: Estiramiento Ti-6Al-4V sobre Acero 316.

En el caso de la aleación de Titanio, se puede observar un comportamiento similar al de la partícula de Inconel 718: el estiramiento de la partícula fue muy bajo hasta los 800 [m/s], por debajo de el del sustrato, lo que puede observarse en la tabla 5.9. Esto tiene sentido considerando que la dureza de la aleación de Titanio es bastante superior a la del Acero 316, y tiene un valor cercano a la dureza del Inconel 718.

También puede notarse en la tabla 5.9 que el área de contacto registrada alcanzó valores más bajos que en casos anteriores. Esto puede estar ligado a la baja deformación que experimentó la partícula, lo que resultó en la ausencia de chorro de material y, en consecuencia, una menor área superficial disponible para hacer contacto. En contraste, se puede ver un aumento notorio en el área de contacto en el impacto a 1000 [m/s], que coincide con el aumento en el estiramiento de la partícula y la aparición de chorro de material.

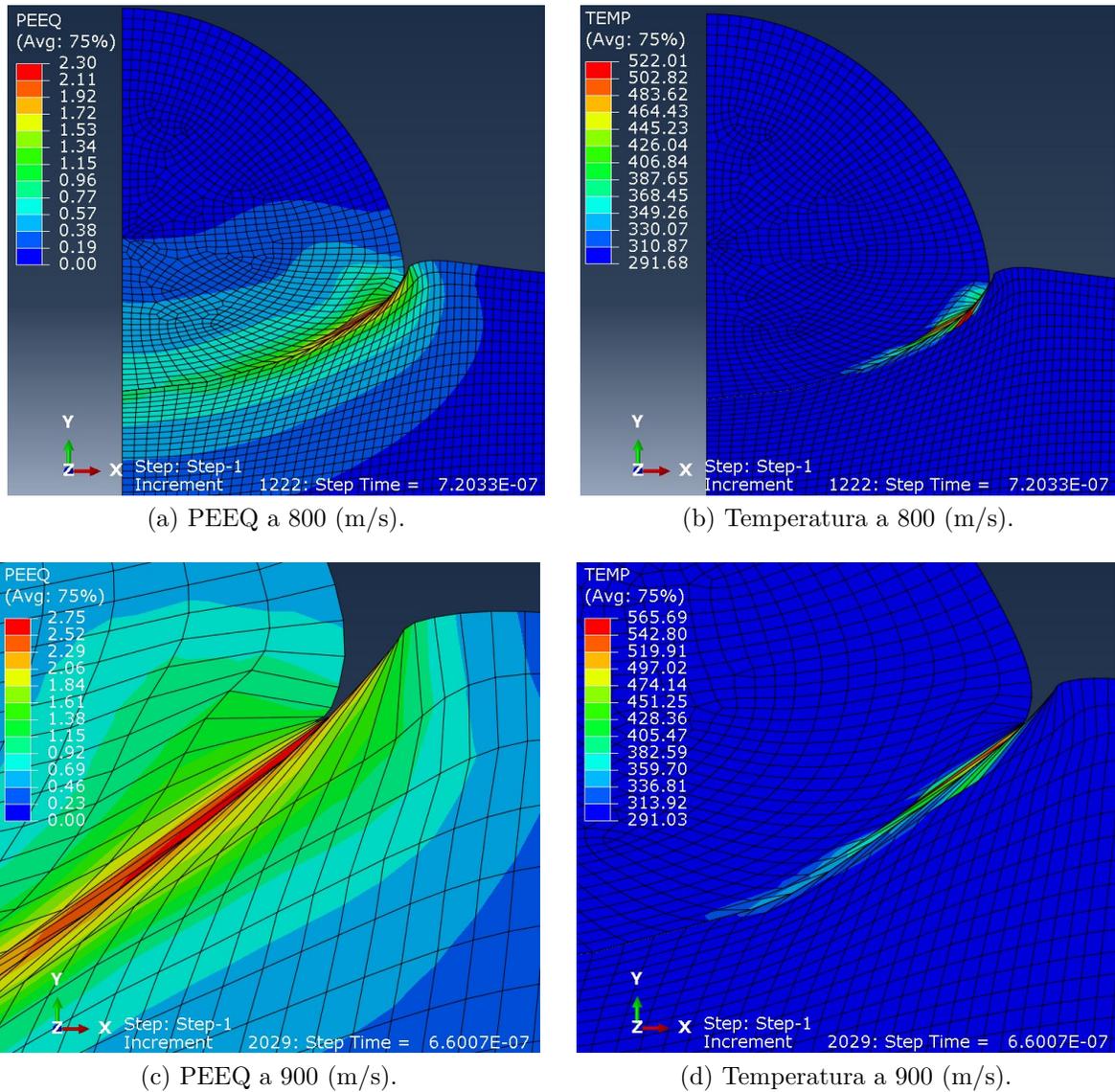


Figura 5.22: Impacto de Ti-6Al-4V sobre Acero 316.

En la figura 5.22 (a) se puede observar que el sustrato envolvió levemente a la partícula en el impacto a 800 [m/s] (igual que en el caso del Inconel 718) mientras que se empezó a formar un pequeño chorro en la partícula en el impacto a 900 [m/s]. Esto podría ser indicativo de que, similarmente, el mecanismo de adhesión de entrelazamiento mecánico puede jugar un rol importante a velocidades previas a la formación del chorro, ya que el estiramiento de la superficie tanto de la partícula como del sustrato no son tan elevados.

Observando la figura 5.22 (b) y (d), se puede notar que hubo un aumento de temperatura local en la interfase, lo que puede ser indicativo de que la alta deformación observada desde el impacto a 900 [m/s] se debe a inestabilidades de corte adiabático. Considerando esto y el punto anterior, la velocidad crítica para esta configuración estuvo entre 800 y 900 [m/s]. Esto se encuentra dentro del rango experimental (700 a 890 [m/s]), como se puede observar en la figura 5.21, lo que apoya la idea de que, en este caso, es necesario el estiramiento de ambas partes para que ocurra la adhesión por medio de la remoción de las capas de óxido superficiales.

## 5.5.2. Sustrato blando

Tabla 5.10: Resultados para Ti-6Al-4V sobre Aluminio Al-1100-H12.

Velocidad [m/s]	A. contacto [mm <sup>2</sup> ]	Estiramiento P [%]	Estiramiento S [%]	Frame
100	0,28	8	30	73
200	0,53	6	45	62
300	0,85	4	88	68
400	1,07	4	137	69
500	0,83	2	194	70
600	1,12	1	248	72
700	0,87	-2	170	54
800	1,01	13	213	48
900	0,95	-2	161	34
1000	1,09	13	239	25

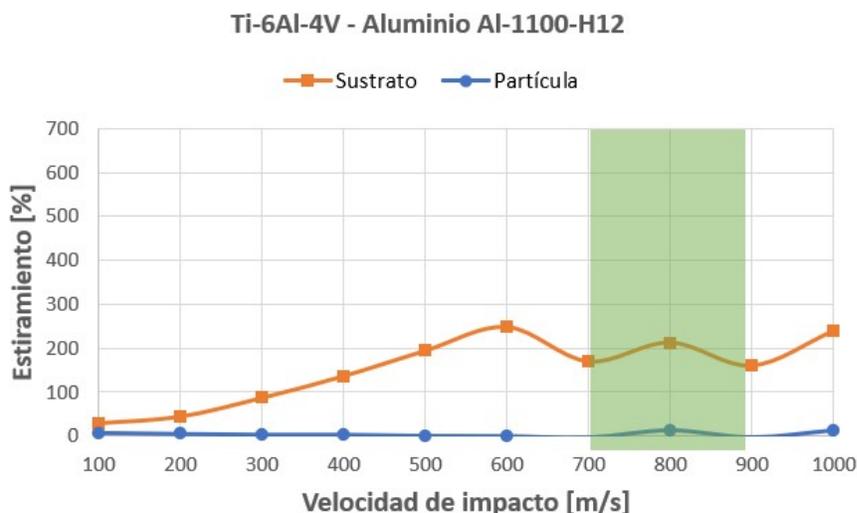
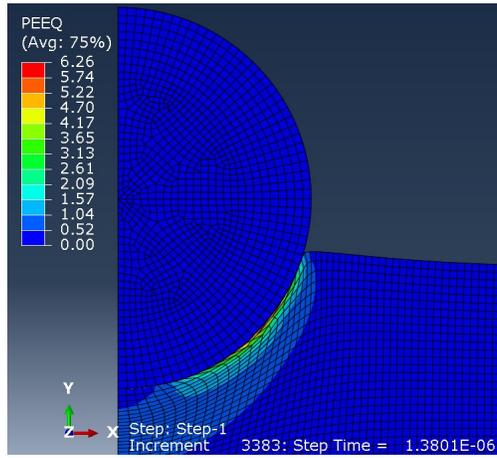


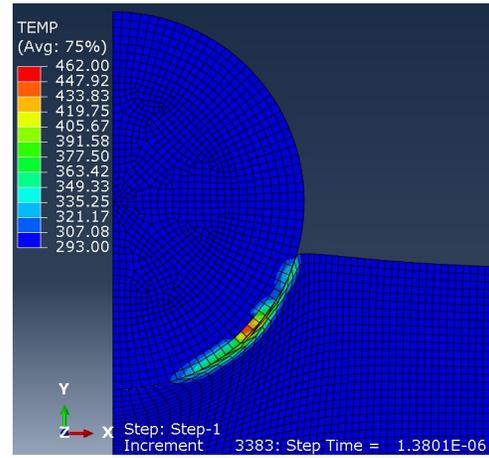
Figura 5.23: Estiramiento Ti-6Al-4V sobre Aluminio Al-1100-H12.

Este caso destaca por ser el que presenta la mayor diferencia entre las durezas de la partícula y el sustrato, lo que presentó varios problemas al momento de obtener los resultados. En primer lugar, se puede observar en la tabla 5.10 que el área de contacto no tuvo una tendencia clara en su comportamiento, a diferencia de otros casos. Adicionalmente, en la Figura 5.23, se puede ver que el estiramiento del sustrato fue muy superior al de la partícula. Viendo los valores del estiramiento de la partícula en la tabla 5.10, se notan muy pequeñas variaciones, incluso alcanzando algunos valores negativos. Es posible suponer que que estas pequeñas variaciones se deben a errores en la medición, y que la superficie de la partícula no logró estirarse en las velocidades de impacto utilizadas.

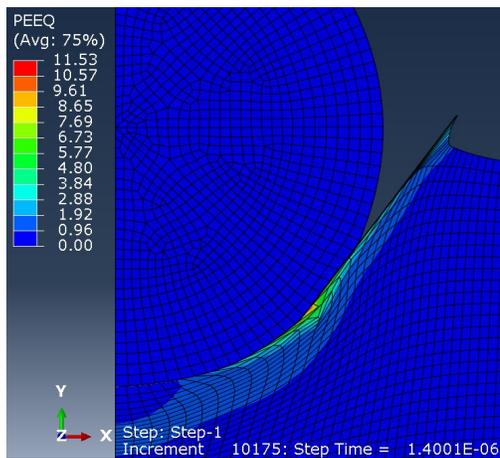
En la figura 5.24 se puede observar que la partícula apenas se deformó en los impactos a 400 y 500 [m/s], y en el apartado (c) se puede ver que se comenzó a formar el chorro de material en el sustrato a partir del impacto a 500 [m/s].



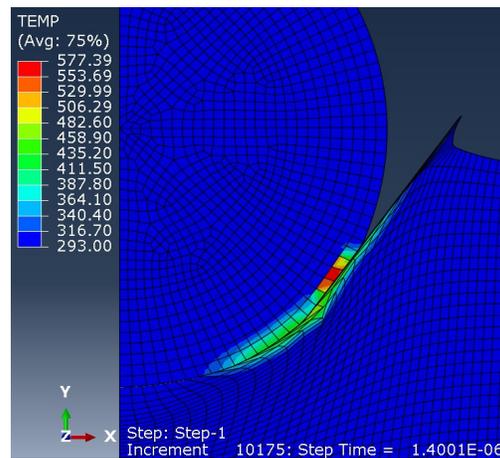
(a) PEEQ a 400 (m/s). Previo a formación de chorro.



(b) Temperatura a 400 (m/s).

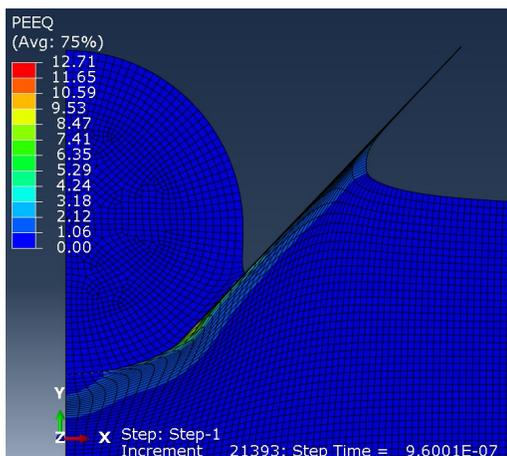


(c) PEEQ a 500 (m/s). Aparece chorro en sustrato.

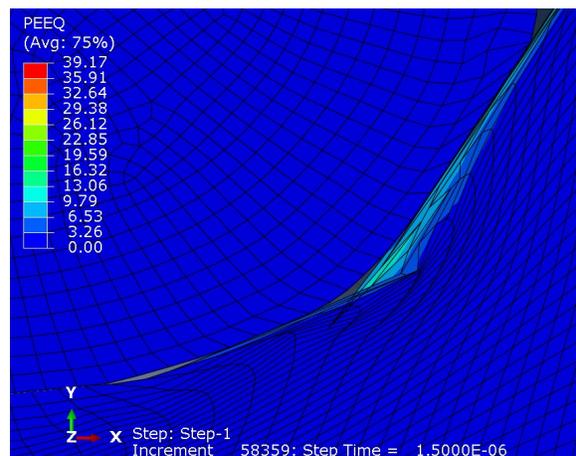


(d) Temperatura a 500 (m/s).

Figura 5.24: Impacto de Ti-6Al-4V sobre Aluminio Al-1100-H12.



(a) PEEQ a 800 (m/s).



(b) PEEQ a 900 (m/s).

Figura 5.25: Deformación excesiva de elementos en el sustrato para el impacto de Ti-6Al-4V sobre Aluminio Al-1100-H12.

Lamentablemente, no se obtuvieron buenos resultados a velocidades más altas (por sobre los 600 [m/s]), debido a la excesiva deformación que experimentaron los elementos del sustrato. Hubo excesiva separación con los elementos de la partícula debido a la sobreposición de elementos en el sustrato, ligados a la excesiva deformación, lo que puede observarse en la figura 5.25 (b). Adicionalmente, se formó un chorro de material con forma poco realista, como se puede ver en el apartado (a) de la misma Figura. Esto llevó a la obtención de resultados poco confiables para el área de contacto (lo que podría explicar la falta de una tendencia clara en su comportamiento que se mencionó anteriormente), y a una gran dificultad para identificar los últimos nodos en contacto en el sustrato. Estos factores pueden explicar el comportamiento de la curva en la Figura 5.23 pasados los 600 [m/s], en donde se ve una disminución y alza en el valor del estiramiento de la superficie del sustrato.

Basado en estos resultados, no es claro cual fue la velocidad crítica para esta configuración, ya que no se observa entrelazamiento mecánico previo a la formación del chorro de material en el sustrato, y el estiramiento de la partícula fue muy bajo como para suponer que se removió su capa de óxido para permitir la formación de enlaces metálicos. Sin embargo, no se puede descartar que haya adhesión para esta combinación de materiales, ya se ha visto adhesión en casos con alta deformación en el sustrato y muy baja o nula deformación en la partícula [5]. Basado en esto, es posible que la formación del chorro a partir del sustrato y el sucesivo desplazamiento de material de alguna manera erosione la superficie de la partícula, removiendo la capa de óxido y permitiendo la formación de enlaces metálicos.

## 5.6. Acero 316

### 5.6.1. Sustrato duro

Tabla 5.11: Resultados para Acero 316 sobre Acero 316.

Velocidad [m/s]	A. contacto [mm <sup>2</sup> ]	Estiramiento P [%]	Estiramiento S [%]	Frame
100	0,29	8	17	93
200	0,57	6	14	54
300	0,89	30	24	63
400	1,13	27	33	63
500	1,40	46	53	68
600	1,65	59	80	69
700	1,75	181	285	71
800	2,10	275	416	79
900	2,18	289	436	42
1000	2,23	260	594	37

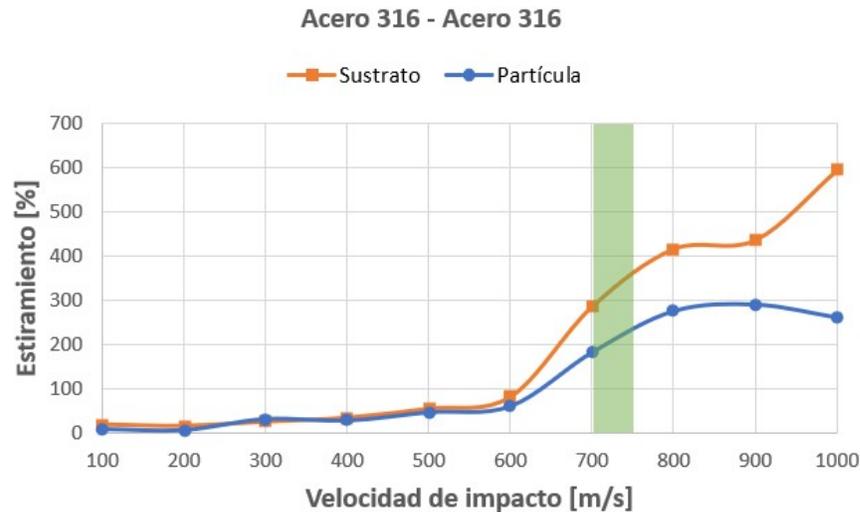
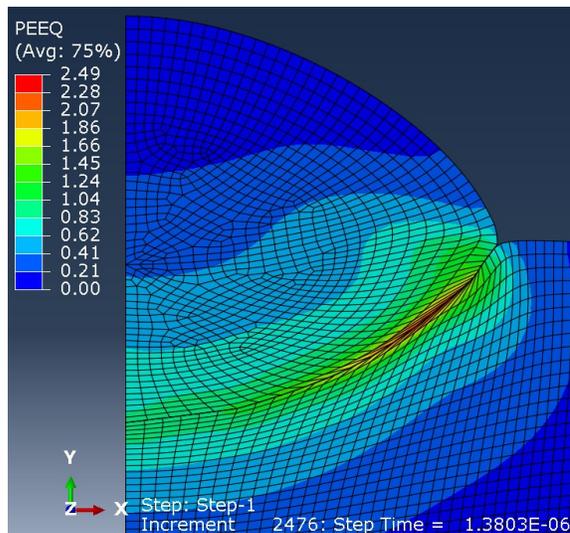


Figura 5.26: Estiramiento Acero 316 sobre Acero 316.

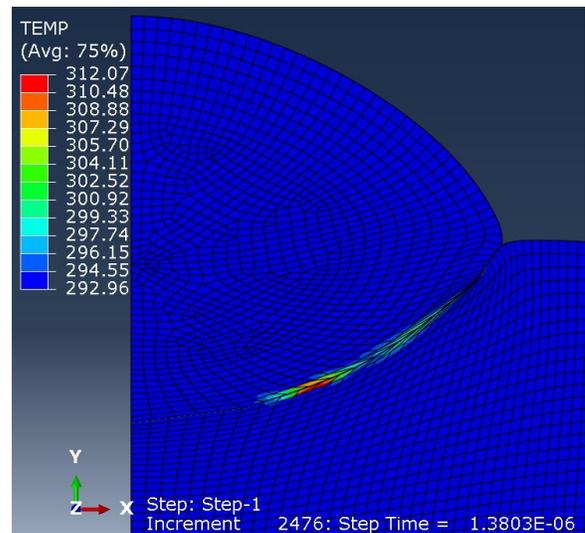
En la tabla 5.11 se puede observar que el área de contacto aumentó de forma constante junto con la velocidad de impacto. Esto tiene sentido, ya que al aumentar la velocidad, aumenta la deformación y el estiramiento de las partes, lo que hace posible tener una mayor área de contacto.

Por otro lado, en la figura 5.26, se puede ver que el estiramiento fue muy similar para la partícula y el sustrato hasta el impacto a 600 [m/s], y hubo un alza desde los 700 [m/s] (de manera muy similar al caso del impacto de Aluminio sobre Aluminio). Esta alza coincide con la formación de chorros de material tanto en la partícula como en el sustrato, como puede observarse en la figura 5.27 (c), mientras que en (a) puede verse la deformación previa a la formación de chorros en el impacto a 600 [m/s]. La similitud en el porcentaje de estiramiento entre la partícula y el sustrato puede estar ligada a que, en este caso, están

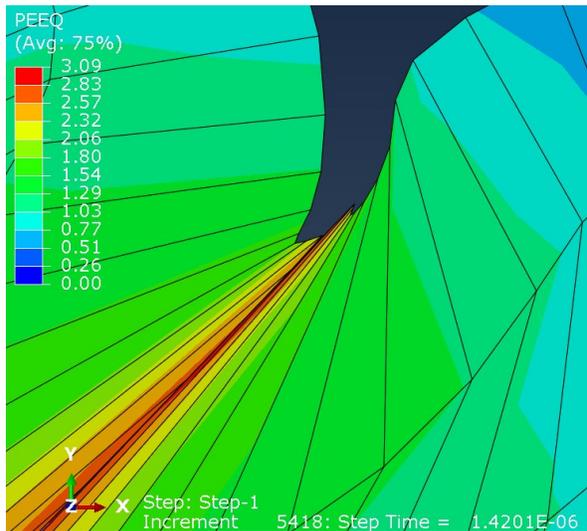
conformados por el mismo material, por lo que es de esperar que tengan comportamientos parecidos (al igual que en el caso del Aluminio sobre Aluminio).



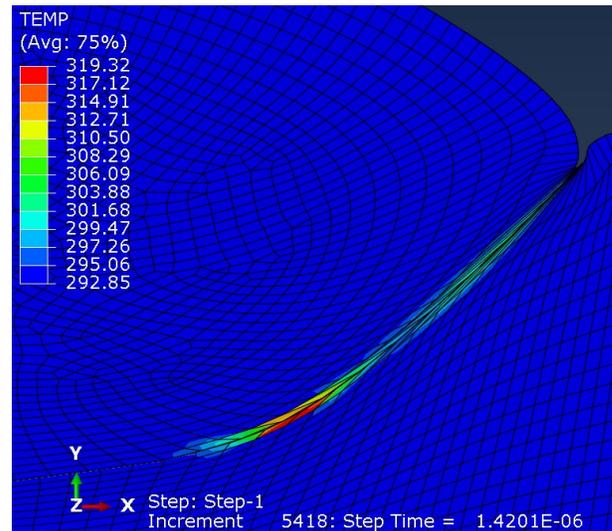
(a) PEEQ a 600 (m/s).



(b) Temperatura a 600 (m/s).



(c) PEEQ a 700 (m/s). Aparece chorro en partícula y sustrato.



(d) Temperatura a 700 (m/s).

Figura 5.27: Impacto de Acero 316 sobre Acero 316.

En la figura 5.27 (b) y (d) se puede observar que hubo aumento de temperatura local en la interfase, lo que podría indicar, junto con la excesiva deformación, la aparición de bandas de corte adiabático. Adicionalmente, en el apartado (c) de esta Figura se puede ver un leve envolvimiento de la partícula por el sustrato. Basado en estos dos puntos, se puede suponer que la velocidad crítica para esta configuración estuvo entre los 600 y 700 [m/s], lo que es muy cercano a los resultados observados en la bibliografía (700 a 750 [m/s]). En este caso, el mecanismo de adhesión predominante sería la formación de enlaces metálicos gracias a la remoción de la capa de óxido superficial, y ocurriría una vez que se alcanza el estiramiento suficiente en la partícula y en el sustrato.

## 5.6.2. Sustrato blando

Tabla 5.12: Resultados para Acero 316 sobre Aluminio Al-1100-H12.

Velocidad [m/s]	A. contacto [mm <sup>2</sup> ]	Estiramiento P [%]	Estiramiento S [%]	Frame
100	0,37	8	16	103
200	0,73	18	45	60
300	1,10	14	98	100
400	1,35	14	197	103
500	1,44	14	218	94
600	1,75	47	609	91
700	1,78	137	528	86
800	1,59	184	462	51
900	1,13	64	250	56
1000	1,19	59	228	21

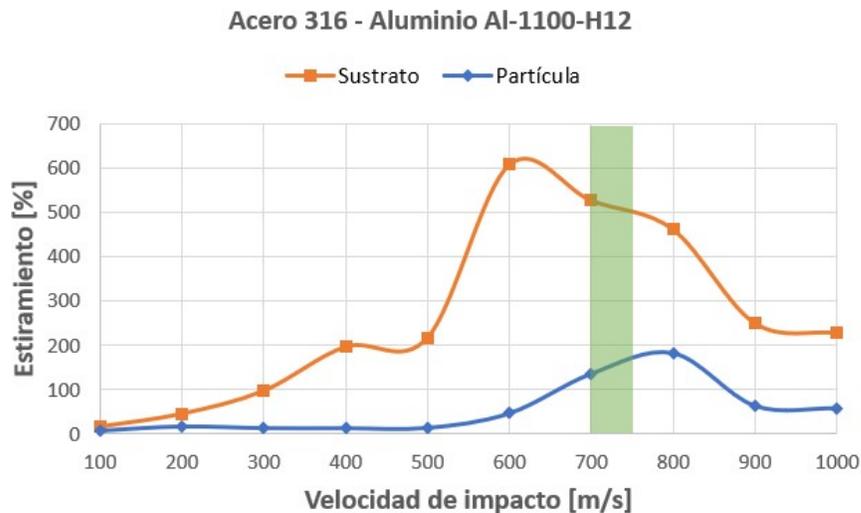


Figura 5.28: Estiramiento Acero 316 sobre Aluminio Al-1100-H12.

En la tabla 5.12 se puede ver que el área de contacto aumentó con la velocidad de impacto hasta los 700 [m/s], y luego disminuyó notablemente en los impactos a 900 y 1000 [m/s]. Esto se debe a leves separaciones entre los elementos de la partícula y el sustrato, como se vio también en casos anteriores. Debido a esto, y a que no se vio un crecimiento notorio en el chorro de material de la partícula a velocidades más altas, se observa una caída en los valores del porcentaje de estiramiento de la partícula y del sustrato en la figura 5.28 en los impactos a 900 y 1000 [m/s].

También se puede observar en esta tabla un gran aumento en el estiramiento del sustrato en el impacto a 600 [m/s]. Este aumento está ligado a la formación del chorro de material a partir de esa velocidad, como se puede observar en la figura 5.29 (b). A velocidades más bajas (menores a 500 [m/s]) no se observó un envolvimiento de la partícula por parte del sustrato, como puede notarse en el apartado (a) de la misma Figura. Estos factores, junto con los aumentos de temperatura locales observados en la figura 5.29 (d), (e) y (f), apuntan a que el

mecanismo de adhesión dominante en este caso podría ser la formación de enlaces metálicos por la remoción de la capa externa de óxido, ligada al gran estiramiento de la partícula y del sustrato por inestabilidades de corte adiabático.

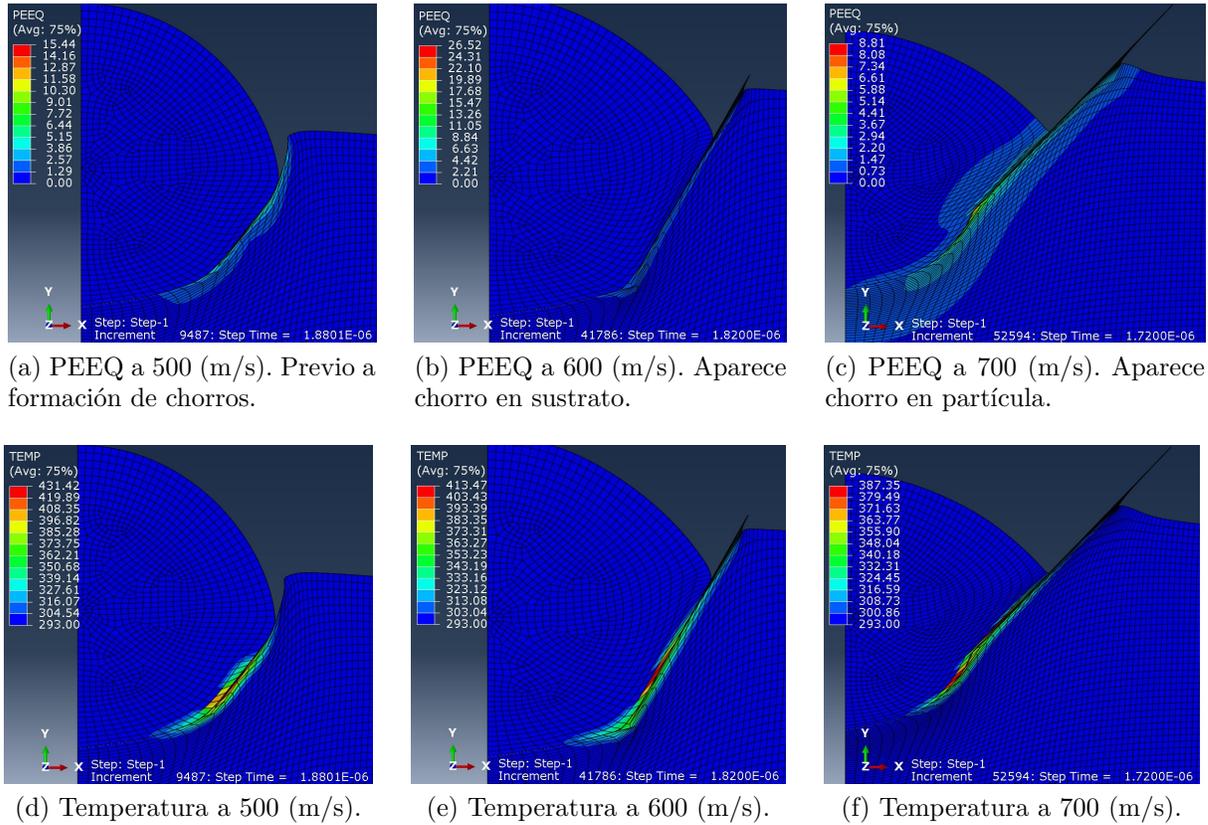


Figura 5.29: Impacto de Acero 316 sobre Aluminio Al-1100-H12.

Esta conclusión se soporta además en la aparición de un pequeño chorro de material que se formó a partir de la partícula desde el impacto a 700 [m/s], como se puede observar en la figura 5.29 (c). Sin embargo, este chorro no aumentó notoriamente su tamaño a velocidades de impacto más altas, como se mencionó anteriormente. Por lo tanto, es posible que el estiramiento no haya sido el suficiente como para remover una porción significativa de la capa de óxido de la partícula.

Basándose en estas observaciones, la velocidad crítica para esta combinación de materiales podría estar entre los 600 y 700 [m/s], ya que entre estas velocidades ocurre el alza del estiramiento de la partícula, lo que permitiría la remoción de su capa de óxido. Nuevamente, estos valores se encuentran muy cercanos a los vistos en la bibliografía.

## 5.7. Observaciones generales

En esta sección se analizan puntos que involucran a todos los resultados, con el objetivo de evitar la repetición excesiva de información.

El primer punto a analizar se relaciona con las velocidades críticas obtenidas y cómo estas se relacionan con los valores que se han observado experimentalmente, además de los mecanismos de adhesión que están actuando en cada caso. En general, se vio una gran concordancia entre los resultados obtenidos para la velocidad crítica y los valores experimentales citados, especialmente en los casos en que no hubo una gran diferencia entre las durezas del sustrato y la partícula. Para estos casos, se vio que la velocidad crítica experimental fue en general un poco mayor que las velocidades de impacto en las que se formó un chorro de material en la partícula y el sustrato. Lo anterior tiene sentido si se considera la diferencia de tamaño entre las partículas que se utilizan experimentalmente y las simuladas en esta memoria, ya que se ha visto que la velocidad crítica disminuye al aumentar el tamaño de las partículas [9].

Esto permite suponer que, en la mayoría de los casos estudiados, para que ocurra adhesión, deben estirarse las superficies de la partícula y del sustrato lo suficiente para que se remueva la capa superficial de óxido en ambos simultáneamente y que puedan entrar en contacto los metales para formar sus enlaces. Según los resultados obtenidos, el estiramiento superficial necesario para lograr la adhesión es entre un 150 % y 300 %, ya que el chorro de material se formó entre estos rangos de estiramiento. Bajo esta suposición, la adherencia no ocurriría en los casos en que el estiramiento suficiente es alcanzado sólo por una de las partes. Sin embargo, como fue mencionado anteriormente, se ha observado adherencia experimentalmente en casos en que se tiene un gran estiramiento superficial solamente del sustrato. Con esta información se podría formar la hipótesis de que, en estos casos en que el estiramiento de una parte es mucho mayor que el de la otra, es posible que la alta deformación del sustrato y la subsecuente formación del chorro de material permita de alguna manera erosionar la superficie de la partícula mientras el material es expulsado hacia la periferia de la interfase, removiendo de esta manera un porcentaje suficiente de la capa de óxido superficial de la partícula y permitiendo la formación de los enlaces metálicos (lo que podría observarse, en esta memoria, en los casos del impacto de Ti-6Al-4V e Inconel 718 sobre el sustrato blando).

A pesar de que se supone que la velocidad crítica calza con la velocidad de impacto a la que suceden las inestabilidades de corte adiabático, también se observó entrelazamiento mecánico entre la partícula y el sustrato en algunos casos (específicamente, en los impactos de Inconel 718 y Ti-6Al-4V sobre el sustrato duro, y Cobre y Nickel sobre el sustrato blando). Observando la tabla 5.13, se puede ver que en estos casos se tienen relaciones muy parecidas entre las durezas de la partícula y del sustrato (entre 2 y 4), por lo que puede suponerse que el hecho de que se haya o no entrelazamiento mecánico podría depender de la diferencia entre las durezas de la partícula y el sustrato. Basado en esto, sería interesante estudiar más casos en que las relaciones entre las durezas estén dentro del mismo rango para comprobar esta idea, ya que esto podría permitir optimizar los parámetros de deposición utilizando velocidades menores para los casos en que el entrelazamiento mecánico sea predominante.

Tabla 5.13: Relaciones de durezas Brinell entre partículas y sustratos.

	Acero 316	Al-1100-H12
Al-1100-H12	0.19	1
Cu	0.60	3.18
Ni 200	0.67	3.57
Inconel 718	2.21	11.75
Ti-6Al-4V	2.24	11.93
Acero 316	1	5.32

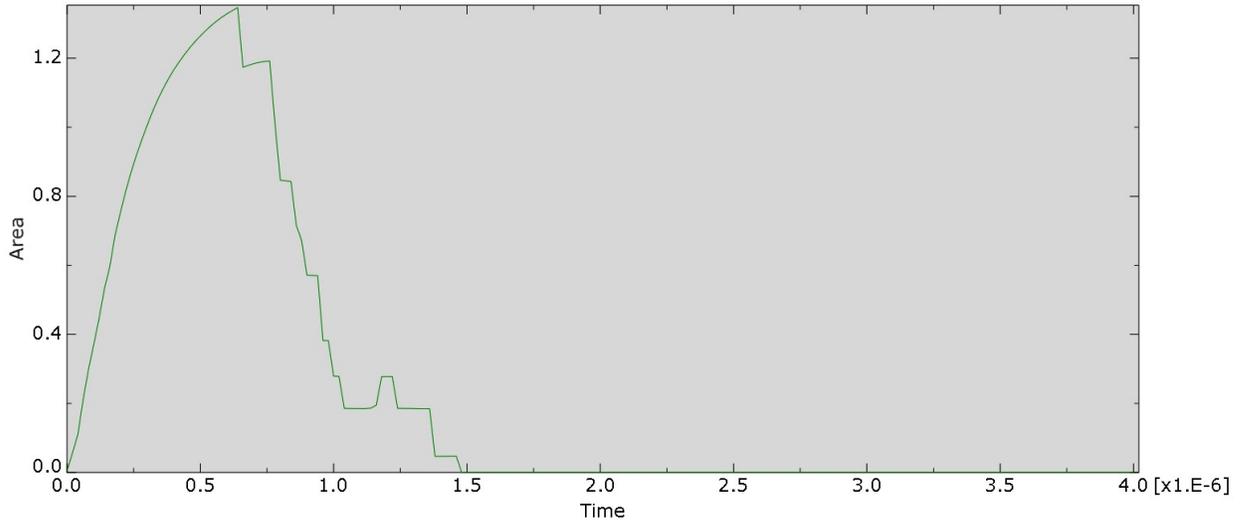
Otro de los puntos a discutir es el comportamiento de la temperatura de los elementos a través de todas las simulaciones. Observando las Figuras en las que se muestra la distribución de temperatura para cada uno de los impactos, se puede notar que en ningún caso se alcanzó la temperatura de fusión de los materiales utilizados, lo que se alinea con lo esperado considerando que se buscó simular las condiciones de Cold Spray. En estos casos, el derretimiento del material no se debe a un aumento de temperatura, si no que está asociado a las altas tasas de deformación que se alcanzaron en estas simulaciones: la entalpía necesaria para la fusión se alcanza mediante la rápida transferencia de energía cinética. [5]

Otro punto a analizar es el cambio en la tasa de deformación al aumentar la velocidad de impacto. Revisando las tablas presentadas en cada sección, se puede observar que, en general, los cuadros desde los que se tomaron los datos fueron disminuyendo a medida que aumentó la velocidad de impacto. Esto quiere decir que el valor máximo para el área total de contacto se alcanzó más rápidamente a velocidades más altas, lo que es indicativo de una mayor tasa de deformación.

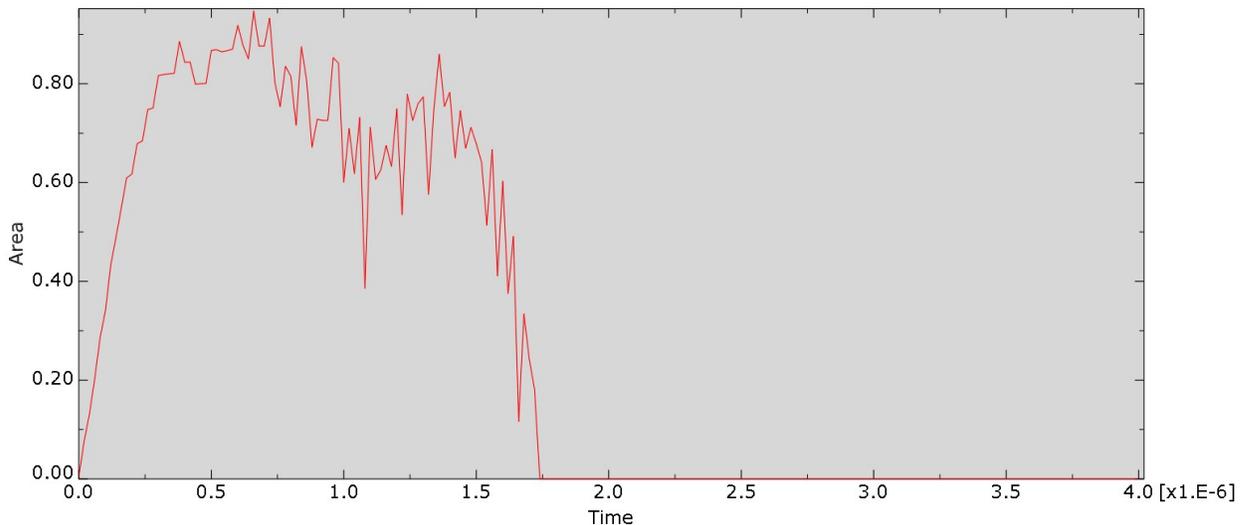
También debe comentarse la variación que hubo en la calidad de los resultados obtenidos. En general, se obtuvieron buenos resultados para aquellas combinaciones de materiales en las que no había una gran diferencia entre sus durezas (como los casos del Titanio, Inconel 718, Acero 316 y Nickel sobre el sustrato duro), ya que esto permitió que no existiera una excesiva deformación de los elementos durante las simulaciones. En cambio, en casos con gran diferencia entre la dureza del sustrato de la partícula, existió deformación excesiva de elementos, en especial en impactos a velocidades más altas. Esto se tradujo en varios problemas para la toma de datos.

En primer lugar, la excesiva deformación de elementos significó una gran dificultad para obtener valores del área total de contacto que fueran reales, ya que se produjeron pequeñas separaciones a lo largo de la interfase. Debido a esto, en estos casos con excesiva deformación, se obtuvieron gráficos de área total de contacto como el que se ve en la figura 5.30 (b). Aquí se puede ver una gran variación en los valores del área de contacto a lo largo de la simulación y, a pesar de que se puede identificar un máximo, no es claro si este valor corresponde al máximo real previo a la separación de la partícula. En cambio, en la figura 5.30 (a) se ve un claro máximo alcanzado en el instante justo antes de que comience la separación de la partícula. Esto conduce a posibles errores en el cálculo del estiramiento de las partículas y de los sustratos para los casos en que la deformación es excesiva.

Otra consecuencia de la excesiva deformación de los elementos en la interfase es que, debido a la naturaleza discreta del mallado, se dificultó la identificación de los últimos nodos en contacto entre la partícula y el sustrato. Esto implica posibles errores en el cálculo del estiramiento del área superficial, ya que es necesaria una correcta identificación de estos nodos para calcular el área superficial previa al comienzo del impacto. Es posible disminuir los efectos de este problema al usar un tamaño de malla aún más pequeño en la periferia de la partícula y del sustrato, aunque esto puede implicar un aumento significativo en los tiempos de cálculo.



(a) Buen gráfico. Impacto Ti-6Al-4V sobre Acero 316 a 900 (m/s).

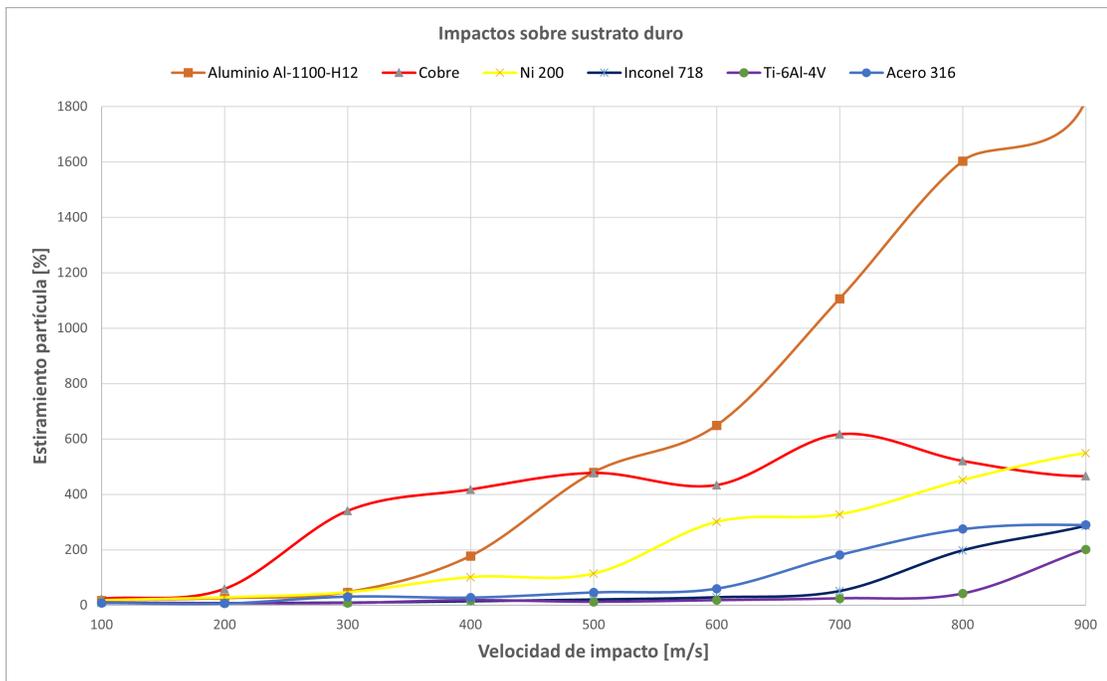


(b) Mal gráfico. Impacto Ti-6Al-4V sobre Aluminio Al-1100-H12 a 900 (m/s).

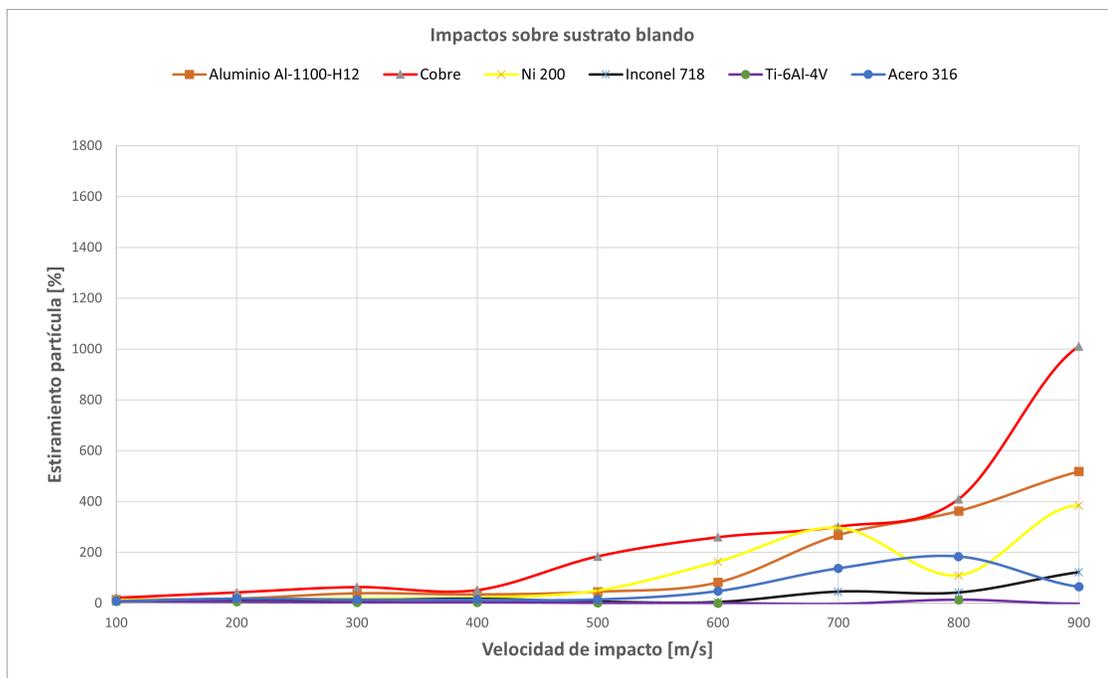
Figura 5.30: Ejemplos de gráficos obtenidos para área total de contacto.

Un último punto que vale la pena analizar es una comparación entre los impactos en el sustrato duro y en el sustrato blando. En la figura 5.31, se puede ver el estiramiento de todas las partículas sobre el sustrato duro y el sustrato blando. Viendo ambos gráficos, se puede ver que el estiramiento de las partículas sobre el sustrato duro tuvo un comportamiento esperable según las durezas de los materiales: el que presentó el mayor estiramiento fue el Aluminio, seguido del Cobre, Nickel 200, Acero 316, Inconel 718 y Titanio. En contraste, el

estiramiento de las partículas sobre el sustrato blando no muestra el mismo comportamiento de forma clara: el Aluminio se deformó menos que el cobre y el Nickel 200 a velocidades bajas, por ejemplo. Adicionalmente, se ven alzas y descensos en el estiramiento a velocidades altas. Esto puede ser indicativo de los errores mencionados anteriormente, que se vieron magnificados en los impactos sobre el sustrato blando.



(a) Impacto en sustrato duro.



(b) Impacto en sustrato blando.

Figura 5.31: Comparación del estiramiento de las partículas.

# Capítulo 6

## Conclusiones

Se logró cumplir el objetivo de esta memoria, ya que se desarrolló un modelo para el impacto de partículas a alta velocidad que permitió obtener buenos resultados respecto al estiramiento superficial de las partículas y del sustrato luego del impacto. En particular, se logró obtener muy buenos resultados para aquellos casos en que hubo poca diferencia entre las durezas de la partícula y el sustrato, evitando la deformación excesiva de elementos. Para los impactos sobre el sustrato blando, donde había mayor diferencia de durezas, se obtuvieron buenos resultados para bajas velocidades, antes de que ocurriera deformación excesiva.

En todos los casos, se observó un aumento en el estiramiento superficial tanto de la partícula como del sustrato al aumentar las velocidades de impacto. Adicionalmente, se observó que la temperatura de los elementos en la interfase nunca superó la temperatura de fusión de los materiales utilizados, confirmando que no hay derretimiento por temperatura.

En todas las combinaciones de partícula y sustrato, se encontraron velocidades a partir de las cuales se formaron chorros de material en la partícula y/o el sustrato, lo que está en acuerdo con la bibliografía consultada, y ayuda a respaldar el argumento de que las inestabilidades de corte adiabático pueden ser clave en la mayoría de los casos para poder remover la capa de óxido superficial de las partes y lograr una buena adhesión mediante la formación de enlaces metálicos. En algunos casos, se observó la formación de un entrelazamiento mecánico, en el que el sustrato envolvió levemente la partícula. Se encontró que la ocurrencia de uno u otro mecanismo de adhesión puede estar ligada a la relación entre las durezas de la partícula y el sustrato.

En aquellos casos en que la formación de bandas de corte adiabático se identificó como el principal aporte a la adhesión, se vio que las velocidades críticas observadas experimentalmente calzan con las velocidades en las que se alcanzó entre un 150 % y un 300 % de estiramiento superficial en la partícula y/o en el sustrato. Sin embargo, debe notarse que el porcentaje de estiramiento necesario podría ser menor, ya que se ha visto que la velocidad crítica disminuye al aumentar el tamaño de las partículas, y las partículas modeladas en esta memoria tienen un tamaño bastante superior a las utilizadas en Cold Spray.

A pesar de los buenos resultados, se presentaron problemas con la deformación excesiva de elementos en algunos casos, como fue mencionado anteriormente. Se proponen algunas formas de contrarrestar estos problemas en futuros trabajos:

- Definir una malla más fina en el borde externo de la partícula y el sustrato, para lograr una mejor identificación de los últimos nodos en contacto.
- Modelar daño material para que los elementos que se deformen excesivamente se eliminen.
- Utilizar materiales con durezas más similares.

Para finalizar, se proponen algunos temas que podrían ser de interés para próximos estudios:

- Evaluar forma y tamaño de los chorros de material formados según distintas combinaciones de materiales.
- Evaluar la deformación de una partícula blanda y una dura utilizando distintos materiales como sustrato.
- Estudiar deformación de partículas y sustratos con relaciones de dureza similares para evaluar la formación de entrelazamiento mecánico.

# Bibliografía

- [1] Champagne, V. (2007). The cold spray materials deposition process.
- [2] Assadi, H., Gärtner, F., Stoltenhoff, T. and Kreye, H. (2003). Bonding mechanism in cold gas spraying. *Acta Materialia*, 51(15), pp.4379-4394.
- [3] Hussain, T., McCartney, D., Shipway, P. and Zhang, D. (2009). Bonding Mechanisms in Cold Spraying: The Contributions of Metallurgical and Mechanical Components. *Journal of Thermal Spray Technology*, 18(3), pp.364-379.
- [4] J. Bedoya, N. Cinca, and J. M. Guilemany. 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*, 49(3):223–236, 2013.
- [5] Cavaliere, P. (2018). Cold-spray Coatings: Recent Trends and Future Perspectives.
- [6] Ito, K., Ichikawa, Y. and Ogawa, K. (2016). Experimental and Numerical Analyses on the Deposition Behavior of Spherical Aluminum Particles in the Cold-Spray-Emulated High-Velocity Impact Process. *MATERIALS TRANSACTIONS*, 57(4), pp.525-532.
- [7] Gilmore, D., Dykhuizen, R., Neiser, R., Roemer, T. and Smith, M. (1999). Particle Velocity and Deposition Efficiency in the Cold Spray Process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 8(4), pp.576-582.
- [8] Li, C., Li, W., Liao, H. (2006). Examination of the Critical Velocity for Deposition of Particles in Cold Spraying. *Journal Of Thermal Spray Technology*, 15(2), pp.212-222.
- [9] Schmidt, T., Gärtner, F., Assadi, H. and Kreye, H., 2006. Development of a generalized parameter window for cold spray deposition. *Acta Materialia*, 54(3), pp.729-742.
- [10] Gärtner, F., Stoltenhoff, T., Schmidt, T. and Kreye, H. (2006). The Cold Spray Process and Its Potential for Industrial Applications. *Journal of Thermal Spray Technology*, 15(2), pp.223-232.
- [11] Reddy, J., 2006. *Introduction To The Finite Element Method*, Third Edition. 3rd ed. McGraw-Hill.
- [12] Li, W. and Gao, W., 2009. Some aspects on 3D numerical modeling of high velocity impact of particles in cold spraying by explicit finite element analysis. *Applied Surface Science*, 255(18), pp.7878-7892.
- [13] Wang, X., Shi, J. (2013). Validation of Johnson-Cook plasticity and damage model using impact experiment. *International Journal Of Impact Engineering*, 60, 67-75.
- [14] Smith, M. (2009). *ABAQUS/Standard User's Manual*, Version 6.9. Dassault Systèmes Simulia Corp.

- [15] Schmidt, T., Assadi, H., Gärtner, F., Richter, H., Stoltenhoff, T., Kreye, H., Klassen, T. (2009). From Particle Acceleration to Impact and Bonding in Cold Spraying. *Journal Of Thermal Spray Technology*, 18(5-6), 794-808.
- [16] Pérez-Andrade, L., Gärtner, F., Villa-Vidaller, M., Klassen, T., Muñoz-Saldaña, J., Alvarado-Orozco, J. (2019). Optimization of Inconel 718 thick deposits by cold spray processing and annealing. *Surface And Coatings Technology*, 378, 124997.
- [17] AZoM.com. 2020. Material Science | Materials Engineering. [online] Disponible en: <<https://www.azom.com/>> [Accedido 9 Septiembre 2020].
- [18] Asm.matweb.com. 2020. ASM Material Data Sheet. [online] Disponible en: <<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=NINC34>> [Accedido 9 Septiembre 2020].
- [19] Johnson, G.R. and Cook, W.H. (1983) A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Temperatures. *Proceedings 7th International Symposium on Ballistics*, The Hague, 19-21 April 1983, 541-547.
- [20] U.S. Department of Energy, 2000. *Experimental Investigations Of Material Models For Ti-6Al-4V Titanium And 2024-T3 Aluminum*. Washington, D.C: U.S. Department of Transportation.
- [21] Karkalos, N. and Markopoulos, A., 2018. Determination of Johnson-Cook material model parameters by an optimization approach using the fireworks algorithm. *Procedia Manufacturing*, 22, pp.107-113.
- [22] Ren, X., Zhan, Q., Yuan, S., Zhou, J., Wang, Y., Ren, N., Sun, G., Zheng, L., Dai, F., Yang, H. and Dai, W., 2014. A finite element analysis of thermal relaxation of residual stress in laser shock processing Ni-based alloy GH4169. *Materials Design (1980-2015)*, 54, pp.708-711.
- [23] Blau, P., 1996. *Friction Science And Technology*. 2nd ed. New York, N.Y.: Dekker, p.187.
- [24] Engineeringtoolbox.com. 2020. Friction And Friction Coefficients. [online] Disponible en: <[https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d\\_778.html](https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html)> [Accedido 9 Septiembre 2020].