



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

ANÁLISIS TEÓRICO Y SIMULADO DEL IMPACTO DE PARTÍCULAS DE ALÚMINA  
SOBRE ALUMINIO EN COLD SPRAY

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

BRYAN MICHAEL SPENCER MATUS

PROFESOR GUÍA:  
RUBÉN MARCOS FERNÁNDEZ URRUTIA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
RODRIGO ANDRÉS ESPINOZA GONZÁLEZ  
RODRIGO HERBERTO PALMA HILLERNS

SANTIAGO DE CHILE  
2021

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO  
POR: BRYAN MICHAEL SPENCER MATUS  
FECHA: 15 DE ENERO DE 2021  
PROF. GUÍA: RUBÉN MARCOS FERNÁNDEZ URRUTIA

## ANÁLISIS TEÓRICO Y SIMULADO DEL IMPACTO DE PARTÍCULAS DE ALÚMINA SOBRE ALUMINIO EN COLD SPRAY

Los procesos industriales y productivos se encuentran en constante mejora a partir de los desarrollos científicos y tecnológicos. Algunas investigaciones logran hacer procesos más eficientes, otras mejoran la capacidad, otras incluso permiten que diseños inviables se vuelvan realidad en condiciones de operación que dificultaban su realización. Dentro de las múltiples maneras de mejorar las propiedades de un material está la posibilidad de sólo mejorar su comportamiento en la superficie, aumentando su desempeño respecto de su medio inmediato. Esto se puede lograr mediante diferentes métodos, sin embargo, para esta tesis resulta particularmente interesante el proceso de cold spray.

El proceso cold spray consiste en una técnica de generación de recubrimientos mediante el impacto de partículas a gran velocidad contra una placa, pieza o componente. La acumulación de estas partículas superficialmente otorga una mejora en las propiedades frente a fenómenos como corrosión o abrasión. Un aspecto clave de estos recubrimientos radica en su unión, tanto entre las partículas en el espesor de la capa como respecto de la pieza (denominada sustrato). Este trabajo supone estudiar el comportamiento de las variables asociadas al impacto de las partículas de alúmina mediante simulaciones computacionales para luego generar predicciones sobre recubrimientos ya realizados.

Esta investigación propone como objetivo principal estudiar mediante una simulación en el software ABAQUS la generación de material fundido en impactos de partículas de alúmina sobre sustratos de aluminio. Para esto se estudia el comportamiento de la simulación modificando el tamaño y velocidad de la partícula. Los rangos utilizados corresponden a valores de recubrimientos reales. El propósito es estudiar este fenómeno debido a la ausencia de consenso científico y generar un antecedente desde el cual profundizar el conocimiento del comportamiento de materiales en deformaciones rápidas.

Del estudio se concluye que sí están las condiciones para que ocurra fusión. Se determinan diámetros y velocidades mínimas para que esto ocurra y se determina que de forma aproximada un 43 % de las partículas en proporción volumétrica lograron generar material fundido en su impacto.



*Para Cuca y para Xiao*





# Agradecimientos

Primero agradecer a mi mamá y abuela. Esto es por y para ellas. Su inspiración de sentido al esfuerzo.

Hay muchas personas a quienes agradecer, algunas que conocí al principio del camino y algunas al final; algunas con las que todavía hablo y otras con quienes ya no. Influyeron mucho en que lograra terminar este camino y no estoy seguro si estaría aquí si tan solo una de esas personas faltaran.

A Cami y Jose, con quienes hicimos básicamente toda la carrera juntos. Fueron el mejor equipo para el camino que recorrimos y seguiremos juntos en los caminos que vienen. Jorge Q que se unió a medio camino pero quien fue fundamental.

A Pancho, mi hermano de toda la vida.

A Teté, Drei y Linda. las adoro. No sería quien soy sin su eterno apoyo.

Mucha gente increíble que conocí durante la carrera; Guille, Raúl, Muri, Fabi. Cada uno es un hermano para mí en su estilo propio. Los PASC.

A Jorge L, mi hermanito. A toda la gente de arquería y los años maravillosos que pasé ahí.

Viqui, nos tocó encontrarnos y enfrentar esta etapa juntos. Espero haber sido tanto apoyo en tu fin de camino como tu has sido del mío. Ahora vienen caminos nuevos. Te quiero muchísimo.

A Vale DM, Rai, Dani, Gonzalo, Víctor, Paty, Anita Polanco y Nicolás Luis.

Gracias a Loreto. Aprendí mucho de ti en todos estos años. Gracias también a Queni.

A los profesores Rubén y Rodrigo, de quienes siempre sentí apoyo para sacar adelante este trabajo en un año tan complicado.



# Tabla de Contenido

Índice de Tablas	ix
Índice de Ilustraciones	x
<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1. Antecedentes</b>	<b>3</b>
1.1. Cold Spray . . . . .	3
1.2. Características del caso en estudio . . . . .	7
1.3. Consecuencias microestructurales de los impactos . . . . .	9
1.4. Generación de material fundido . . . . .	10
1.5. Simulaciones Numéricas . . . . .	12
1.5.1. Tipos de modelo . . . . .	12
1.5.2. Métodos de mallado . . . . .	13
1.5.3. Control de distorsión . . . . .	14
1.5.4. Modelos de plasticidad . . . . .	15
1.5.5. Modelos de elasticidad . . . . .	16
1.6. Modelamiento computacional . . . . .	17
1.7. Comportamiento teórico . . . . .	18
1.7.1. Parámetros del modelo . . . . .	18
<b>2. Metodología</b>	<b>21</b>
2.1. Selección de variables . . . . .	21
2.1.1. Rango de tamaños . . . . .	21
2.1.2. Rango de velocidades . . . . .	21
2.2. Desarrollo del modelo simulado . . . . .	22
2.2.1. Propiedades Materiales . . . . .	22
2.2.2. Propiedades Geométricas . . . . .	24
2.2.3. Condiciones del modelo . . . . .	28
2.2.4. Modelo Final . . . . .	32
2.2.5. Refinamiento de malla . . . . .	33
2.2.6. Obtención de resultados . . . . .	34
2.3. Comparación con el caso de estudio . . . . .	37
2.4. Tratamiento de resultados . . . . .	38
<b>3. Validación</b>	<b>40</b>
3.1. Modelo a validar . . . . .	40

3.2. Resultados . . . . .	43
<b>4. Resultados y Análisis</b>	<b>46</b>
4.1. Selección del tamaño de malla . . . . .	46
4.2. Valores Base . . . . .	49
4.3. Dimensiones de la simulación . . . . .	49
4.3.1. Tiempo de frenado . . . . .	50
4.3.2. Profundidad de impacto . . . . .	52
4.4. Resultados térmicos . . . . .	54
4.4.1. Análisis preliminar . . . . .	55
4.4.2. Análisis completo por energía cinética . . . . .	80
4.5. Interpretaciones y predicciones teóricas . . . . .	84
4.5.1. Regiones térmicamente afectadas . . . . .	84
4.5.2. Consecuencias en la unión . . . . .	85
4.5.3. Consecuencias en la microestructura . . . . .	87
<b>Conclusión</b>	<b>90</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>92</b>

# Índice de Tablas

1.1. Parámetros de fabricación . . . . .	8
1.2. Distribución de diámetros de las partículas . . . . .	8
1.3. Unidades coherentes en ABAQUS CAE . . . . .	18
2.1. Propiedades de los materiales . . . . .	22
2.2. Parámetros de elasticidad Al6061 T6 . . . . .	23
2.3. Parámetros de J-C para AL6061 T6 . . . . .	24
2.4. Parámetros de J-C para AL6061 T6 . . . . .	30
2.5. Parámetros de ALE . . . . .	31
4.1. Temperaturas promedio por numero de elementos . . . . .	47
4.2. Valores base del caso de estudio . . . . .	49
4.3. Dimensiones de la simulación . . . . .	50
4.4. Profundidad para 520 m/s . . . . .	51
4.5. Resultados ordenados por tamaño . . . . .	55
4.6. Valores relativos de material fundido . . . . .	60
4.7. Resultados ordenados por velocidad . . . . .	70
4.8. Resultados por tipo de análisis . . . . .	80
4.9. Resultados ordenados por energía cinética . . . . .	81
4.10. Resultados de eficiencia . . . . .	81
4.11. Resultados ordenados por tamaño . . . . .	84

# Índice de Ilustraciones

1.1. Esquema básico de un equip de cold spray . . . . .	3
1.2. Partícula y matriz deformadas por el impacto. Imágen tomada por un SEM .	6
1.3. Diagrama de fases de <i>Al-O</i> . . . . .	7
1.4. Distribución de tamaños de partícula . . . . .	9
1.5. Tipos de impacto por par de materiales . . . . .	9
1.6. Imágenes SEM impactos . . . . .	10
1.7. Imágen SEM de impactos . . . . .	11
1.8. Malla de enfoque Lagrangeano . . . . .	13
1.9. Malla de enfoque Euleriano . . . . .	14
1.10. Diagrama de la indentación . . . . .	15
1.11. Adaptación de la malla por ALE . . . . .	15
1.12. Curva esfuerzo deformación tradicional . . . . .	16
1.13. Perfil temperatura en impacto . . . . .	20
1.14. Perfil temperatura en impacto . . . . .	20
2.1. Secciones de la partícula . . . . .	25
2.2. Secciones del sustrato . . . . .	26
2.3. Mallado de la partícula . . . . .	27
2.4. Mallado del sustrato . . . . .	28
2.5. Condiciones de borde . . . . .	30
2.6. Mallado del modelo . . . . .	32
2.7. Acercamiento de la zona de contacto . . . . .	33
2.8. Ejemplo de máxima profundidad de impacto y tiempo asociado . . . . .	35
2.9. Esquema de volumen afectado térmicamente . . . . .	37
3.1. Propiedades materiales del <i>paper</i> . . . . .	41
3.2. Modelo geométrico . . . . .	42
3.3. Comparación semi cualitativa del impacto . . . . .	43
3.4. Comparación cuantitativa impacto . . . . .	44
4.1. Gráfico de T promedio vs elementos por micrón . . . . .	46
4.2. Comportamiento sin deformación de la onda de calor a los 10 [ns] . . . . .	47
4.3. Comportamiento con deformación de la onda de calor a los 10 [ns] . . . . .	47
4.4. Comportamiento con 75 % de umbral promedio . . . . .	48
4.5. Comportamiento con 0 % de umbral promedio . . . . .	48
4.6. Tiempos de frenado para todas las $E_c$ . . . . .	50
4.7. Profundidad de impacto de partícula de 40 [ $\mu\text{m}$ ] a 520 [m/s] . . . . .	51

4.8. Tiempos de frenado ajustado por potencia . . . . .	52
4.9. Profundidad de impacto para todas las Ec . . . . .	52
4.10. Profundidad de impacto ajustado por potencia . . . . .	53
4.11. Profundidad de impacto normalizado por área . . . . .	54
4.12. Espesor elementos para D10 520 m/s . . . . .	56
4.13. <i>Peak</i> de temperatura para las 4 velocidades . . . . .	57
4.14. <i>Peak</i> de temperatura para 340 m/s . . . . .	58
4.15. <i>Peak</i> de temperatura para 400 m/s . . . . .	58
4.16. Acercamiento <i>Peak</i> de temperatura para 400 m/s . . . . .	59
4.17. $Vol_{peak}$ para las 2 velocidades mayores . . . . .	60
4.18. $Vol_{max}$ para las 2 velocidades mayores . . . . .	61
4.19. Curvas de volumen fundido vs velocidad . . . . .	61
4.20. Volúmenes fundidos para 340 m/s . . . . .	62
4.21. Volúmenes fundidos para 400 m/s . . . . .	63
4.22. Volúmenes fundidos para 460 m/s . . . . .	63
4.23. Volúmenes fundidos para 520 m/s . . . . .	64
4.24. Curvas de volumen fundido vs velocidad . . . . .	65
4.25. Volúmenes fundidos para 340 m/s . . . . .	66
4.26. Volúmenes fundidos para 400 m/s . . . . .	66
4.27. Volúmenes fundidos para 460 m/s . . . . .	67
4.28. Volúmenes fundidos para 520 m/s . . . . .	67
4.29. Curvas de volumen fundido vs velocidad . . . . .	68
4.30. Velocidad mínima para fusión . . . . .	69
4.31. $Vol_{peak}$ para los 2 diámetros mayores . . . . .	70
4.32. $Vol_{max}$ para los 2 diámetros mayores . . . . .	71
4.33. Curvas de volumen fundido vs diámetro . . . . .	71
4.34. $Vol_{peak}$ para los 2 diámetros mayores . . . . .	72
4.35. $Vol_{max}$ para los 2 diámetros mayores . . . . .	73
4.36. Curvas de volumen fundido vs diámetro . . . . .	74
4.37. Volúmenes fundidos para diámetro de 40 [ $\mu m$ ] . . . . .	74
4.38. Volúmenes fundidos para diámetro de 70 [ $\mu m$ ] . . . . .	75
4.39. Volúmenes fundidos para diámetro de 100 [ $\mu m$ ] . . . . .	75
4.40. Curvas de volumen fundido vs diámetro . . . . .	76
4.41. Volúmenes fundidos para diámetro de 40 [ $\mu m$ ] . . . . .	77
4.42. Volúmenes fundidos para diámetro de 70 [ $\mu m$ ] . . . . .	77
4.43. Volúmenes fundidos para diámetro de 100 [ $\mu m$ ] . . . . .	78
4.44. Curvas de volumen fundido vs diámetro . . . . .	79
4.45. Velocidad mínima para fusión . . . . .	79
4.46. Comportamiento teórico . . . . .	82
4.47. Comportamiento real . . . . .	82
4.48. Razones de comportamiento real vs teórico . . . . .	83
4.49. Jetting en bordes de impacto . . . . .	85
4.50. <i>Peak</i> térmico del fenómeno . . . . .	86
4.51. Imagen de las partículas reales . . . . .	86
4.52. Dispersión inicial de precipitados . . . . .	87
4.53. Dispersión acumulada en el borde de precipitados . . . . .	87
4.54. Distribución de temperatura por impacto . . . . .	88



4.55. Ejemplo de recristalización dinámica . . . . .	89
--	----

# Introducción

La ingeniería civil mecánica abarca múltiples áreas de la ciencia y tecnología, desde modelamientos numéricos y teóricos hasta la manufactura final y aplicada de componentes y partes. Algunas de estas disciplinas son la ingeniería en materiales, termodinámica, robótica, mecánica de fluidos y sólidos. En la actualidad existe una íntima relación entre todas ellas, siendo siempre el progreso en una de las disciplinas un nuevo peldaño para avanzar en las otras. Uno ejemplo de esto es como una mejora en el conocimiento de las propiedades térmicas de algún material permite el mejoramiento de componentes expuestos a altas o bajas temperaturas de operación. Estas mejoras pueden ser en eficiencia, seguridad, capacidad de operación, etc. manifestando en su conjunto un progreso colectivo de las aplicaciones de las disciplinas a las cuales responden.

Esta investigación se centra de un proceso de recubrimientos denominado *cold spray*, el cual consiste en la deposición en frío de capas materiales sobre componentes producto del impacto de partículas microscópicas con alta energía cinética. El propósito de esta investigación entonces es estudiar la forma en que esta energía cinética se libera y analizar el comportamiento del impacto en función de algunas de las variables involucradas como la velocidad y tamaño de la partícula. A partir de esto se puede generar una predicción teórica de si las condiciones fueron suficientes para generar fusiones locales en el material lo cual podría incidir en las propiedades de la unión.

## Motivación

Esta investigación resulta de 3 ejes principales que la motivan; uno práctico, uno académico y uno personal.

Desde una mirada práctica y de aplicación industrial, un mejor conocimiento del tipo de unión permite afinar las variables del proceso productivo y mejorar la calidad de los recubrimientos.

En un aspecto académico, resulta interesante profundizar los conocimientos existentes sobre recubrimientos, tratando de perfeccionar el conocimiento existente con herramientas más modernas y contrastar los resultados con la teoría. Esto resulta particularmente relevante debido a que la generación de material fundido en estos impactos es un fenómeno sin consenso científico.

Finalmente desde una perspectiva personal este trabajo resulta ser una importante oportu-

tunidad de investigación para el alumno dentro de un área de su interés personal. Si bien, puede que esto no signifique que este tipo de experiencias se repitan, los aprendizajes adquiridos por una actividad de esta disciplina aportan fuertemente en la formación de un futuro profesional de la ingeniería.

## Objetivos

Esta investigación plantea ciertos objetivos para considerarse una experiencia satisfactoria:

Objetivo General: Estudiar el efecto de la velocidad y el tamaño de partícula de alúmina esférica en la generación de fusión localizada sobre sustratos de aluminio mediante impactos

Objetivos Específicos:

1. Realizar una revisión y predicción teórica de las condiciones necesarias para generar fusión en un impacto de partícula
2. Estudiar el efecto de la velocidad de impacto en la temperatura alcanzada en el sustrato
3. Estudiar el efecto del tamaño de partícula en la temperatura alcanzada en el sustrato
4. Estudiar el modelo para diferentes tamaños de partícula
5. Estudiar el modelo para diferentes velocidades de partícula
6. Comparar los resultados entre el análisis teórico con los de la simulación computacional
7. A partir del análisis desarrollado generar predicciones sobre el sustrato y comparar con la literatura

## Alcances

De acuerdo a los objetivos planteados resulta necesario acotar el foco de la investigación a un marco consistente y realista de acuerdo a las condiciones disponibles. Este trabajo entonces se suscribe a los siguientes alcances:

- La investigación se centra en estudiar el comportamiento en función del tamaño y velocidad de partículas. Para efectos del estudio las temperaturas de las partículas y las del sustrato serán una condición inicial fija.
- Debido a la naturaleza no experimental de este trabajo, sólo se pueden llegar a predicciones teóricas y estadísticas del tipo de enlace esperado. No se puede asegurar que las placas reales tengan un comportamiento idéntico al modelo.
- La investigación supone materiales homogéneos, por lo cual no se considera la influencia de la rugosidad, densidad de dislocaciones inicial u otras del mismo estilo.
- La predicción sobre el tipo de unión se realizará sobre placas reales. Estas placas fueron ya fueron fabricada y se conoce las condiciones en las que fueron elaboradas.
- El análisis se hace respecto de la interfaz pues permite estudiar fallas de cohesión y de adhesión. La mayoría del comportamiento estudiado resultar en gran medida análogo al comportamiento dentro del espesor de capa.

# Capítulo 1

## Antecedentes

Este documento se sustenta en una base trabajos anteriores y en el conocimiento científico concreto que estos han generado. En la presente sección se explica en detalle los fundamentos desde los cuales se aborda la investigación.

### 1.1. Cold Spray

El proceso de cold spray de manera general consiste en la generación de recubrimientos de material producto de impactos de alta velocidad. Para esto, partículas microscópicas son eyectadas desde un cañón a altas velocidades (pudiendo alcanzar valores supersónicos), impactando una placa de un material denominada sustrato. Las partículas luego se unen, generando en su conjunto una capa del orden de décimas de milímetro, entregando nuevas propiedades a la superficie del sustrato. Esta técnica, al no utilizar altas temperaturas, es particularmente ventajosa en situaciones donde se desee evitar fenómenos de oxidación en la superficie del componente a tratar.

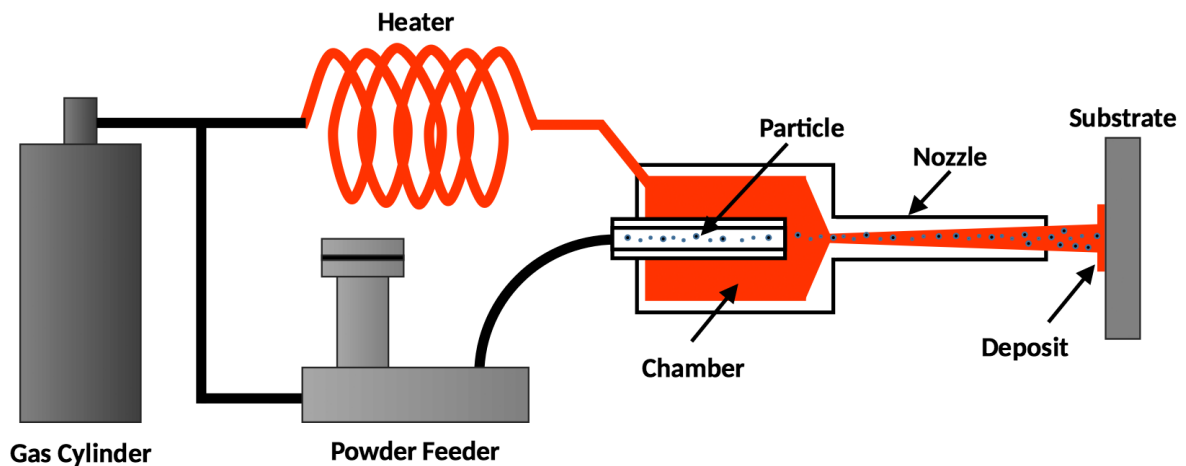


Figura 1.1: Esquema básico de un equipo de cold spray

En la figura 1.1 se identifica el funcionamiento básico: un alimentador entrega gas hacia

el calentador. Esta alimentación puede ser de alta o baja presión (entre 0.5 a 3.5 [MPa]), en general, usándose mayores presiones para metales puros y menores presiones para mezclas de metales con cerámicos. Este gas tiene dos canales; una porción se dirige a una cámara donde se calienta y la otra va a arrastrar el polvo de las partículas desde un depósito. Ambos conductos llegan a una cámara de mezcla desde la cual sale material proyectado a alta velocidad desde la boquilla hacia el sustrato.

De esta descripción ya es posible identificar diferentes variables para caracterizar los resultados de un procedimiento de cold spray. La mayoría de estas variables están explicadas en detalle en el libro "Cold Spray Technology" [2].

- **Material del sustrato:**

El sustrato debe cumplir, en primera instancia, con los requerimientos mecánicos de la pieza o componente. Esto se debe a que el recubrimiento, al tener un espesor muy delgado, no aporta propiedades mecánicas al grueso de la pieza, sólo mejora su comportamiento respecto de la superficie hacia el medio.

- **Material de las partículas**

El material de las partículas debe estar seleccionado para proporcionar las características superficiales deseadas, por ejemplo, resistencia a la abrasión. Usualmente se utilizan mezclas de materiales para el recubrimiento, pudiendo ser el segundo material el mismo que el del sustrato o un tercer material, pero enfocado en tener una especie dura y otra dúctil. El propósito de esta mezcla es aumentar la eficiencia en la deposición, permitiendo que las partículas duras tengan un medio deformable en el cual insertarse. Debido a que la unión al sustrato ocurre solamente en la interfaz, el o los materiales de las partículas deben tener contemplada la capacidad de unirse en el resto del espesor.

- **Par de materiales**

En la técnica de cold spray no sólo resulta importante las propiedades del sustrato y las partículas, es clave los valores relativos entre ambas también. De esto depende en gran medida que se genere una unión y de cual tipo es, aspecto que se explica en la sección siguiente.

- **Velocidad de las partículas**

Dentro de las investigaciones realizadas sobre cold spray existe bastante bibliografía respecto de este parámetro, sobre el cual se ha determinado la existencia de una velocidad crítica.[3] Esta corresponde a la velocidad mínima en la cual la partícula queda unida. A menores velocidades la partícula interactúa y deja una deformación remanente pero es rechazada elásticamente luego del impacto. Este último caso puede resultar útil si lo que se quiere es realizar un *peening* al sustrato.

- **Geometría de las partículas**

Debido a que la unión se genera producto de la liberación súbita de energía cinética a la capa del sustrato, la geometría de la partícula determina el área de presión instantánea sobre la cual existe esta interacción. De acuerdo a la bibliografía partículas angulares favorecen la deposición de la capa debido a que generan asperezas en las cuales otras partículas pueden alojarse, sin embargo, las partículas esféricas tienen una mayor fuerza de adhesión al requerir de una mayor deformación plástica para quedar fijadas. [7]

- **Tamaño de las partículas**

En un recubrimiento generado por una mezcla de partículas, se ha evidenciado que partículas muy grandes de la fase dura tienen un efecto perjudicial en la eficiencia en la deposición. Esto se justifica en que las partículas pequeñas suelen crear asperezas para alojar a las siguientes partículas, en cambio las partículas grandes erosionan porciones mayores de la superficie, produciendo el efecto adverso a condiciones propicias para la deposición.[19]

- **Proporción de materiales del flujo**

Suponiendo que las partículas de la alimentación está compuesto de 2 especies, existe un efecto en la proporción de estas sobre la eficiencia en la deposición. Esta proporción, dependiendo del par de materiales, tiene un valor óptimo. Tal fenómeno ha sido estudiado y se ha asociado a 2 explicaciones complementarias: primero el material duro genera asperezas en las cuales el material dúctil se adhiere con mayor facilidad y en segundo lugar que el material duro remueve localmente capas de óxido que mejoran la adhesión de la porción dúctil. [6]

- **Distancia de *stand off***

Corresponde a la distancia entre la salida de la boquilla y el sustrato. Esta distancia varía dependiendo del gas utilizado y de las partículas del polvo a transportar este valor ronda los 10 a 100 [mm]. Esta distancia representa el área efectiva sobre la cual se proyectan las partículas.

Ya con estas variables en consideración es necesario evaluar que tipos de unión se pueden generar tanto en la interfaz del sustrato con la capa, como en la unión de las mismas partículas en el resto del espesor de la capa. De manera general existen 2 tipos de uniones:

- **Unión Metálica**

La unión metálica corresponde a cuando la liberación de energía producto del impacto genera un enlace metálico entre la partícula y el sustrato (o entre partículas). Este tipo de unión requiere entonces de una alta coherencia entre las redes cristalinas. La unión metálica también puede forzarse trabajando a mayores temperaturas para favorecer la generación de enlaces.

- **Unión Mecánica**

La unión mecánica ocurre cuando la deformación local producto del impacto genera cavidad o cráteres que terminan sujetando mecánicamente a una escala microscópica. Este tipo de unión es altamente sensible a la velocidad crítica puesto que si la energía cinética no es suficiente para deformar la capa impactada, se generarán cráteres por rebote. También afecta la aspereza o cavidades que tenga la superficie del sustrato en las cuales las partículas siguientes pudieran alojarse.

En la técnica de cold spray no sólo resulta importante las propiedades del sustrato y las partículas, es clave los valores relativos entre ambas también. De esto depende en gran medida que se genere una unión y de cual tipo es. Orden en las cristalinidades podría favorecer uniones metálicas así como un sustrato dúctil respecto de las partículas podría favorecer la deformación plástica y la unión mecánica. Es posible que dentro de un recubrimiento ocurran ambos tipos de unión, en particular debido a que el polvo contiene dentro de su mezcla al material del sustrato. De ocurrir esto, sigue siendo el resultado de mayor interés la unión generada entre la alúmina y el aluminio.

Entendiendo entonces los tipos de unión que se pueden generar y las variables que intervienen es posible describir los modos en que la unión del recubrimiento por cold spray puede fallar. Aquí se presentan los siguientes casos:

- **Falla por cohesión**

La falla por cohesión resulta cuando es imposible generar el recubrimiento puesto que las partículas no se adhieren entre sí. Esta falla produce una acumulación de cráteres en la superficie del material, generando un fenómeno de *peening*. Esta falla puede tener múltiples causas: Velocidad de partícula inferior a la velocidad crítica, ausencia de fases estables en la mezcla, poca ductilidad relativa del sustrato para generar deformación plástica, etc.

- **Falla por adhesión**

La falla por adhesión corresponde a cuando la capa se desprende del sustrato con facilidad. Esto ocurre por una incompatibilidad para generar intermetálicos, enlaces metálicos o deformaciones plásticas suficientes. Estos problemas se intentan atacar alterando algunas de las variables antes mencionadas con la finalidad de generar condiciones para favorecer la unión.

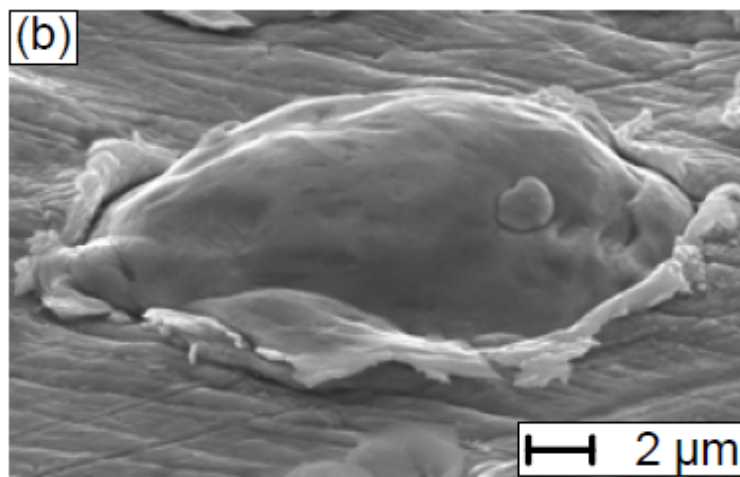


Figura 1.2: Partícula y matriz deformadas por el impacto. Imágen tomada por un SEM

Es de esperar que hayan fuertes cambios microestructurales en las zonas afectas por los impactos de las partículas como se puede apreciar en la imagen 1.2. En primera instancia, el *peening* por si solo ya genera un endurecimiento superficial producto de las distorsiones superficiales de la red, aun cuando la partícula no permaneciera adherida. En el caso de que hubiera una partícula de alúmina adherida este efecto se potencia puesto que habría un elemento de mayor dureza, rodeado de una porción altamente dislocada y deformada del material base.

Siguiendo la lógica anterior, la microestructura en el espesor de la capa consiste de un conjunto de partículas aplanadas producto de los sucesivos impactos, cohesionadas, pero con presencia de poros debido a la insuficiente deformación para adaptar perfectamente la forma de los huecos que llenan.

Con todo lo mencionado anteriormente resulta válido exponer algunas de las aplicaciones en las cuales resulta ventajoso usar cold spray para generar recubrimientos. En primer lugar, de manera general, el uso de recubrimientos puede aumentar la vida útil de componentes que se encuentren expuestos a altos niveles de abrasión como, por ejemplo, álabes de turbinas hidráulicas en las cuales el agua de operación contiene minerales disueltos. Si bien esto es válido para todos los procesos de deposición de recubrimientos, el proceso de cold spray es especialmente efectivo cuando se requiere depositar elementos altamente oxidables (fenómeno que aumenta con la temperatura), para recubrir con elementos con elevados puntos de fusión (como cerámicos) o para casos en los cuales se quiere minimizar el efecto de contracciones térmicas. En la actualidad se está utilizando el cold spray para reparar componentes de en la industria aeronáutica y otras máquinas.

Bajo el mismo principio del cold spray, pero sin la idea de utilizarlo como recubrimiento, se han desarrollado máquinas de manufactura aditiva. Estas tienen la ventaja de no ser sensibles a las contracciones térmicas y a poder generar variaciones en las propiedades de los componentes al variar la composición de las partículas empleadas. Esto resulta particularmente ventajoso cuando se requiere unir especies que bajo condiciones térmicas elevadas sería inestable mezclar.

## 1.2. Características del caso en estudio

En la sección 1.1 fueron descritas en detalle todas las variables relevantes para los resultados de un recubrimiento por cold spray. Debido a que esta investigación planea generar predicciones sobre placas ya existentes, resulta importante entender las diferentes propiedades esperables de estas. A continuación se presenta información respecto de la composición, concentración, condiciones de fabricación y otros aspectos importantes que pudieran afectar el tipo de unión generado. Los recubrimientos a estudiar se encuentran detallados en el artículo "Cold Spray Aluminum-Alumina Cermet Coatings: Effect of Alumina Content" [6]

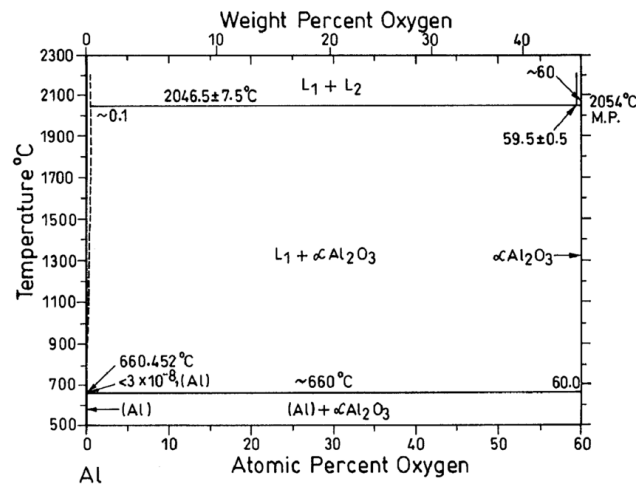


Figura 1.3: Diagrama de fases de  $Al-O$

Las placas estudiadas en esta investigación utilizan Al6061 T6 como sustrato y una mezcla de  $Al$  con  $Al_2O_3$  como partículas para el recubrimiento. Para entender la interacción entre



*Al* y *O* resulta necesario conocer la estabilidad con la cual se generan las fases, en particular la alúmina.

De la figura 1.3 se puede apreciar que la mezcla de fases *Al* + *Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>* es estable y consistente para toda concentración por debajo de los 660 [°C]. Ya que el polvo está compuesto por ambas especies, existen condiciones posibles para la enlaces metálicos entre partículas de aluminio pero imposible entre alúmina y aluminio. Además, debido a que la alúmina tiene una significativa mayor dureza, puede generarse una unión mixta, en la cual una porción corresponda sólo a adherencia por deformación plástica.

El diagrama de fases resulta referencial puesto que entrega una perspectiva del comportamiento respecto de la temperatura, la cual en cold spray está asociada a la energía cinética de la partícula.

De acuerdo a los antecedentes entregados durante la fabricación de las muestras en estudio, las condiciones se presentan en la tabla 1.1 [6]:

Tabla 1.1: Parámetros de fabricación

Parámetro	Valor
T° Gas	250 [C°]
P Gas	1.65 [MPa]
Gas	N <sub>2</sub>
V Transversal	20 [mm/s]
Pasadas	3
D <i>standoff</i>	15 [mm]

La velocidad de las partículas fue de 425 [m/s] con un rango de ± 68 [m/s] y la distribución de diámetro se encuentra presentada en la tabla del documento original en fracción volumétrica según:

Tabla 1.2: Distribución de diámetros de las partículas

D [ $\mu m$ ]	% Parcial	% Acumulado	D [ $\mu m$ ]	% Parcial	% Acumulado
124.4	0.00	100.00	22.00	4.83	11.73
104.6	0.42	100.00	18.50	2.09	6.90
87.99	0.76	99.58	15.55	1.21	4.81
73.99	1.58	98.82	13.08	0.97	3.60
62.22	3.69	97.24	11.00	0.90	2.63
52.32	8.56	93.55	9.25	0.78	1.73
44.00	16.90	84.99	7.78	0.57	0.95
37.00	23.73	68.09	6.54	0.38	0.38
31.11	21.03	44.36	5.50	0.00	0.00
26.16	11.60	23.33			

La tabla 1.2 genera el siguiente gráfico de distribución volumétrica:

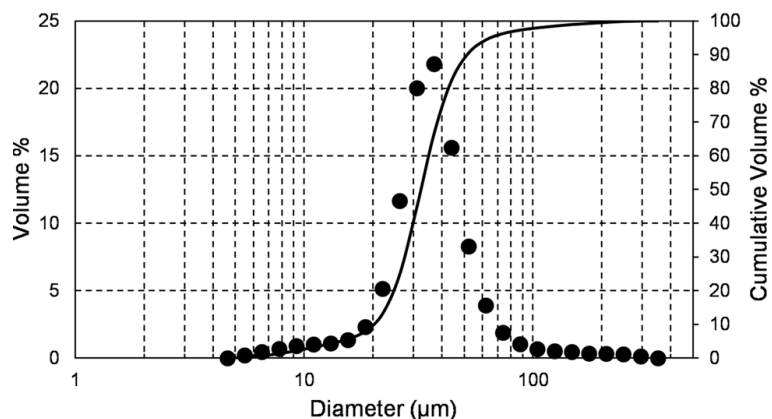


Figura 1.4: Distribución de tamaños de partícula

De la figura 1.4, se puede estimar que el rango relevante de tamaños va de 10 [ $\mu m$ ] a 100 [ $\mu m$ ]. Evidentemente, como el gráfico está en porción volumétrica, hay menos partículas de tamaños grandes que de tamaños pequeños, teniendo un promedio de 32 [ $\mu m$ ].

### 1.3. Consecuencias microestructurales de los impactos

Producto de los impactos ocurren deformaciones asociadas al tipo de par de materiales del recubrimiento. Particularmente el tipo de interacción depende de las durezas de ambas especies, relacionando en cual es dura o blanda respecto de sus propiedades. En este sentido pueden ambas ser duras, ambas blandas o una mezcla. En la figura 1.5 se representa de forma general el comportamiento del impacto de acuerdo a cada tipo de impacto.[8]

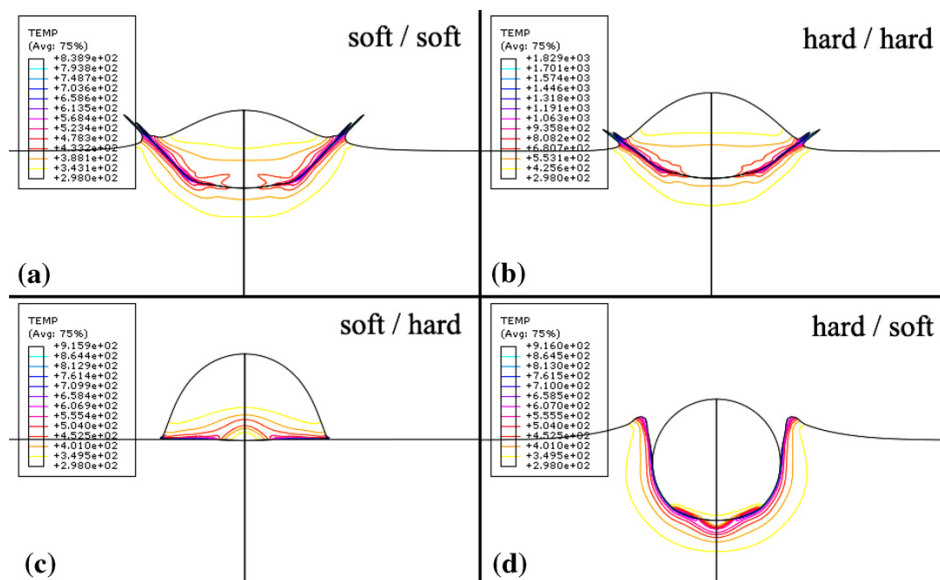


Figura 1.5: Tipos de impacto por par de materiales

Este tipo de fenómeno se ha estudiado de forma experimental, particularmente para estu-

diar los cambios microestructurales asociado a la o las especies que sufren la alta deformación. Dependiendo del material y la tasa de deformación pueden presentarse cambios como endurecimiento por trabajo en frío, recristalización dinámica, etc.

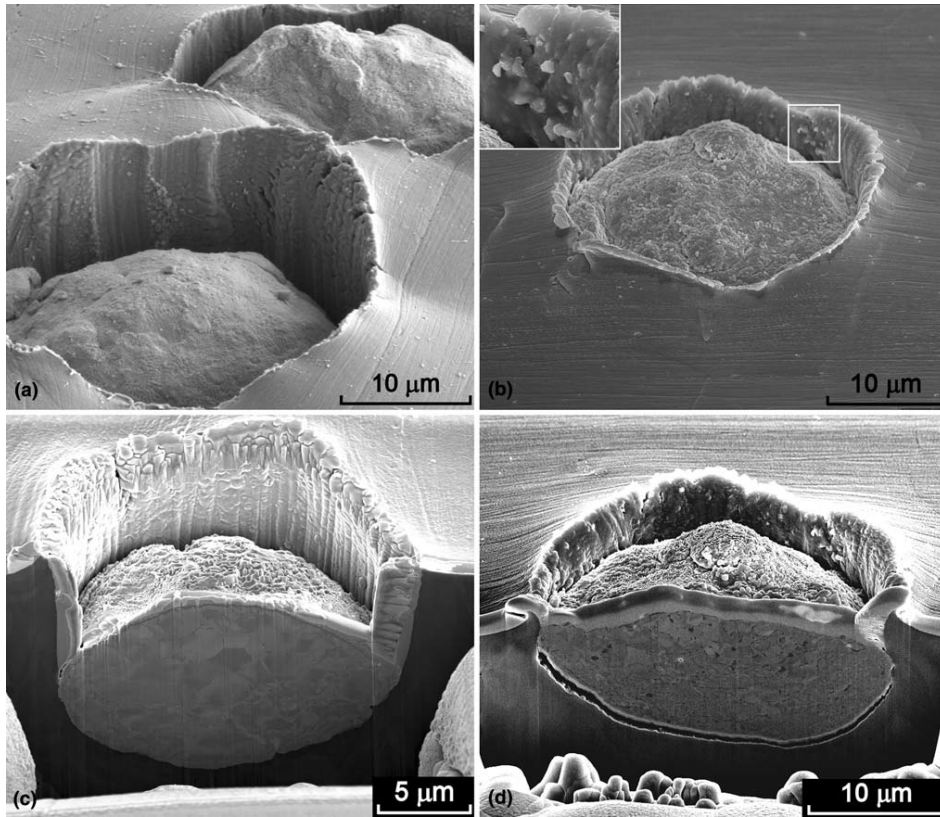


Figura 1.6: Imágenes SEM impactos

En la imagen 1.6 se aprecian imágenes SEM en corte de diferentes impacto en la cual se aprecia un impacto de alta profundidad y deformación en el sustrato y una alta deformación de partícula.

Para este estudio el caso corresponde a un *Hard/Soft*, ya que la alúmina tiene una dureza mucho mayor al aluminio, al comportarse como un material cerámico.

## 1.4. Generación de material fundido

Producto del impacto de la partícula se genera un régimen de alta deformación que se dispersa en forma de temperatura. Este aumento de temperatura, dependiendo de lo alta de la tasa de deformación, puede aumentar la temperatura del material en la interfaz a valores en el rango de fusión. Debido a que esto ocurre en el orden de decenas de ns, resulta casi imposible poder medir las variaciones térmica en tiempo real.

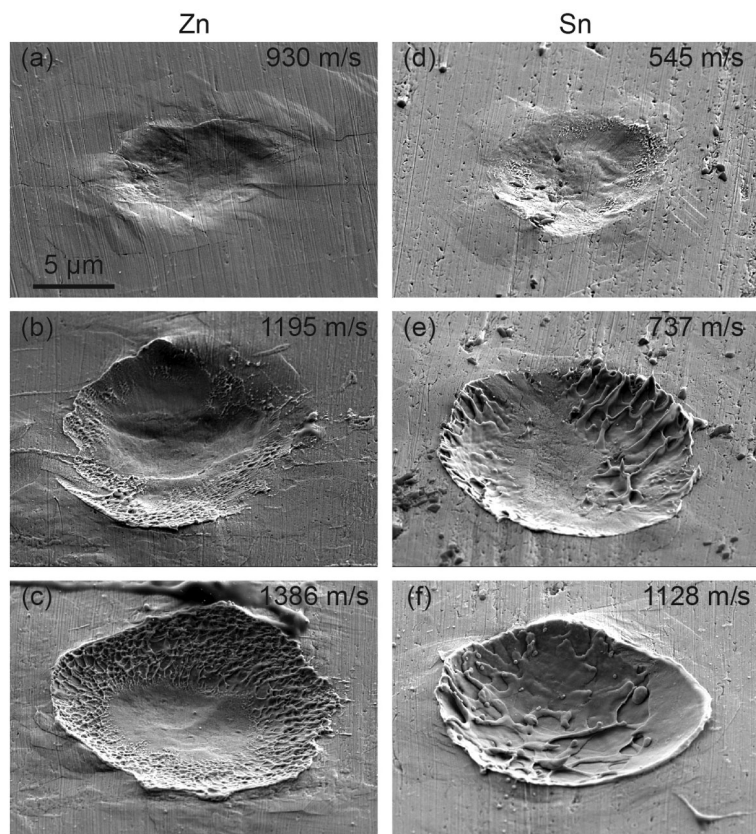


Figura 1.7: Imágen SEM de impactos

En la figura 1.7 [13] se aprecian zonas de interfaz en los sustratos luego de impactos a diferentes velocidades. La imagen sugiere, por la textura, que se generó material fundido, sin embargo, no es posible determinar con certeza las condiciones y duración de este fenómeno. En la literatura existen diferentes acercamientos, incluso afirmándose que no se necesita inestabilidad adiabática de corte para que ocurra adhesión [14].

Resulta difícil establecer un criterio para este fenómeno debido a la gran cantidad de variables que afectan (tamaños, velocidades, propiedades materiales, etc), por lo cual existe una falta de consenso científico respecto de los siguientes aspectos:

1. Influencia de las propiedades mecánicas en los impactos (tipo duro/blando)
2. Generación de material fundido
3. Aumento de adherencia producto del material fundido en la interfaz
4. Cambios microestructurales producto de la influencia térmica del impacto

Este trabajo, a pesar de basarse en trabajos anteriores, intenta proponer un nuevo antecedente para aportar a la dilucidar los aspectos sin consenso.

## 1.5. Simulaciones Numéricas

Las simulaciones numéricas se utilizan para una gran cantidad de modelamiento de fenómenos, por lo cual se han creado diversos acercamientos para representar lo más fielmente cada uno de los comportamientos.

Esta metodología permite estudiar desde muchos enfoques; una o varias partículas, impactos en ángulo, diversos materiales, comportamientos cinemáticos, dinámicos, térmicos, etc. Este método resulta particularmente útil para el estudio de fenómenos de alta velocidad de deformación o aumento de temperatura debido a la dificultad de poder registrar estos valores en un modelo experimental.

Debido a que las características que se asignan al modelo tienen esta versatilidad, es importante explicar en que consiste cada una.

### 1.5.1. Tipos de modelo

#### Modelo estándar

El modelo estándar funciona mediante iteraciones e incrementos con un comportamiento incondicionalmente estable. Lo anterior quiere decir para cada aumento de tiempo en la simulación, el modelo intentará minimizar el error de acuerdo a las condiciones entregadas antes de continuar al incremento siguiente. Para lograr esto, este tipo de modelo, incorpora una técnica de solución basado en rigidez de los elementos, en el cual itera las condiciones dentro de un incremento antes de pasar al siguiente en pequeñas variaciones porcentuales que se ajusten y converjan a una rango de tolerancia de error.

Entendiendo entonces que el modelo minimiza errores y que sus elementos se comportan de forma rígida, nunca puede ocurrir que el modelo estándar herede o acarree errores de forma sostenida de un momento de tiempo al siguiente incremento. Los errores están forzados a mantenerse dentro de un margen establecido como límite o tolerancia, siendo incapaces de propagar errores de forma descontrolada.

Todo lo anterior implica que este tipo de modelo se ajusta bien a modelos complejos de contacto, entregando un nivel de detalle más preciso y ajustado a la realidad, a cambio de mayores tiempo de cómputo y mayor tamaño de archivos generados.

#### Modelo explícito

El modelo explícito funciona mediante incrementos forzados de tiempo con un comportamiento condicionalmente estable. Lo anterior quiere decir que el modelo calcula una versión proyectada de la variación luego del incremento de tiempo, sin iterar internamente para verificar el error asociado. Para esto utiliza una técnica de integración explícita entre cada momento, lo que genera que los valores de un momento puedan ser mayores o menores que el real, si es que la variación real dentro de ese incremento fue muy importante.

Entendiendo que el modelo fuerza pasos de tiempo, para ajustar los errores el modelo puede compensar las variaciones importantes en el siguiente paso de tiempo. Por ejemplo si entre el momento 1 y 2 el fenómeno corresponde a un alza de 400 °C de un elemento, puede

que este modelo calcule que la temperatura del elemento en el momento 2 es de 600 °C y luego para el momento 3 corrija esta alza. Lo anterior es para explicar que no produce iteraciones internas entre incrementos y por lo tanto los errores pueden ir acumulándose sin un límite o tolerancia. En caso de sobrepasar las condiciones impuestas el modelo simplemente falla, atribuyéndolo, por ejemplo, a una distorsión muy grande o deformación muy rápida.

Todo lo anterior implica que este tipo de modelo se ajusta a bien a modelos en los cuales las condiciones fueron ingresadas con precisión, alcanzado un nivel suficiente para resolver sistemas complejos sin requerir de altos tiempos de computo ni grandes tamaños de archivos.

### 1.5.2. Métodos de mallado

Los mallados corresponden al refinamiento de las particiones del modelo. Estas son las unidades sobre las cuales ABAQUS genera los cálculos de interacción y deformación para cada paso de tiempo. Un mallado más fino se traduce en una mayor precisión en la respuesta numérica del modelo, a cambio de un mayor tiempo de procesamiento.

A continuación se describen los 2 enfoques de elemento con los que se podría simular el modelo:

#### Enfoque Lagrangiano

Se define como un acercamiento en el que la malla se adapta al movimiento, desplazando y deformando los elementos que lo componen. En este sentido la malla esta acoplada al movimiento puesto que adapta su forma a la deformación como se aprecia en la figura 1.8

Este acercamiento resulta útil para modelar fenómenos materiales de deformación y contacto puesto que permite evidenciar en la forma misma de la malla la interacción con el fenómeno en estudio. [1]

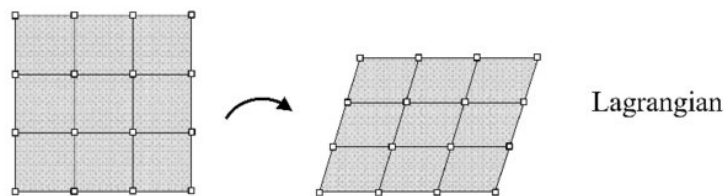


Figura 1.8: Malla de enfoque Lagrangeano

#### Enfoque Euleriano

Se define como un acercamiento en el que la malla esta fija en el espacio y es el fenómeno el que pasa a través de el. En este sentido se puede identificar la cantidad, ubicación y dirección del campo vectorial del fenómeno dentro de esta malla fija, como se aprecia en la figura 1.9

Este acercamiento resulta útil para estudiar fenómenos de propagación de campos vectoriales como temperaturas, velocidad, movimiento de fluidos, etc.[1]

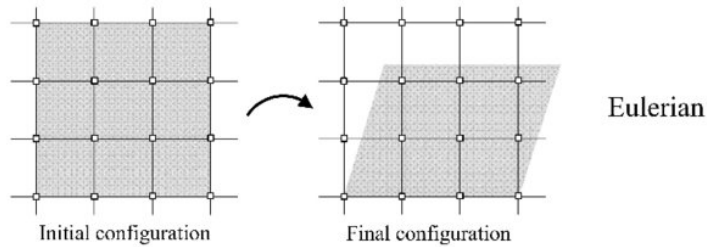


Figura 1.9: Malla de enfoque Euleriano

## Enfoque acoplado

El enfoque acoplado toma lo mejor de cada modelo para cuando se quiere estudiar fenómenos acoplados. Un ejemplo de esto es querer estudiar la deformación por un impacto y la propagación de calor por deformación plástica que genere el fenómeno. En este sentido, los elementos de la malla se adaptan a la forma del impacto y de forma interna interactúa la propagación de calor entre elementos.

### 1.5.3. Control de distorsión

Al modelar fenómenos de impactos pueden producirse altas velocidades de deformación, lo cual lleva a los elementos a tener que adaptarse a nuevas formas en pocos incrementos de tiempo. Para contrarrestar esto existen herramientas en los softwares, las cuales se adaptan a las diferentes formas de distorsión posibles. Las distorsiones pueden manifestarse de diversas formas; como efecto reloj de arena (*hourglass*, elementos excesivamente alargados o elementos que traspasan y entran dentro de otros. Esto resulta particularmente importante para los elementos de tipo Lagrangeano debido a que, como se adaptan a la forma del fenómeno, pueden generar errores por deformación excesiva en la interfaz del impacto.

## Mallado adaptativo ALE (Arbitrary Lagrangean Eulerian)

Este método consiste en una forma de adaptar el volumen de los elementos para ajustarse a grandes deformaciones o deformaciones fuertemente localizadas. La cantidad de elementos y la relación entre los nodos se mantiene idéntico, la variación corresponde a que los elementos reajustan su volumen a las geometrías intrincadas. Una explicación de esto se presenta en las imágenes (figuras 1.10 y 1.11) del manual de ABAQUS, en la cual se explica la reacción de una placa material siendo indentada por una herramienta rígida.

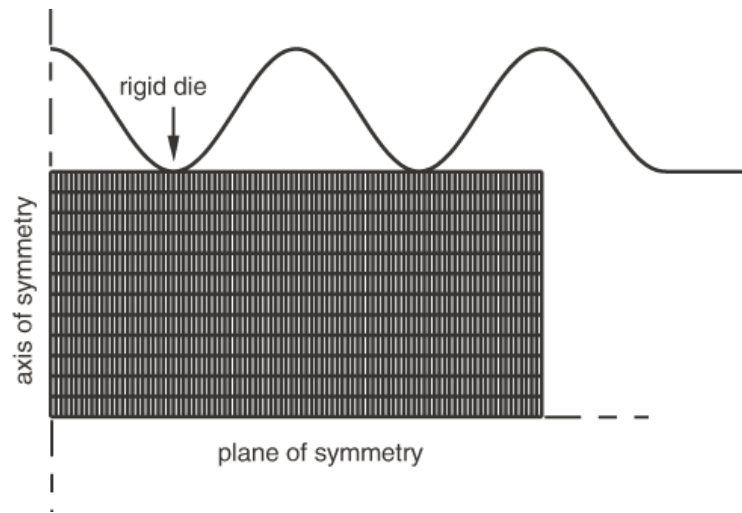


Figura 1.10: Diagrama de la indentación

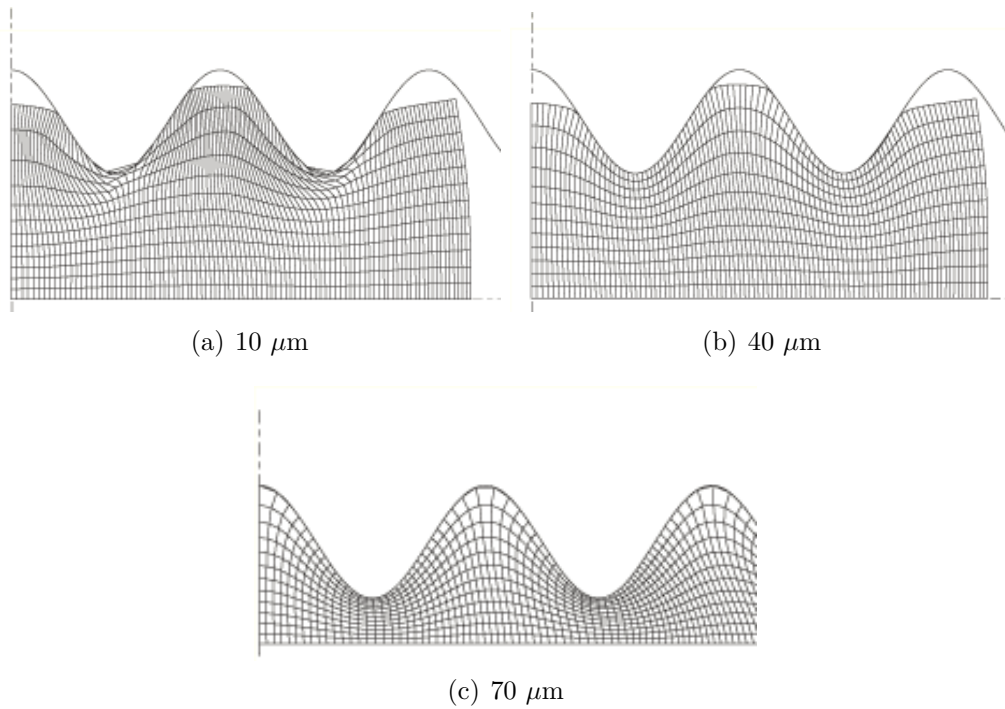


Figura 1.11: Adaptación de la malla por ALE

#### 1.5.4. Modelos de plasticidad

##### Johnson Cook

Uno de los acercamientos a como los materiales se comportan plásticamente corresponde al modelo de Johnson Cook. Este modelo se caracteriza por considerar los efectos de endurecimiento, temperatura y tasa de deformación. En particular, este modelo resulta importante al momento de estudiar deformaciones por impacto puesto que se aproxima mejor a las inestabilidades adiabáticas de corte que el modelo isotrópico convencional. Lo anterior



corresponde a un proceso en el cual en rápidas deformaciones se genera una gran cantidad de calor localizado. Este calor entonces ablanda el material, generando que la nueva deformación tienda a ocurrir en el material ablandado, calentándolo más aún.

Este modelo es ampliamente usado en modelaciones de impacto [3] y sigue la siguiente ecuación:

$$\sigma_{JC} = [A + B \cdot \varepsilon^n][1 + C \cdot \ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})][1 - (\frac{T - T_r}{T_f - T_r})^m] \quad (1.1)$$

En la ecuación 1.1 se puede identificar que el último de los términos en paréntesis cuadrados representa un factor que corresponde al ablandamiento por temperatura, en el cual  $T_r$  representa una temperatura de referencia (usualmente 298 °K por condiciones de laboratorio) y  $T_f$  representa la temperatura de fusión. El ablandamiento ocurre entonces entendiendo que mientras más cerca esté nuestra temperatura a la de fusión, el término completo se acerca a 1, acercando a 0 la ecuación global. Teóricamente podrían obtenerse valores mayores a 1 dependiendo de la temperatura de referencia. El término está elevado a un exponente  $m$  debido a que este ablandamiento no tiene un carácter lineal.

### 1.5.5. Modelos de elasticidad

#### Elástico isotrópico

En condiciones de deformación lenta se puede estimar que la deformación elástica sigue una relación lineal respecto del esfuerzo aplicado. A la pendiente de esta recta se le denomina Módulo de Young (E). Este comportamiento se obtiene de curvas de laboratorio, en condiciones controladas.

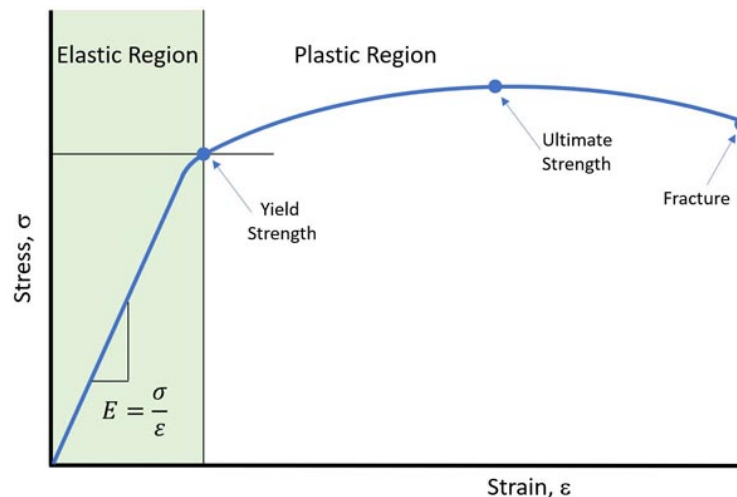


Figura 1.12: Curva esfuerzo deformación tradicional

En la curva tradicional de esfuerzo-deformación (figura 1.12) se puede identificar esta pendiente al comienzo de la curva.

## Ecuación de estado de Mie-Gruneisen

Para altas velocidades de deformación el modelo elástico isotrópico falla en predecir el comportamiento real del fenómeno. Esto se debe a que puede la propagación de la deformación se acerque a la velocidad de propagación de ondas del material. Cuando estas ondas de choque comienzan a afectar el comportamiento elástico de un material es necesario ajustar las propiedades mediante una ecuación de estado.[3]

La ecuación de estado de Mie-Gruneisen se puede construir mediante la relación entre la velocidad de la partícula y la velocidad de la onda de choque. Para esto se utiliza la relación  $U_s - u_p$ . Esta ecuación tiene la siguiente forma, la cual es utilizada por el software:

$$p = \frac{\rho_0 \cdot c_0 \cdot \eta}{1 - s \cdot \eta} \cdot \left(1 - \frac{\Gamma_0 \cdot \eta}{2}\right) - \Gamma_0 \cdot \rho_0 \cdot E_m, \quad \eta = 1 - \frac{\rho_0}{\rho} \quad (1.2)$$

En esta ecuación  $\rho$  representa densidades (inicial o actual),  $c_0$  la velocidad del sonido en el material,  $E_m$  la energía por unidad de masa,  $\Gamma_0$  la constante de Gruneisen y  $s$  la pendiente de Hugoniot.

## 1.6. Modelamiento computacional

La simulación computacional consiste en solucionar complejos modelos numéricos aprovechándose de la avanzada capacidad de procesamiento de los softwares modernos.

Estos, de manera general, toman una serie de cuerpos generados por el usuario, al cual se le asignan diferentes propiedades relacionadas con el fenómeno a estudiar. Las propiedades deben ser seleccionadas y justificadas para asegurarse de que la solución del modelo numérico resulte consistente con la realidad natural. Para lo anterior existen diversos softwares, con módulos específicos orientados a diferentes fenómenos: sismos, mecánica de fluidos, transferencia de calor, etc.

Para efectos de este estudio se utiliza el software ABAQUS CAE.

Este programa es usado principalmente para modelar fenómenos de impacto, deformación y contacto. Cuenta con módulos explícitos e implícitos.

El software no reconoce unidades, por lo cual se debe trabajar en una escala consistente. A continuación se presenta la escala de unidades lógica dentro de ABAQUS:

Tabla 1.3: Unidades coherentes en ABAQUS CAE

Dimensión	SI	SI [mm]	Imperiales [ft]	Imperiales [in]
Largo	m	mm	ft	in
Fuerza	N	N	lbf	lbf
Masa	kg	Mg (Ton)	slug	lbf s <sup>2</sup> /in
Tiempo	s	s	s	s
Esfuerzo	Pa	MPa	lbf/ft <sup>2</sup>	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
Energía	J	mJ	ft lbf	in lbf
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	Mg/mm <sup>3</sup>	slug/ft <sup>3</sup>	lbf s <sup>2</sup> /in <sup>4</sup>

## 1.7. Comportamiento teórico

Es necesario, para poder comparar los resultados del modelo computacional con las predicciones de las muestras reales, establecer los comportamiento teóricos a los que debería acercarse la simulación.

Para el comportamiento teórico primero necesitamos considerar las variables que van a estar involucradas en los cálculos. Desde un punto de vista físico podemos describir el modelo en función de 4 parámetros: la energía cinética, la deformación plástica, la deformación elástica y el aumento de temperatura. Desde una perspectiva del fenómeno a estudiar, podemos identificar la energía cinética del impacto como la perturbación al medio y los otros 3 parámetros como la respuesta del medio.

### 1.7.1. Parámetros del modelo

#### Energía cinética

La energía cinética corresponde al único ingreso o *input* de energía al sistema partícula-sustrato manifestado durante el impacto. Esta energía viene dada por los 2 parámetros a estudiar en este trabajo: la masa y la velocidad. La masa, en estricto rigor es función del volumen y densidad, sin embargo, como rango temporal del estudio comienza en el instante justo antes en que la partícula impacta, se supone una densidad constante, por lo cual la masa pasa a ser función exclusiva del volumen (tamaño de partícula).

La energía cinética se define como:

$$E_c = \frac{1}{2}m \cdot v^2 \quad (1.3)$$

Como la única fuente de energía cinética en el modelo es la partícula, podemos ampliar la ecuación anterior como:

$$E_c = \frac{2}{3} \cdot \pi r^3 \cdot \rho \cdot v^2 \quad (1.4)$$

En la ecuación anterior la energía cinética queda como función del tamaño y velocidad de partícula.

## Deformación plástica

Para efectos teóricos se considera la entrada y salida del modelo desde una perspectiva energética. En este sentido la deformación no se toma como gasto energético, sino en la medida que esta es disipada en forma de calor.

## Deformación elástica

La deformación elástica tiene 2 componentes

- La energía elástica con la que la partícula rebota. Esta energía viene dada por la misma ecuación de la energía de *input*, pero la velocidad es la con sentido contrario. Al ser un término que cuadrado, es siempre positivo. En el caso real, si la partícula de alúmina quedara atrapada en el sustrato, esta energía permanecería en el sistema de forma elástica pero no se liberaría al sustrato como deformación plástica, por lo cual, para efectos de los cálculos no es relevante si la partícula se despega o no luego del impacto.
- La energía elástica que se propaga por el sustrato producto de la onda elástica del choque. Esta para efectos del modelo se considera como una ineficiencia de aumento térmico.

## Aumento de temperatura

El aumento de temperatura viene dado directamente como el producto de la propagación de la deformación plástica. Esto nace del sentido que para deformar, a un nivel atómico, es necesario desplazar dislocaciones, generando una fricción interna.

La energía cinética disponible para calor ( $E_{cd}$ ) resulta entonces ser la energía cinética pura del *input*. Podemos asumir que toda esta energía finalmente se transforma en calor, el cual finalmente se conduce en el tiempo por el sustrato.

En la realidad, el perfil de temperatura adopta la forma del impacto, teniendo un gradiente de efecto térmico aproximadamente radial como se aprecia en las figuras 1.13 [18] y 1.14 [15]

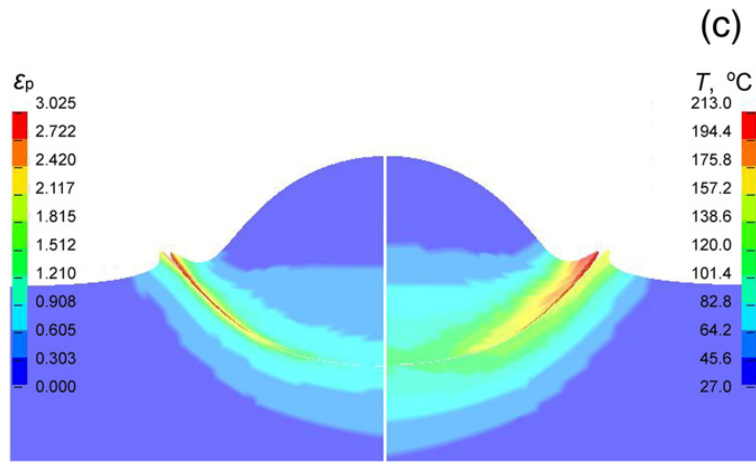


Figura 1.13: Perfil temperatura en impacto

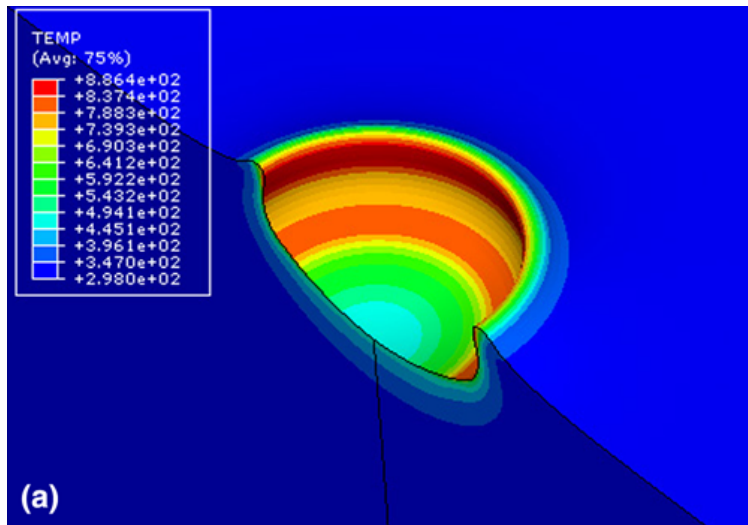


Figura 1.14: Perfil temperatura en impacto

Sobre este comportamiento se aplican supuestos para obtener una versión analítica, los cuales son explicados en la sección de Metodología.

# Capítulo 2

## Metodología

A continuación se presenta la metodología, separada en las secciones asociadas a cada etapa del estudio. Todo este desarrollo se realiza sobre un modelo de tipo explícito. Se elige este tipo de modelo por sobre el estándar puesto a que no se está buscando un gran nivel de detalle en un caso particular, sino, estudiar un comportamiento del fenómeno en general al modificar variables.

### 2.1. Selección de variables

El estudio se centra en el efecto de 2 variables: Velocidad y tamaño. En primer lugar es necesario establecer el rango de trabajo de ambas.

#### 2.1.1. Rango de tamaños

Con el objetivo que los tamaños representen de la mejor manera el espectro de alúmina esférica de la muestras reales, primero se toma en cuenta la distribución de tamaños asociada a la experiencia, expresada en la tabla 1.2 presentada en la sección de antecedentes.

Para el estudio del modelo se toman 4 valores de tamaño en pasos de 30 [ $\mu m$ ] en diámetro; siendo estos 10, 40, 70 y 100 [ $\mu m$ ]. De la tabla 1.2 podemos evidenciar que este rango abarca aproximadamente el 99 % de las partículas, por lo cual, aparte de ser una discretización cómoda para realizar curvas, también es casi completamente representativa del caso en estudio.

#### 2.1.2. Rango de velocidades

Para las velocidades se toma el parte del rango presentado en la fabricación de las muestras de estudio. Este es  $425 \pm 68$  [m/s], o sea, desde 340 [m/s] hasta 493 [m/s]. Para que el estudio sea lo mas representativo posible se toma un rango que contenga al anterior con el fin de que, en conjunto con el rango de tamaños, se estudie la partícula más pequeña más lenta hasta la más grande más rápida.

Para el estudio del modelo se toman 4 valores de velocidad en pasos de 60 [m/s]; siendo estos 340, 400, 460 y 520 [m/s]. Este rango ligeramente ampliado permite extrapolar ligeramente los comportamientos, suponiendo que pudieran haber partículas que escapen cercanamente del rango  $\pm 68$  [m/s].

## 2.2. Desarrollo del modelo simulado

Para esta sección se desarrolla un modelo computacional en el software ABAQUS. A continuación se explican los parámetros seleccionados para el modelo y luego el modelo final que genera esta secuencia de operaciones.

En primer lugar, para efectos del modelo se utiliza la escala de milímetros, de la cual se desprenden las unidades en que van las otras dimensiones siguiendo la tabla 1.3 de la sección de antecedentes. Por simplicidad, en las tablas de esta sección, se entregan los valores en dimensiones SI tradicionales.

Como consideraciones iniciales se opta por un modelo axisimétrico, explícito y lagrangeano. Debido a que se pretende estudiar el impacto a una partícula única, el estudio es indiferente a la variación angular. Esto significa que se puede asumir que lo que ocurre en un diferencial de ángulo es representativo de toda la superficie de impacto. Esta aproximación entrega resultados coherentes, reduciendo significativamente los tiempos de cómputo respecto de modelos 2D o 3D [3].

Cada modelo es estudiado en su versión con conducción y sin conducción. La información que se puede obtener de cada caso es descrita al final de esta sección, una vez que se presenta el modelo final.

### 2.2.1. Propiedades Materiales

Para esta simulación se cuenta con 2 materiales cuyas propiedades serán asignadas a las secciones de la geometría del modelo. En general los valores son tomados de la literatura de la ASM[9]. Para el estudio resultan importante las variables que afectan la energía cinética y los comportamientos térmicos. Para la alúmina se ignora sus propiedades de fusión al ocurrir a temperaturas muy altas ( $>2000$  [°C]) y estar fuera del interés del modelo.

Tabla 2.1: Propiedades de los materiales

	$Al_2O_3$	Al6061 T6
$\rho [kg/m^3]$	3,95	2,70
$k [\frac{W}{mK}]$	30	167
$C_p [\frac{J}{kgK}]$	700	896
$L [\frac{J}{kg}]$	-	396.000
$T_{sol} [K]$	-	855
$T_{liq} [K]$	-	925

## Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas juegan un rol importante en el modelo puesto que ambos materiales tienen comportamientos muy diferentes.

### Propiedades Elásticas

#### 1. $Al_2O_3$

La partícula de alúmina posee una dureza Vickers muy alta (sobre 1500 [kgf/mm<sup>2</sup>]) y un comportamiento material similar a un cerámico. De una perspectiva mecánica se puede considerar que este material sólo soporta deformaciones elásticas. Cualquier intención de deformación plástica se traduce en fracturas frágiles. Lo anterior justifica que para efectos del modelo numérico, se le atribuye sólo comportamiento elástico a la alúmina. Se asume que sigue un comportamiento elástico isotrópico que sigue los siguientes parámetros

#### 2. Al6061 T6

En primera instancia está la opción de considerar un comportamiento normal elástico isotrópico, sin embargo, ya que el sustrato puede (y debe) tener comportamiento dúctil resulta importante considerar que el impacto produce ondas elásticas de choque dentro del material. Lo anterior ocurre debido a que la tasa de deformación es demasiado alta como para suponer que la acumulación de energía elástica ocurre de forma cuasiestática.

Para modelar mejor el comportamiento elástico se toma una ecuación de estado de Mie-Grüneisen construida mediante una relación de partícula-choque ( $U_s - U_p$ ), utilizada ampliamente en simulaciones similares [?] donde resultan importantes las ondas de choque. Los parámetros relevantes aquí son; Constante de Grüneisen ( $\Gamma_0$ ), velocidad del sonido en el material y la pendiente de Hugoniot (S). Como esta ecuación sólo soporta esfuerzos de compresión, es importante agregar una componente en corte, para lo cual se incorpora el módulo de corte (G) A continuación se presentan los valores seleccionados para cada parámetro:

Tabla 2.2: Parámetros de elasticidad Al6061 T6

$\Gamma_0$	V. Sonido [m/s]	S	G [MPa]
1,97	5240	1,4	26000

### Propiedades Plásticas

#### 1. $Al_2O_3$

Como se explicó anteriormente, no se considera capacidad de deformación plástica en este material.

#### 2. Al6061 T6

Para la simulación, el modelo tradicional isotrópico de deformación para metales resulta insuficiente, puesto que no es capaz de predecir el comportamiento para deformaciones muy altas o muy rápidas. Para esto, se utiliza como mejor aproximación el modelo de Johnson Cook, el cual incorpora al modelo el comportamiento de las inestabilidades adiabáticas de corte. Los parámetros [12] se presentan en la siguiente tabla:



Tabla 2.3: Parámetros de J-C para AL6061 T6

A [MPa]	B [MPa]	C	n	m	$\dot{\epsilon}$	$T_f$ [°K]	$T_{ref}$ [°K]
324	114	0,002	0,42	1,34	1	925	298

### 2.2.2. Propiedades Geométricas

A continuación se explican todos los parámetros relacionados con la forma de las partes del modelo y los elementos en los cuales se componen.

- Partícula esférica

En el trabajo de Fernández R. *Cold Spray Aluminum-Alumina Cermet Coatings: Effect of Alumina Morphology* [7] se estudia la relación entre la morfología y la eficiencia en la deposición. Se concluye del estudio que el aumento de eficiencia de deposición de las partículas angulares se debe a la generación de asperezas en la superficie, la cual pasado un óptimo de contenido en la mezcla comienza a bajar. Para las partículas esféricas en cambio este fenómeno no se presenta, debido a que la geometría no genera asperezas y produce una unión sólo por un alto nivel de deformación plástica. Como acercamiento al problema real se selecciona una geometría esférica ideal para la partícula.

- Sustrato rectangular

Para representar la zona de impacto del sustrato se opta por una geometría rectangular. Esta tiene como beneficio que es fácil de seccionar de forma proporcionada, genera elementos ordenados y se adapta bien al modelo axisimétrico.

Otras geometrías como radiales, tienen dificultad para generar elementos de transición en el mallado.

- Tamaño del sustrato

El tamaño del sustrato debe cumplir 2 criterios:

1. Ser lo suficientemente ancho como para representar correctamente toda la zona afecta térmicamente y deformada plásticamente.
2. Ser lo suficientemente reducida para poder asumir que el estudio no se ve afectado por partículas vecinas que pudieran impactar en un lapso de tiempo cercano.

Por uniformidad el tamaño del sustrato es, como las partículas varían en tamaño, en función del sustrato. Sus medidas son 1,8 D de ancho y 1,2 D de espesor.

- Secciones

1. Partícula

La partícula se separa en 2 secciones principales; un núcleo del 80 % del radio y un cascaron del 20 % restante. La idea es que el cascaron tenga un mallado fino y el núcleo uno grueso. El cascaron se separa en 2 subsecciones, una inferior que impacta con el sustrato y una superior que solo absorbe los esfuerzo elásticos y puede tener un mallado menos detallado.

La partícula tiene entonces la siguiente forma (figura 2.1)

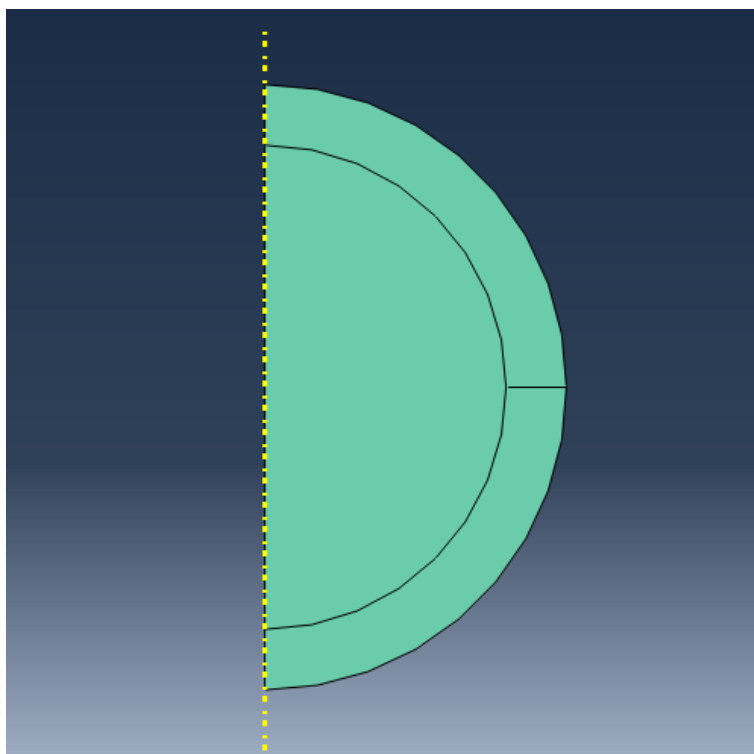


Figura 2.1: Secciones de la partícula

## 2. Sustrato

Para poder enfocar el procesamiento computacional en las zonas de mayor interés, se opta por un modelo separado en 3 secciones: la primera es la directamente en contacto con la partícula, la cual debe permitir el mayor refinamiento. La tercera sección es la que debe abarcar el total del sustrato, el cual debe ser suficientemente ancho como para poder ser representativo del total de la zona deformada. La segunda zona, corresponde a una zona de transición en la cual el mallado debe suavizar el cambio entre la zona de mayor densidad y la de menor densidad de particiones.

Coherentemente con el tamaño del sustrato, los rectángulos crecen en  $0,6 D$  en ancho y  $0,4 D$  en espesor. El sustrato queda con las siguientes secciones (2.2):

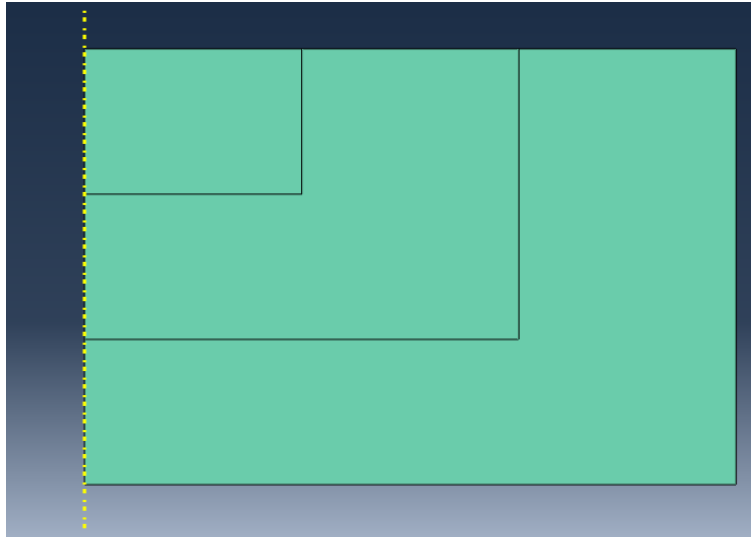


Figura 2.2: Secciones del sustrato

- Mallados

Una sección dedicada exclusivamente a la justificación del tamaño de malla se encuentra más adelante en este capítulo, sin embargo, a continuación se presenta una explicación general del comportamiento general esperado de la malla, razonamiento desde el cual se basa el proceso de refinamiento:

1. Partícula

Para la partícula se consideran mallados finos en el borde de las secciones del cascaron con tendencia (*bias*) a irse volviendo más grueso hacia el centro. Para la sección del núcleo se consideran elementos gruesos.

El cascaron tiene en el cascaron elementos tipo *Quad Free* y el núcleo del tipo *Tri Free*. A la superficie de la porción del cascarón que estará en contacto durante el impacto se le asignan elementos de menor tamaño que a los de la superficie del sustrato.

El mallado de la partícula queda con la siguiente forma (figura 2.3):

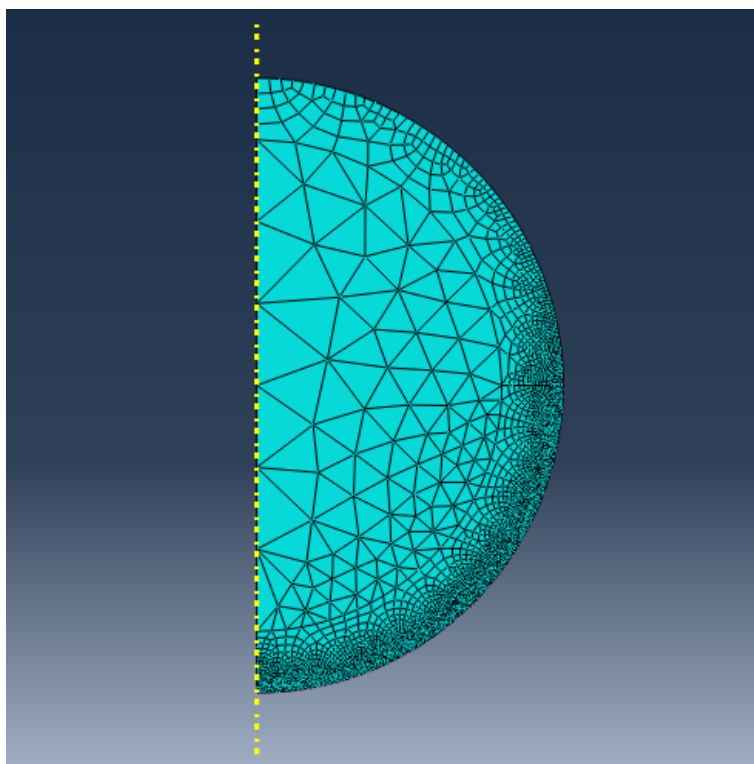


Figura 2.3: Mallado de la partícula

## 2. Sustrato

Para el sustrato se considera un mallado muy fino en la porción en contacto con la partícula, uno que va de fino a grueso con tendencia en la mitad y uno grueso de tamaño fijo en la sección mayor.

La sección menor cuenta con elementos tipo *Quad Struc*, la sección intermedia tipo *Tri Free* y la sección mayor de tipo *Quad Free*

El tamaño exacto de los elementos en la sección de impacto se discute en "Refinamiento de malla", sin embargo, resulta importante elegir si la sección más fina estará generada en función de un tamaño fijo o de un número fijo de elementos. Esto surge de que como el tamaño de las secciones está en función del tamaño de partícula, los sustratos tienen la misma proporción entre sí, pero diferentes tamaños absolutos. Se opta por un tamaño fijo para tener una escala homogénea entre los casos.

El mallado del sustrato queda con la siguiente forma (figura 2.4):

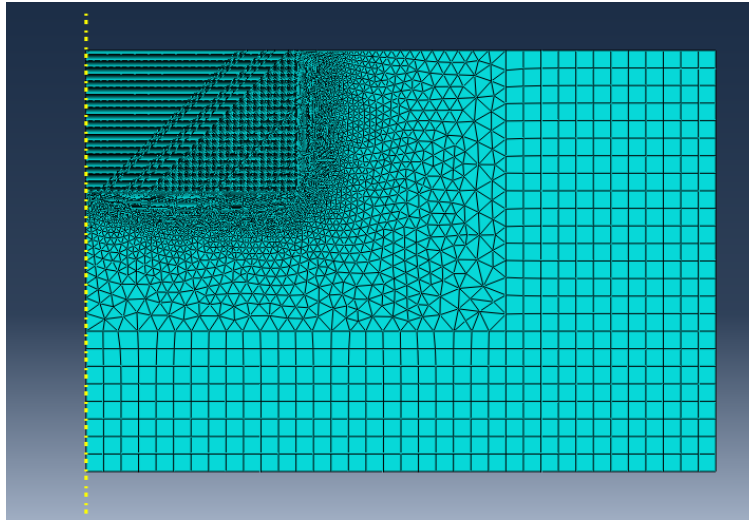


Figura 2.4: Mallado del sustrato

### 2.2.3. Condiciones del modelo

- Condiciones cinemáticas

La única parte cinemática del modelo corresponde a la velocidad inicial de la partícula. Esta es una condición inicial que afecta a toda la esfera y cuyo valor corresponde a una velocidad dentro del rango de estudio.

- Condiciones térmicas

#### 1. Temperatura Inicial

Es evidente que la temperatura es una variable del tiempo en este modelo, sin embargo, esta tiene un valor inicial. Para esto se asume que tanto las partículas del gas como el sustrato han entrado en un régimen estacionario antes del impacto de las partículas. Este supuesto se sostiene en que el gas calienta rápido al metal y que desde una perspectiva microscópica los impactos ocurren separados unos de otros como para afectarse térmicamente en un mismo instante.

De la tabla 1.1, la temperatura del gas utilizada en las muestras fabricadas es de 250 [°C]. Respecto de esto se utiliza que tanto el la partícula como el sustrato se encuentran a un 80 % aprox. de esta temperatura; 200 [°C]. Para efectos de las simulaciones se trabaja en temperaturas en escala Kelvin, sin embargo, este 80 % está aproximado suponiendo que todo está en un inicio a temperatura ambiente.[19] [2]

#### 2. Impacto Adiabático

Para efectos del modelo se considera que la partícula y el sustrato no intercambian temperatura por conducción. Todo el aumento de temperatura se debe a la energía cinética entregada durante el impacto. Esto se justifica en que el tiempo que le tarda a la partícula en alcanzar velocidad cero, instante en que ya entregó su máximo de energía cinética al sistema, es del orden de 100 [ns].

Este supuesto no resulta muy fuerte, no sólo por el bajo tiempo de contacto, sino porque la temperatura de la partícula al momento de impactar y la del sustrato son iguales, por lo cual no habría un  $\Delta T$  para generar conducción.

Lo anterior no significa que el modelo no considere conducción del todo, pues la conducción interna de calor de las parte sí resulta relevante. Esto se manifiesta principalmente en que la conducción interna del sustrato es el único mecanismo de enfriamiento que puede generar que eventuales elementos fundidos vuelvan a temperatura de sólido.

- Instante de impacto

Debido a que se esta asumiendo una  $T^\circ$  de llegada al impacto por parte de la partícula, el  $t_0$  del primer paso de tiempo corresponde al instante exactamente previo al impacto. Esto se traduce en un ahorro de tiempo de computo, sin pérdida de precisión en los resultados.

- Condiciones materiales

Para efectos del modelo se considera un material homogéneo, es decir, que sus propiedades mecánicas y físicas son constantes dentro de todo el volumen. Esto es igualmente válido tanto para la partícula como para el sustrato.

En el modelo, la partícula tiene las propiedades asignadas al  $Al_2O_3$  y el sustrato las del Al6061 T6.

- Condiciones de borde

Para el modelo se consideran 2 condiciones de borde

1. Producto que en la realidad el sustrato es muchísimo más grande que las partículas, se toma una condición de empotramiento en los extremos inferior y exterior del sustrato
2. Como se trata de un modelo axisimétrico, es necesario que los elementos del eje no puedan moverse en X puesto que en un modelo 2D esa sección tendría material deformándose de la misma forma. Se asigna esto a la cara interior del sustrato.

Estas condiciones se pueden apreciar incorporadas al modelo en la figura 2.5

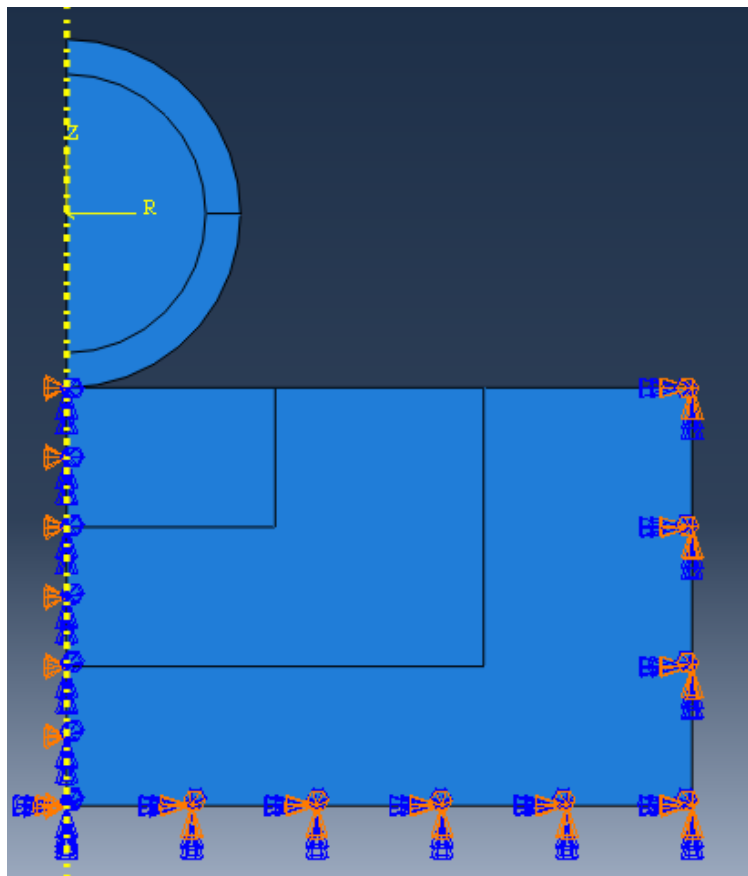


Figura 2.5: Condiciones de borde

- Condiciones de interacción

Tabla 2.4: Parámetros de J-C para AL6061 T6

Parámetro	Selección
Tipo de contacto	Duro
Roce transformado a calor	100 %
Coef. roce Partícula - Sustrato	1.5

Estas condiciones se toman como una aproximación puesto que es difícil modelar la fricción a escala micro y no es un parámetro relevante en este tipo de fenómenos. [10]

- Mallado adaptativo ALE

Debido a que la partícula es prácticamente rígida y que ocurren deformaciones altas y rápidas, resulta importante incorporar un método de control de distorsión. Para esto, se le incorpora un mallado adaptativo tipo ALE a la sección más pequeña del sustrato, ya que es esta la que se va a deformar más fuertemente, quedando las demás secciones solo absorbiendo el remanente del impacto. ABAQUS permite programar varios parámetros de ALE para que se adapte de forma particular a cada tipo de fenómeno. A continuación se presentan las selecciones realizadas, aplicando en cada caso la opción que de acuerdo al manual de usuario se adapta mejor a altas deformaciones.

Tabla 2.5: Parámetros de ALE

Parámetro	Selección	Aplicación
<i>Priority</i>	Razón de aspecto	Mejor para grandes deformaciones
<i>Smoothing algorithm</i>	Análisis por producto	Método default
<i>Meshing predictor</i>	Posición deformada actual	Mejor para grandes deformaciones
<i>Curvature refinement</i>	0,5	Alta deformación en bordes
<i>Weighting factor</i>	Laplaciano = 1	Mejor para grandes deformaciones
<i>Initial feature angle</i>	30°	Valor default
<i>Transition feature angle</i>	30°	Valor default
<i>Mesh constraint field angle</i>	60°	Valor default
<i>Advection</i>	Segundo orden	Mayor precisión
<i>Momentum Advection</i>	Proyección de elemento central	Menor tiempo de cómputo

Con estos parámetros ahora queda ver la implementación del ALE. Los 2 parámetros de la aplicación son cada cuantos incrementos se aplica el mallado adaptativo y cuantas pasadas realiza por vez. Las pasadas corresponde a las veces que calcula y adapta el mallado. De forma general se toma que se aplique el ALE cada 1 incremento con 10 pasadas.



## 2.2.4. Modelo Final

A continuación, en las figuras 2.6 y 2.7, se presenta como se ve el modelo final. La imagen corresponde al sistema generado por la partícula de 70  $[\mu\text{m}]$  de diámetro.

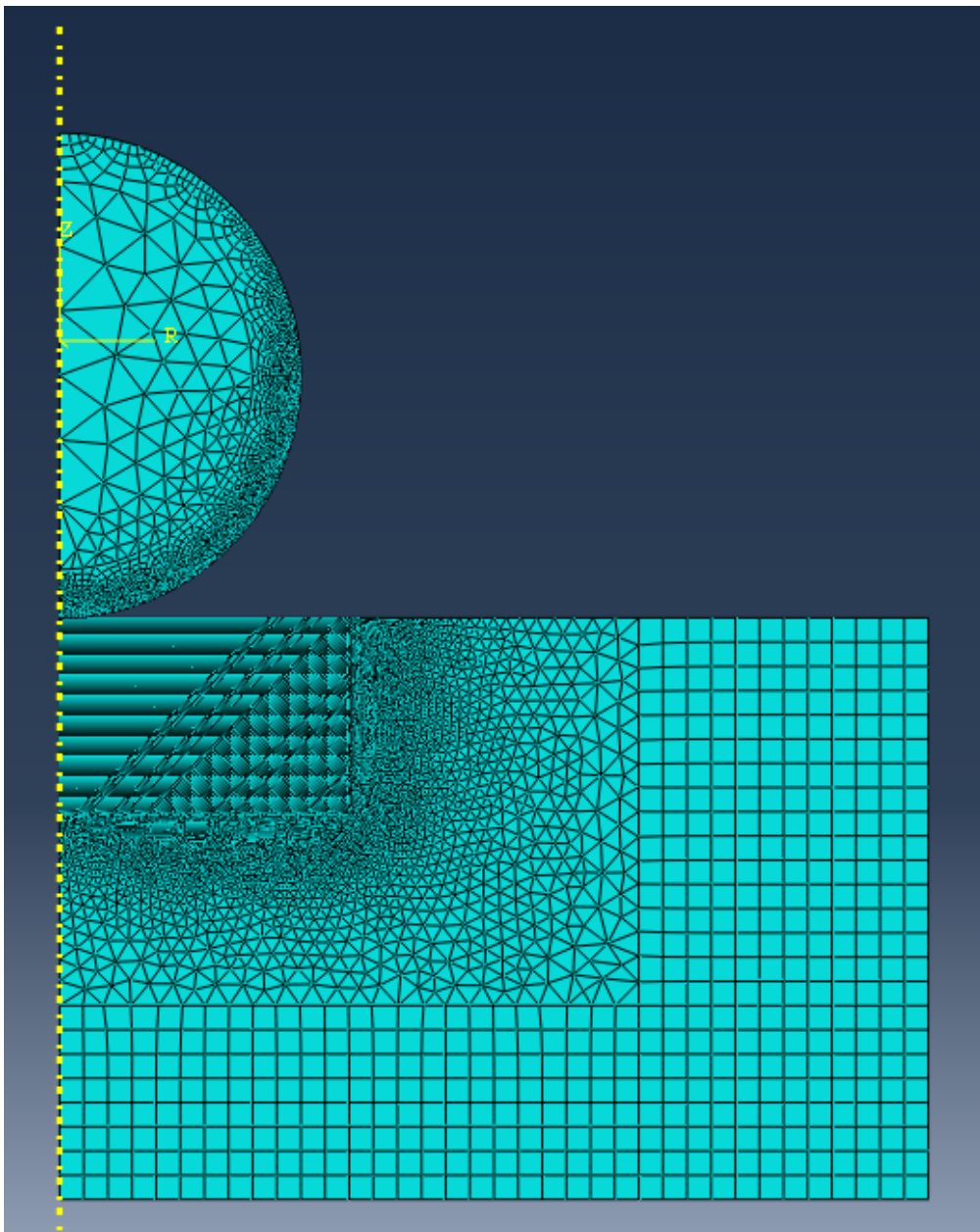


Figura 2.6: Mallado del modelo

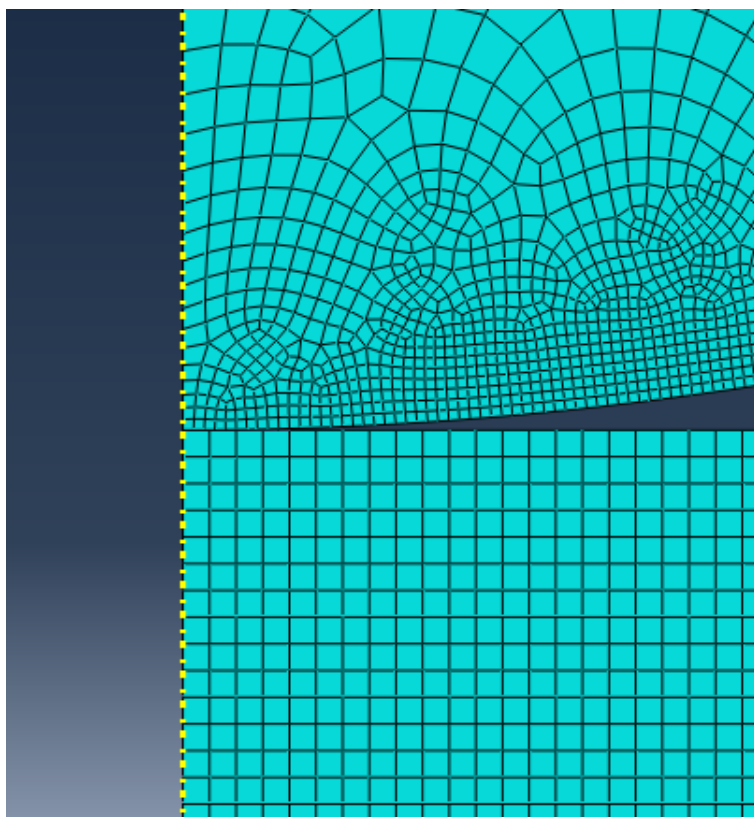


Figura 2.7: Acercamiento de la zona de contacto

### 2.2.5. Refinamiento de malla

Una vez obtenido el modelo, resulta necesario probar diferentes tamaños de malla para asegurarse que el tamaño de los elementos no influyen de manera importante en los resultados. Para este estudio se toma el modelo de  $100\ [\mu\text{m}]$  de diámetro y  $520\ [\text{m/s}]$  de velocidad, ya que presenta la mayor energía cinética y por lo tanto la interacción más fuerte con el sustrato. Se asume que si el mallado no se distorsiona para este caso, que en los demás casos la distorsión será menor.

#### 1. Representatividad

Resulta importante que el tamaño de los elementos entregue un rango razonable en el cual se pueda determinar que existe fusión. Para esto se propone que la sección de estudio tenga que presentar, de existir fusión, al menos 2 elementos con temperatura simulada superior a la temperatura de fusión.

#### 2. Convergencia

Al estudiar un fenómeno térmico es importante que el mallado no influya en la temperatura promedio que muestran los elementos. Esto es particularmente importante debido a que la velocidad de la onda plástica genera un gradiente en la temperatura muy fuerte. Este gradiente ocurre por la inestabilidad adiabática de corte representada en el modelo plástico de Johnson Cook del sustrato. En este sentido, se concentra mucho la temperatura en los elementos expuestos a las altas deformaciones de la interacción.

Como el fenómeno térmico es muy localizado se opta por estudiar sólo el primer micrón de profundidad. Para este efecto se toman los micrones cuadrados de este espesor y se toma el cuadro de tiempo en el cual la onda de calor pasa por ellos.

Para evitar los efectos transientes propios del modelo explícito, se toma el estado térmico luego de los primeros 10 [ns]. Como referencia los impactos se estudian en rangos del orden de 50 [ns] de duración. Al estudiar la versión sin deformación del modelo para este instante, se cumple que la onda de calor se encuentra contenida en el  $\mu m^2$  24.

Como el área de estudio es  $1 \mu m^2$ , para estudiar la convergencia se generaron modelos de las discretizaciones posibles, esto es, la cantidad de elemento por lado del cuadrado. Los elementos totales de cada modelo entonces corresponde a cada uno de los cuadrados perfectos (1, 4, 9, 16, etc). Se excluyen los casos de 1 y 4 elementos puesto que en caso de haber fusión no podrían cumplir con el criterio de representatividad, al ser muy pocos elementos para mostrar un gradiente. Los resultados de esta selección se presentan al inicio del capítulo de Resultados.

### 2.2.6. Obtención de resultados

En esta sección se presentan los valores obtenibles del modelo, el orden en que se obtienen y el objetivo para el cual se registran.

#### Valores base

Como primeros resultados se necesitan los valores básicos de entrada del sistema. Estos corresponden a parámetros que son iguales para el modelo computacional como para el análisis teórico debido a lo elementales de su naturaleza. La metodología asociada a sus cálculos se explican en 1.3 y 1.4. Estos valores son:

1. Área transversal de las partículas
2. Volumen de las partículas
3. Masa de las partículas
4. Energía cinética de las partículas

#### Dimensiones de la simulación

Una vez determinados todos los parámetros de la simulación, es importante determinar que rangos de espacio y tiempo del modelo abarca el fenómeno en estudio. La idea es comenzar el estudio con un primer acercamiento de la forma en que la energía es liberada y tener un marco general de la influencia del tamaño y velocidad de partícula en la duración y penetración del impacto. Para esto se determinan 2 variables principales:

1. Tiempo hasta que la partícula tiene velocidad 0.
2. Profundidad máxima alcanzada por la partícula

Es importante recordar que, aunque la partícula este completamente frenada, esto no supone que luego comience una separación, puesto que el sustrato tiene un tramo de recuperación

elástica. Lo anterior significa que el tiempo registrado hasta tener velocidad 0 esta asociado a la profundidad mayor y no a la profundidad de la deformación plástica permanente.

Para esto se toma el cuadro que maximiza el valor  $\ddot{U}$  de los parámetros de salida de la simulación y se registra el cuadro de tiempo en el cual esto ocurre. A continuación, en la figura 2.8, se muestra un ejemplo, asociado a una partícula de  $70 [\mu m]$  de espesor y  $400 [m/s]$  de velocidad:

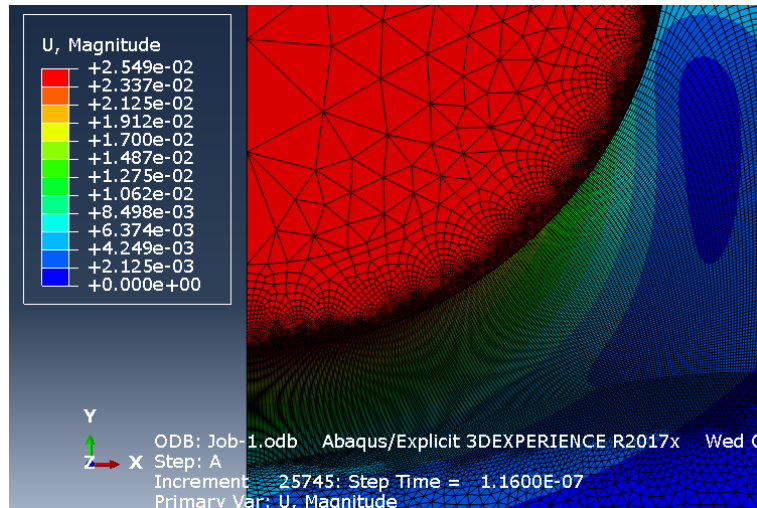


Figura 2.8: Ejemplo de máxima profundidad de impacto y tiempo asociado

En el ejemplo anterior se aprecia que el partícula se desplazó  $25,49 [\mu m]$  desde su posición inicial y le tomó  $116 [ns]$ . Como la partícula comienza en el instante exacto de contacto, esta distancia es análoga a la profundidad del impacto en ese momento.

### Valores de temperatura

Para evaluar la temperatura se consideran 2 parámetros de los valores de salida de la simulación:

1. EVOL (Element Volume)
2. TEMP (Element Temperature)

El primero corresponde al volumen del elemento y el segundo a la temperatura de este. Esto resulta relevante debido a que al estar usando ALE los elementos varían en volumen durante la simulación de forma de adaptarse a las altas deformaciones. Para el estudio se considera que un elemento se encuentra fundido cuando supera completamente la  $T_{sol}$ , no bastando que sólo algún nodo cumpla con esto.

Para efectos del análisis no se distingue entre elementos parcialmente fundidos ( $T > T_{sol}$ ) de elementos totalmente fundidos ( $T > T_{liq}$ ).

Para el estudio del material fundido se estudian 2 casos:

1. Caso con conducción

Este es el caso base y realista, que permite ver la forma y propagación de la onda de calor generada por la inestabilidad adiabática de corte. De este modelo se puede obtener el comportamiento de la competencia entre los 2 fenómenos térmicos que están ocurriendo: el alza de temperatura producto del impacto contra el enfriamiento por conducción. Lo anterior significa que, en el caso de haber fusión, debería presentarse una curva de volumen fundido en función del tiempo que sea creciente, mientras la tasa de generación de material fundido sea mayor que la de material enfriado, luego un peak o zona de emparejamiento de ambos fenómenos y finalmente una zona en la que el material se enfría más de lo que se funde.

Los resultados se obtienen viendo la variación de EVOL y TEMP en función de los cuadros de tiempo. Como regla general se estudian todos los elementos que se encuentren a una temperatura superior a 855 [K], o sea, se consideran como elementos fundidos al estar por sobre la temperatura de solidus a pesar de que en la teoría estos realmente están parcialmente fundidos. Esto se explica debido a que un elemento parcialmente fundido ya puede cambiar su forma y microestructura, lo cual son comportamientos mecánicos interesantes.

## 2. Caso sin conducción

Este caso supone que no existe enfriamiento por conducción interna de calor en el sustrato. Si bien esto implica un alejamiento de la realidad, permite estudiar otros aspectos interesantes del modelo. Debido a que el ALE utilizado para la estabilidad de la simulación genera volúmenes adaptativos, la suma parcial de elementos fundidos podría ser mayor que el volumen fundido real. Para esto se utiliza un modelo sin conducción, en el cual los elementos fundidos permanecen en ese estado y pueden sumarse los volúmenes parciales en un mismo cuadro final de tiempo.

Este valor entonces toma el máximo valor de volumen que se fundiría producto del impacto, ignorando el eventual material fundido que pudiera ocurrir por conducción neta. Es importante mencionar que debido a que el modelo necesita un valor de conductividad para funcionar, para el caso sin conducción se baja el valor del Al6061 T6 de 167 [W/NK] a 1E-11 [W/NK].

Para el estudio del comportamiento térmico se establecen 2 instantes relevantes:

### 1. Instante de estabilización

Se le nombra así al instante en el cual, de haberse generado fusión, ya se ha enfriado todo el material fundido. Este instante tiene sentido puesto que la fusión se genera por la entrega de energía cinética, por lo cual, como mientras más lenta vaya la partícula menos energía entrega, se puede asumir que una vez pasado este instante, en el futuro no se vuelve a generar más material fundido.

Además de la cantidad de tiempo que toma la estabilización, es importante saber la velocidad que le quedaba a la partícula en este instante. Esto ya que permite relacionar la energía entregada con el material fundido, quedando el resto de energía cinética como calor ineficiente que no producirá fusión.

Este instante se obtiene a partir del modelo **con conducción**, y es el límite de tiempo que se le impone al modelo sin conducción. Esto se debe a que el modelo sin conducción podría acumular material fundido por un tiempo mayor, generando valores incorrectos. Este instante sólo tiene sentido en el caso que ocurra fusión, por lo cual, a los mode-

los que no presenten material fundido se les asume un tiempo de estabilización de 0, quedando fuera del interés del análisis posterior.

## 2. Instante de *peak* de fusión

Se le nombra así al instante en el cual existe el mayor volumen fundido. Este *peak* se genera producto de la competencia entre la generación de material fundido y el enfriamiento del material por conducción. Lo anterior indica que evidentemente este instante ese obtiene del modelo **con conducción**.

El propósito de este instante es verificar cuanta es la mayor cantidad de material fundido que existe simultáneamente, cuándo ocurre y qué velocidad tenía la partícula en el. Estos parámetros son necesarios para verificar la naturaleza de la relación entre la energía entregada al sustrato y la energía restante en la partícula.

Durante el *peak*, podría generarse una zona de meseta en la cual el volumen fundido se mantenga dentro de un rango estable, sin embargo, como el material eventualmente se va a enfriar, siempre en el caso de fundirse debería manifestarse un máximo y/o una zona estable de máximo.

## 2.3. Comparación con el caso de estudio

Para realizar la comparación con muestras reales se deben comenzar desde la zona térmicamente afectada descrita por el fenómeno, presentada en la sección de antecedentes. El propósito es revisar la cercanía respecto del comportamiento teórico de forma cuantitativa y generar predicciones sobre el origen de las diferencias.

Para el balance de energía importa el volumen afectado térmicamente, por lo cual se puede acomodar la topología a una forma constante que permita dirigir el gradiente de temperatura en sólo 1 eje.

Para esto se toma que la zona térmicamente afectada tiene una forma cilíndrica con gradiente en Y. Esto se esquematiza en la figura 2.9

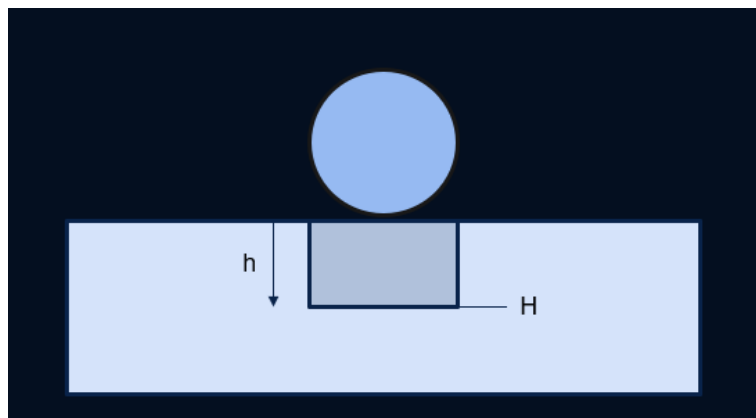


Figura 2.9: Esquema de volumen afectado térmicamente

Esta ecuación partiría como:

$$E_{cd} = \int_0^H \int_{T_0}^{T(H)} C_p(T) \cdot Vol_{sen} \cdot \rho dT dy + L \cdot Vol_{lat} \cdot \rho \quad (2.1)$$

En la ecuación anterior H representa la máxima profundidad de la zona térmicamente afectada por calor sensible, por lo cual la segunda integral representa la variación de temperatura desde  $t_0$ , el cual estaría ubicado en la superficie de impacto, hasta el final del volumen afectado mediante el calor sensible. Los volúmenes corresponden, por su parte, al volumen afectado por calor sensible y volumen afectado por calor latente.

Bajo el supuesto de que el calor específico es constante, el volumen afectado por el calor sensible puede calcularse de forma directa, sin tener que integrar la función de distribución de temperatura en función de la profundidad.

Al aplicar el supuesto de que el calor específico es constante, deja de importar la geometría (profundidad) del volumen afectado por calor sensible así como también la distribución de esta en función de la profundidad. Este supuesto es ampliamente utilizado en simulaciones de impacto ([4], [6]). La ecuación queda como:

$$E_{cd} = C_p \cdot Vol_{sen} \cdot \rho \cdot \Delta T + L \cdot Vol_{lat} \cdot \rho \quad (2.2)$$

Como segunda simplificación se toma que tanto el volumen afectado por calor latente como sensible es el mismo. Esto tiene por objetivo obtener el volumen fundido máximo teórico, si no hubiera volumen calentado bajo fusión ni tampoco material fundido sobrecalentado. Esto obviamente resulta ser un escenario imposible en lo real, sin embargo, facilita el estudio del comportamiento de las variables interesantes (tamaño/velocidad), al permitir relacionar de forma directa el volumen máximo teórico con el volumen real fundido. La ecuación entonces queda de la forma:

$$E_{cd} = Vol_{max} \cdot \rho \cdot (C_p \cdot \Delta T + L) \quad (2.3)$$

Es necesario recalcar que el primer supuesto de cambio de topología sólo tiene sentido luego de aplicar el criterio de evaluar para volumen máximo teórico del balance de energía. Esto, ya que esto plantea que lo que importa es la cantidad de volumen y no la forma. Si el análisis contemplara la deformación del material, este supuesto se volvería contradictorio y la ecuación planteada perdería sentido.

## 2.4. Tratamiento de resultados

### 1. Análisis por rango de tamaño

Aquí se fija la variable tamaño y se estudia la variación del comportamiento a los diferentes valores de la variable velocidad.

### 2. Análisis por rango de velocidad

Aquí se fija la variable velocidad y se estudia la variación del comportamiento a los diferentes valores de la variable tamaño.

### **3. Análisis por energía cinética**

Aquí se mezcla tanto el tamaño y la velocidad, estudiando el parámetro de energía cinética de forma completa, lo que permite estudiar todos los casos entre sí mediante una variable en común.

### **4. Interpretaciones y predicciones teóricas**

Finalmente se toma todo el análisis de los resultados y se acercan a las bases teóricas sobre las cuales se centra el estudio para poder generar predicciones respecto de recubrimientos reales.



# Capítulo 3

## Validación

Este capítulo tiene por objetivo presentar una validación de la metodología, utilizando un *paper* que estudie un fenómeno similar con una metodología equivalente.

Para este se utiliza el *paper* "General aspects of interface bonding in kinetic sprayed coatings" [4]. Las similitudes con el caso de estudio por el cual se elige son:

- Ambas utilizan un modelo explícito en ABAQUS.
- Ambas utilizan modelo axisimétrico, impacto de partícula única y dirección normal.
- Ambas utilizan los modelos de plasticidad de Johnson-Cook.
- Ambas estudian el aumento de temperatura para sustratos de aluminio.
- Ambas se centran en analizar la zona de interfaz, donde ocurre la inestabilidad adiabática de corte.

Se diferencian principalmente en los materiales ocupados, ya que el *paper* a validar utiliza aluminio tanto para la partícula como para el sustrato.

Este documento además estudia es amplio y compara otros materiales como acero y titanio. Además realiza pruebas experimentales, los cuales son aspectos que no interesa validar en esta sección, al alejarse de la metodología de estudio.

### 3.1. Modelo a validar

En esta sección se describe el modelo a validar. Esto corresponde a los mallados, materiales, condiciones, rangos de tamaño y de velocidad a utilizar.

En primer lugar, es necesario elegir uno de los múltiples modelos estudiados en el documento original. De las múltiples combinaciones disponible, y sin pérdida de generalidad, se opta por validar mediante el caso de partícula y sustrato de Al.

Las propiedades materiales se presentan en la tabla original:

Table 3  
Material properties used in FE models

Parameter/material	Cu	Al	Ni	Ti	Mild steel
Density ( $\text{kg m}^{-3}$ )	8960	2710	8890	4510	7870
Young's modulus (GPa)	124	68.9	207	116.0	200.1
Poison's ratio	0.34	0.33	0.31	0.34	0.30
Heat capacity ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	383	904	456	528	481
Melting temperature (K)	1356	916	1726	1923	1793
$A$ (MPa)	90.0	148.4	163.0	806.57	532.0
$B$ (MPa)	292.0	345.5	648.0	481.61	229.0
$n$	0.310	0.183	0.330	0.319	0.3024
$C$	0.025	0.001	0.006	0.0194	0.0274
$m$	1.09	0.895	1.44	0.655	1.0
Reference temperature (K)	298	293	298	298	283
Reference strain rate ( $\text{s}^{-1}$ )	1	1	1	1	1

Figura 3.1: Propiedades materiales del *paper*

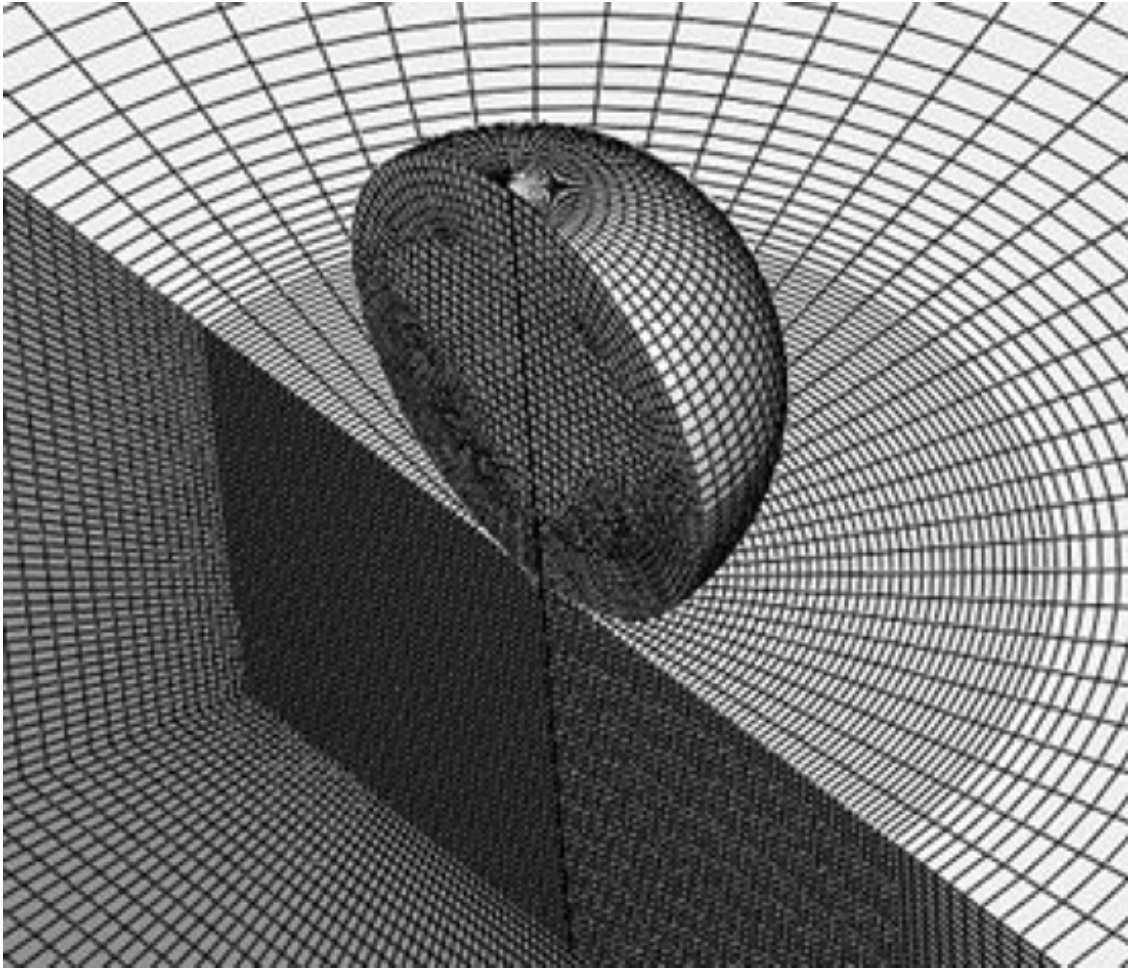


Figura 3.2: Modelo geométrico

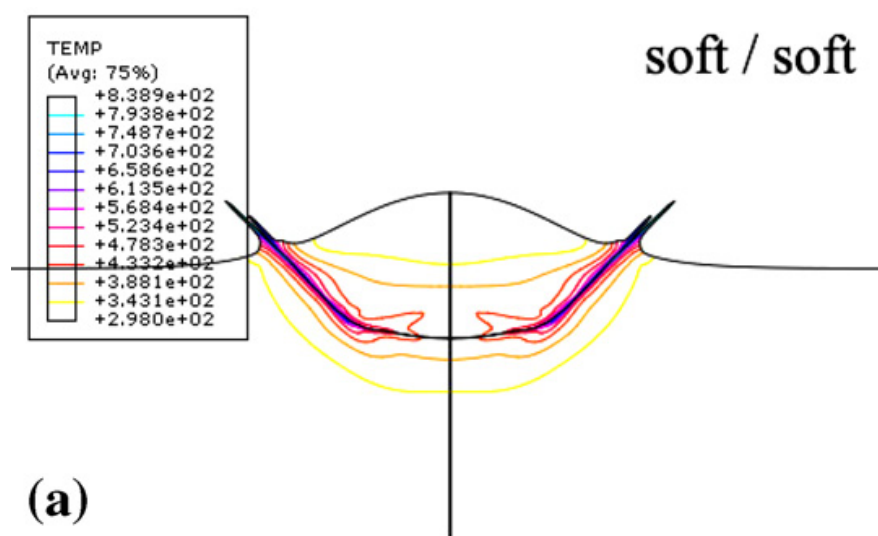
De la figura 3.2 se identifican las selecciones de secciones y mallados del modelo. La partícula cuenta con 2 secciones, la primera en que la mitad superior es de 25 elementos y la inferior es de visualmente el doble (50 elementos). El sustrato cuenta con una sección de mallado refinado de tipo estructurado con mallado similar al de los elementos de la mitad inferior de la partícula. Esta sección es cuadrada de lado de igual tamaño al diámetro de la partícula. El resto del sustrato son elementos que crecen de forma ordenada para mantener un número fijo de elementos en el borde de la sección mayor.

De acuerdo al trabajo original, el modelo es planteado como sin conducción y generación interna de calor por modelo de balance de calor. Este balance se determina como que el 90 % de la energía se disipa en forma de calor, mientras que el otro 10 % queda almacenado como potencial de tensiones elásticas.

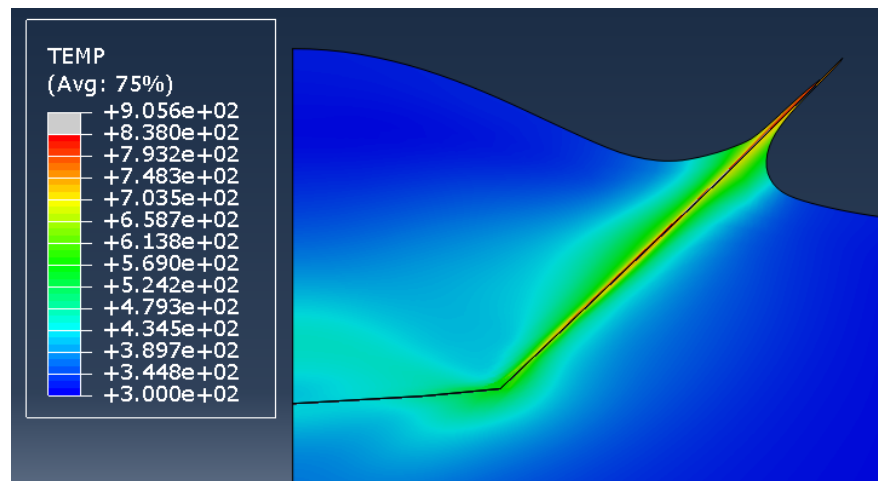
Para el caso de estudio (partícula y sustrato de Al), se toma una partícula de 25 [ $\mu\text{m}$ ] de diámetro y una velocidad de impacto de 775 [m/s].

## 3.2. Resultados

A continuación, en la figura 3.3, se presentan de forma comparativa los resultados obtenidos por el modelo original y los de la validación:



(a) Deformación del modelo original



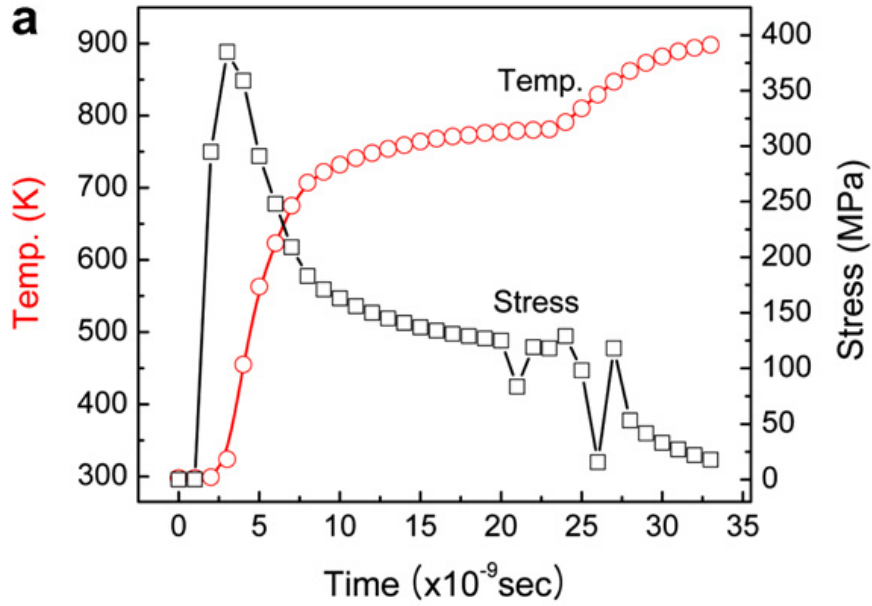
(b) deformación del modelo validado

Figura 3.3: Comparación semi cualitativa del impacto

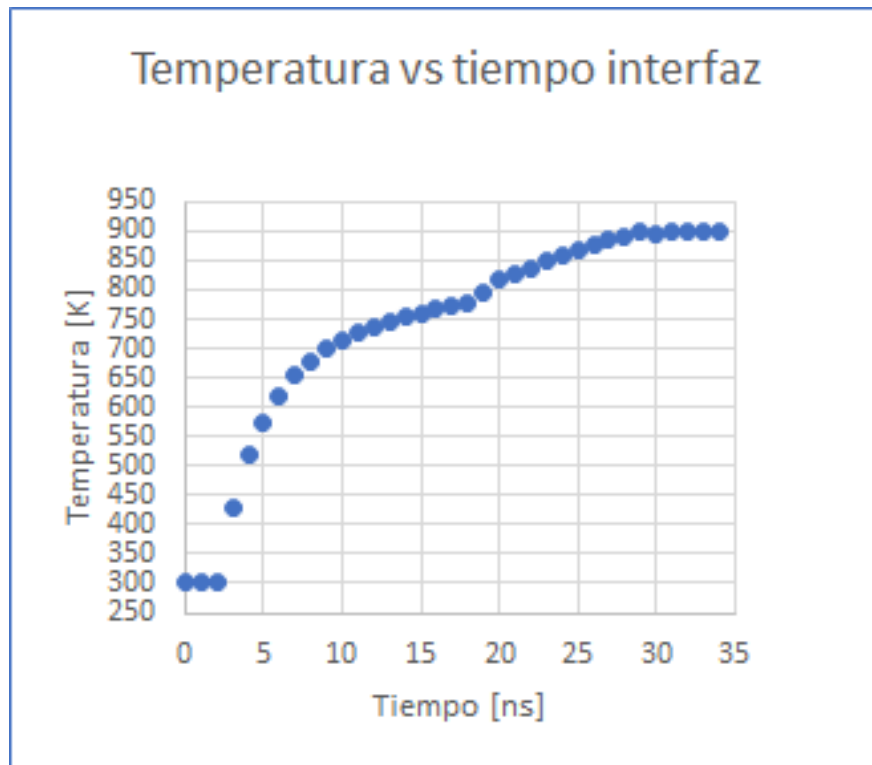
Imponiendo igual escala de temperatura, se puede apreciar que en ambas imágenes se aprecian comportamientos similares. En primer lugar ambos impactos generaron un patrón de deformación similar, con un *jetting* de material en el borde exterior de la interfaz y un ángulo fuertemente marcado en la zona interna de impacto. Respecto del comportamiento térmico se puede identificar una concentración del aumento de temperatura en la zona de interfaz. Esto resulta coherente con el modelo de deformación plástica de Johnson Cook empleado, al representar el efecto de las inestabilidades adiabáticas de corte.

Una vez que se pudo comprobar que el comportamiento de rasgos generales fue logrado,

resulta necesario realizar un análisis cuantitativo. Para esto se toma el comportamiento térmico en la la sección de alta deformación de la interfaz. Para esto se cuenta con una curva de temperatura en función del tiempo tanto para el modelo original como para el validado. A continuación, en la figura 3.4, se presentan ambas curvas:



(a) Comportamiento modelo original



(b) deformación del modelo validado

Figura 3.4: Comparación cuantitativa impacto

Comparando ambas curvas es posible concluir que ambas representan de forma similar al fenómeno. En un principio ambas tienen un aumento violento de temperatura, superando el umbral de los 700 [K] cerca de los 10 [ns] para luego mantenerse con un crecimiento lento y estable en el rango de 700 a 800 [K]. Producto de la alta deformación se genera un momento en que la inestabilidad adiabática de corte estimula un segundo aumento de temperatura, el cual va desde los 800 [K] a cerca de 900 [K]. Ambas curvas cuentan con igual límite temporal (34 [ns]) e igual paso de incrementos (1 [ns]). La principal diferencia entre ambas curvas radica en el instante de tiempo en el cual comienza a hacer efecto el cambio de régimen de la inestabilidad adiabática de corte, ocurriendo cerca de los 24 [ns] para el modelo original y cerca de los 19 [ns] para el modelo de la validación. Esta diferencia hace ver un comportamiento más suave en el cambio de régimen en la curva del modelo validado, no afectando los valores finales que alcanza la temperatura en cada uno de los tramos de la curva. Esta diferencia de temporalidad puede originarse en condiciones impuestas al modelo que no estén explícitas en el documento original, como controles de distorsión de elementos o precisiones especiales al refinamiento de malla en el borde.

# Capítulo 4

## Resultados y Análisis

A continuación se presentan los resultados obtenidos de acuerdo a la secuencia presentada en la metodología:

### 4.1. Selección del tamaño de malla

Se estudiaron los casos de 1 hasta 9 elementos por lado, esto se traduce a elementos cuadrados de 1000 [nm] de arista hasta 111 [nm], obteniendo el siguiente comportamiento (figura 4.1):

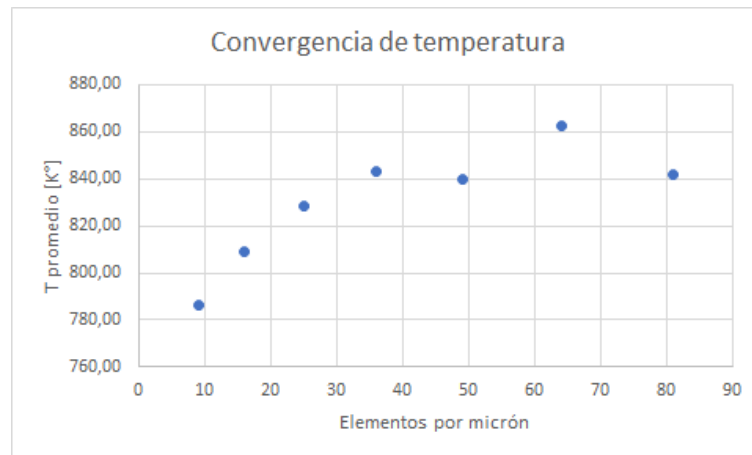


Figura 4.1: Gráfico de T promedio vs elementos por micrón

Tomando el caso de 81 elementos como el caso de mayor resolución, se establecen diferencias relativas en la siguiente tabla:

Tabla 4.1: Temperaturas promedio por numero de elementos

N° Elementos	T prom [°K]	Diferencia %
9	786,35	93,43
16	809,33	96,16
25	828,16	98,40
36	843,06	100,17
49	839,76	99,78
64	862,39	102,47
81	841,61	100

Se puede apreciar que sobre 36 elementos por micrón (caso para elementos de 1/6 de micrón de arista), la temperatura se estanca en un rango de 20 [°C]. Esto se manifiesta en diferencias inferiores al 3% en temperatura absoluta.

A continuación se muestran, en las figuras 4.2 y 4.3, imágenes asociadas al caso de 64 elementos por micrón (elementos de 125 [nm] de arista). En la escala se toma como morado todo lo que está bajo la  $T_{sol}$ , para que así toda la escala represente la zona parcial o totalmente fundida. Primero, el comportamiento de la onda de calor a los 10 ns, en una figura sin y con deformación, y luego acercamiento al micrón de estudio.

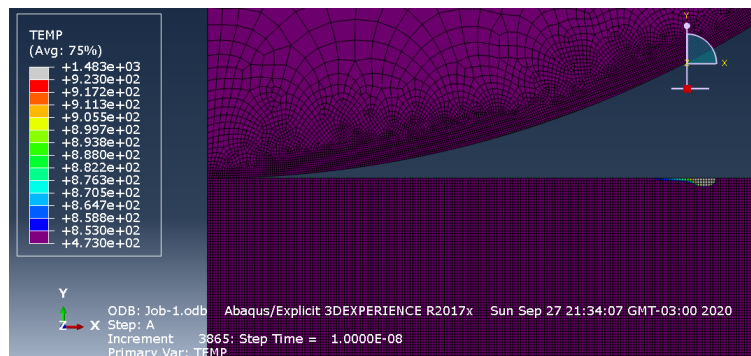


Figura 4.2: Comportamiento sin deformación de la onda de calor a los 10 [ns]

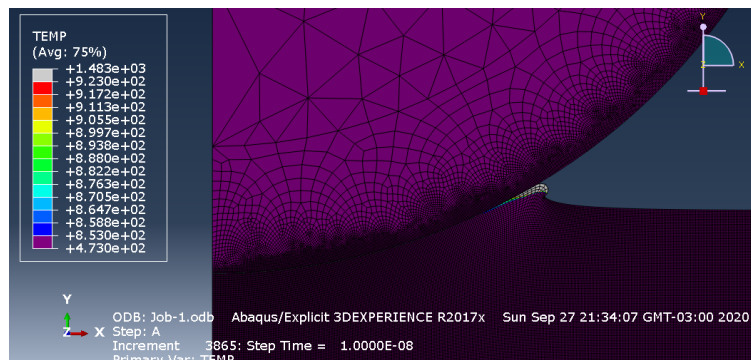


Figura 4.3: Comportamiento con deformación de la onda de calor a los 10 [ns]



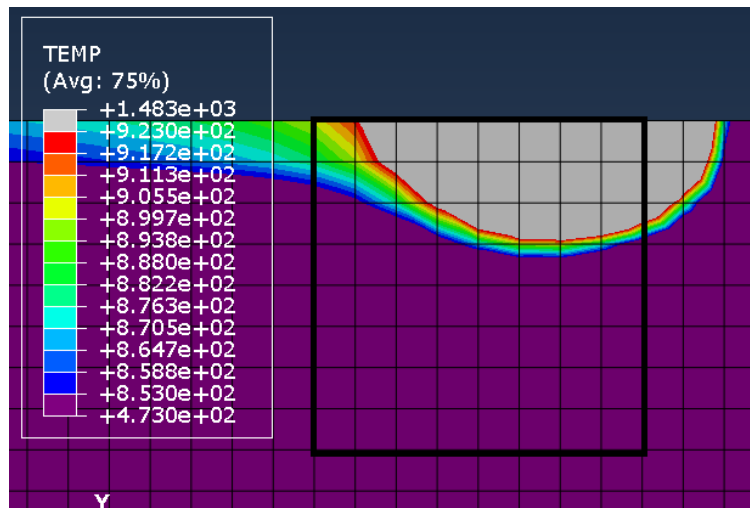


Figura 4.4: Comportamiento con 75 % de umbral promedio

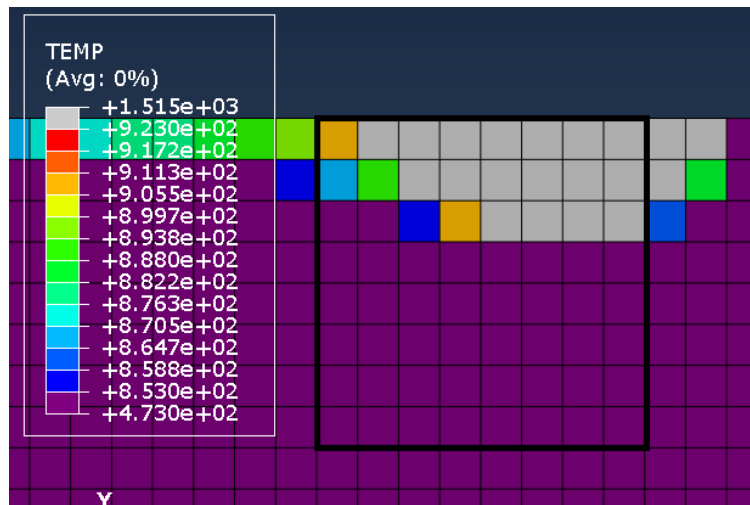


Figura 4.5: Comportamiento con 0 % de umbral promedio

Las figuras 4.4 y 4.5 representan el micrón de estudio en el recuadro negro con diferentes aproximaciones. La primera es con un umbral de promedio de 75 %, lo que significa que si entre 2 nodos hay una una aproximación del comportamiento entre un nodo y el siguiente. El segundo caso muestra el valor absoluto de temperatura del elemento sin aproximaciones.

De acuerdo a lo presentado se elige 125 [nm] de arista para los elementos de mayor de la sección del sustrato expuesta al impacto. Esto supone 64 elementos por micrón. Como se mencionó anteriormente, para que la partícula transmita correctamente los esfuerzos se optó porque su malla fuera más fina que la del sustrato en su superficie, por lo cual se le asigna una malla que comienza con elementos de 100 [nm] de arista.

## 4.2. Valores Base

De acuerdo a lo presentado en la metodología, el primer paso para obtener resultados es tener los valores base del caso de estudio.

Tabla 4.2: Valores base del caso de estudio

Caso	D [ $\mu m$ ]	V [m/s]	A [ $\mu m^2$ ]	Vol [ $\mu m^3$ ]	m [ $\mu g$ ]	Ec [ $\mu J$ ]
1	10	340	78,54	523,59	0,002	0,119
2	10	400	78,54	523,59	0,002	0,165
3	10	460	78,54	523,59	0,002	0,218
4	10	520	78,54	523,59	0,002	0,279
5	40	340	1256,63	33510,32	0,132	7,650
6	40	400	1256,63	33510,32	0,132	10,589
7	40	460	1256,63	33510,32	0,132	14,004
8	40	520	1256,63	33519,32	0,132	17,895
9	70	340	3848,45	179594,38	0,709	41,003
10	70	400	3848,45	179594,38	0,709	56,751
11	70	460	3848,45	179594,38	0,709	75,054
12	70	520	3848,45	179594,38	0,709	95,910
13	100	340	7853,98	523598,77	2,068	119,542
14	100	400	7853,98	523598,77	2,068	165,457
15	100	460	7853,98	523598,77	2,068	218,817
16	100	520	7853,98	523598,77	2,068	279,622

Todos los valores anteriores corresponden a los valores obtenidos de forma analítica. En el comportamiento real no se puede asegurar que las partículas tengan diámetros exactos, masas homogéneas, etc.

## 4.3. Dimensiones de la simulación

Siguiendo la metodología presentada se obtienen los valores de tiempo hasta que la partícula obtiene velocidad 0 y la profundidad que alcanza el impacto.

Tabla 4.3: Dimensiones de la simulación

Caso	D [ $\mu m$ ]	V [m/s]	t(V <sub>0</sub> )[ns]	d [ $\mu m$ ]
1	10	340	15	2,88
2	10	400	16	3,47
3	10	460	16	4,08
4	10	520	17	4,78
5	40	340	60	11,75
6	40	400	65	14,32
7	40	460	69	17,12
8	40	520	74	20,22
9	70	340	112	20,91
10	70	400	116	25,49
11	70	460	124	30,54
12	70	520	130	35,91
13	100	340	158	30,21
14	100	400	168	36,94
15	100	460	180	44,27
16	100	520	192	52,17

### 4.3.1. Tiempo de frenado

A continuación, en la figura 4.6, se presenta el comportamiento del tiempo de frenado en función de la energía cinética:

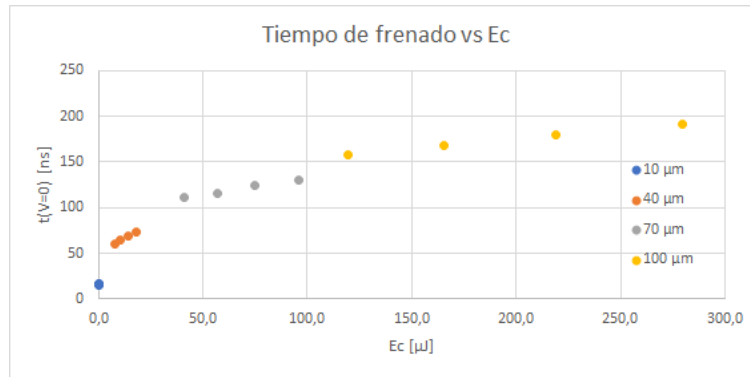


Figura 4.6: Tiempos de frenado para todas las Ec

Para los 3 diámetros mayores se identifican comportamientos localmente lineales, lo que nos indica la forma en que se relaciona la energía cinética con la profundidad. Recordando que esta energía se construye de la masa y velocidad de la partícula, se puede identificar que para obtener, por ejemplo, el doble de tiempo de frenado sería necesario duplicar la densidad de la partícula o bien aumentar la velocidad en  $\sqrt{2}$  ( $\approx 1,414$ ). La justificación para hablar de densidad y no de masa radica en que estos comportamientos lineales se observan para cada caso de diámetro, por lo cual la curva no está considerando el efecto del área de impacto en el frenado.

Para el caso de 10  $[\mu m]$ , se cree que también tiene un comportamiento lineal, sin embargo, la resolución del modelo en la dimensión temporal es de 1 [ns], por lo cual no estaría ocurriendo que para 2 valores diferentes de energía cinética tuviera exactamente igual tiempo de frenado. (Ver elementos 3 y 4 de la tabla 4.3)

Un aspecto interesante de los resultados anteriores radica en que a la velocidad de 520 [m/s], las 4 partículas penetraron una profundidad similar a 1 radio. Esto queda reflejado en la siguiente tabla:

Tabla 4.4: Profundidad para 520 m/s

r $[\mu m]$	d $[\mu m]$	d/r [%]
5	4,78	95,6
20	20,22	101,1
35	35,91	102,6
50	52,17	104,3

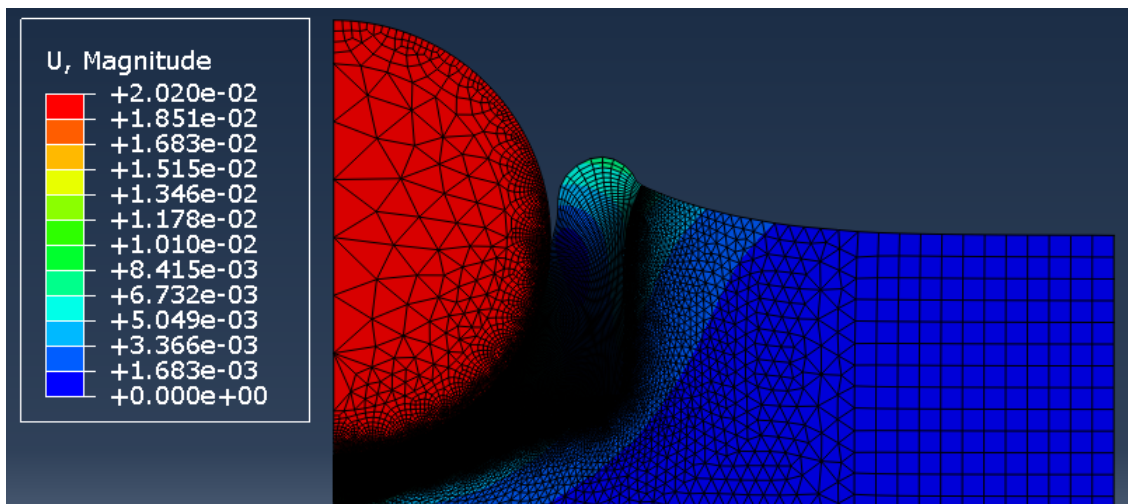


Figura 4.7: Profundidad de impacto de partícula de 40  $[\mu m]$  a 520 [m/s]

El resultado anterior se visualiza en la figura 4.7 y tiene 2 implicancias importantes:

En primer lugar tenemos que esto nos indica que existe una velocidad límite desde la cual las partículas penetran una profundidad cercana a 1 radio. Esta velocidad de acuerdo a los resultados anteriores estaría cercana a los 520 [m/s]. La importancia de este valor radica en que, una penetración superior a 1 radio podría generar un efecto en el cual la deformación generada comienza a rodear a la partícula, adaptando su forma a esta. Lo anterior supondría una mayor dificultad al rebote de la partícula, y aumentaría la probabilidad de generar una unión mecánica. Además, de generarse material fundido entre la partícula y el sustrato, este fenómeno podría favorecer la exposición a mayores tiempos de contacto entre ambas superficies, aumentando los efectos térmicos de adaptación de la forma y microestructura del sustrato respecto de la forma de la partícula.

El segundo efecto importante es que esta propiedad sólo sería dependiente de la velocidad de la partícula y se comportaría de forma constante respecto del tamaño relativo entre la partícula y la penetración. Probablemente esto no sea constante para todo rango de tamaños y para impactos de partículas mucho más pequeñas o más grandes existan otros comportamientos mecánicos que afecten de mayor manera.

De las figura anterior se puede identificar que de forma local los comportamientos son lineales, sin embargo, el comportamiento general corresponde a una curva siempre creciente de forma raíz.

Ajustando esta curva a una función potencia ( $k \cdot x^n$ ), obtenemos el siguiente comportamiento (figura 4.8):

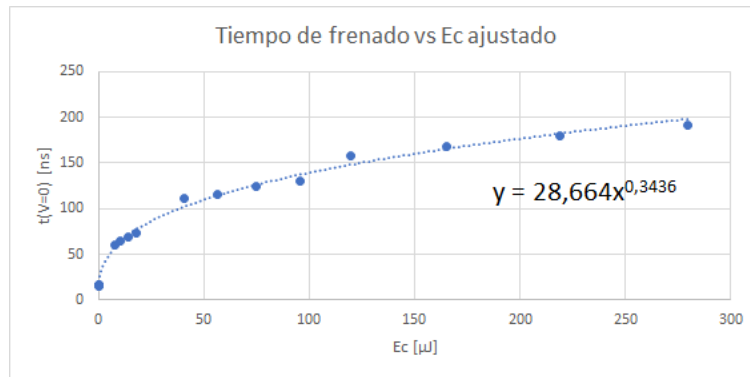


Figura 4.8: Tiempos de frenado ajustado por potencia

El ajuste nos entrega que la función potencia tiene un  $k=28,664$  y un  $n=0,3436$ . Este exponente resulta muy similar a una función teórica que fuera raíz cúbica ( $n=0,3333$ ).

### 4.3.2. Profundidad de impacto

A continuación, en la figura 4.9, se presenta el comportamiento de la profundidad de impacto en función de la energía cinética:

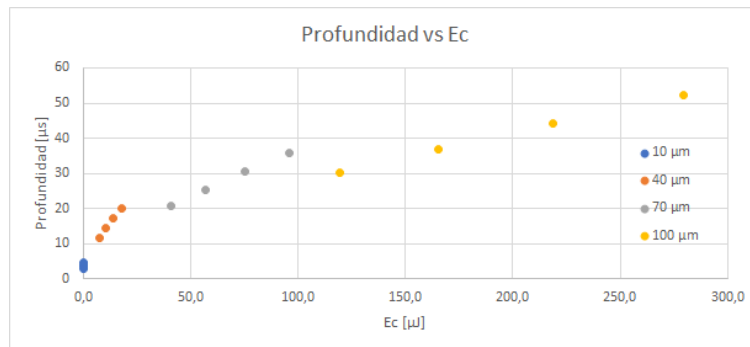


Figura 4.9: Profundidad de impacto para todas las  $Ec$

Para los 4 diámetros se identifican comportamientos localmente lineales, lo que nos indica

la forma en que se relaciona la energía cinética con la profundidad. Recordando que esta energía se construye de la masa y velocidad de la partícula, se puede identificar que para obtener, por ejemplo, el doble de penetración sería necesario duplicar la densidad de la partícula o bien aumentar la velocidad en  $\sqrt{2}$  ( $\approx 1,414$ ). La justificación para hablar de densidad y no de masa radica en que estos comportamientos lineales se observan para cada caso de diámetro, por lo cual la curva no está considerando el efecto del área de impacto en el frenado.

Al unir las curvas se puede identificar un comportamiento tipo raíz, pero a diferencia del caso del tiempo de frenado, aquí las rectas parecieran ser tangenciales a una curva, más que ajustarse en su globalidad entre ellas. Realizando nuevamente un ajuste de curva a una función potencia ( $k \cdot x^n$ ), obtenemos el siguiente comportamiento (figura 4.10):

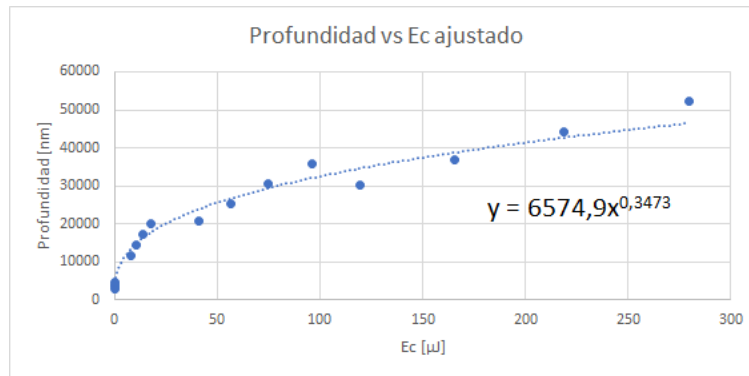


Figura 4.10: Profundidad de impacto ajustado por potencia

El ajuste nos entrega que la función potencia tiene un  $k=6574,9$  y un  $n=0,3473$ . Este exponente resulta muy similar a una función teórica que fuera raíz cúbica ( $n=0,3333$ ).

Debido a que el tiempo de frenado (tiempo) y la profundidad de impacto (distancia) tienen exponentes muy similares,  $0,3436$  y  $0,3473$  respectivamente, resulta directo verificar que existiría una velocidad media constante durante el frenado de la partícula. Considerando que la diferencia entre potencias es despreciable (ambos  $n$  tienen menos de un 2% de diferencia), podemos dividir ambas ecuaciones y obtener que la velocidad media de las partículas durante el frenado corresponde a  $229,37$  [m/s] ( $\approx 230$  [m/s]).

El comportamiento anterior es fuertemente consistente dentro del rango de estudio, sin embargo, seguramente cambia en otros rangos de velocidad. Un ejemplo directo de esto es que si la velocidad de la partícula es inferior a  $230$  [m/s] su velocidad media durante el frenado no puede ser superior a esta.

La energía cinética depende tanto de la velocidad como del tamaño de la partícula, sin embargo, intuitivamente resulta necesario verificar el efecto del área del impacto de la partícula, es decir, a igual energía cinética una partícula muy pequeña pero muy rápida debería generar un impacto diferente de una grande y lenta.

Para lo anterior, se toma la energía cinética por unidad de área proyectada de la partícula, es decir, la sombra proyectada de la partícula sobre el sustrato.

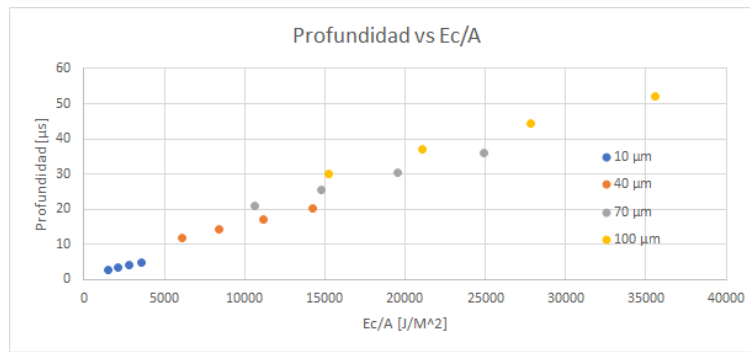


Figura 4.11: Profundidad de impacto normalizado por área

De la figura 4.11 se puede apreciar que de forma general existe un comportamiento lineal de la profundidad respecto del área en la cual liberan la energía, sin embargo, cada a medida que aumenta el diámetro las curvas se posicionan en niveles mayores de profundidad.

Resulta interesante que cerca de los 15000 [ $J/m^2$ ] se produce una zona en la cual coexisten las partículas de 40, 70 y 100 [ $\mu m$ ]. En esta región se aprecia que manteniendo la energía por área se aumenta en cerca de un 50 % la profundidad del impacto entre la partícula de 40 a la de 100 [ $\mu m$ ]. Esto nos da una idea sobre el comportamiento de profundidad de impacto que lograría un recubrimiento generado con un material más denso manteniendo fija la velocidad. Se descarta el caso de partículas alargadas (que aumentarían masa y no área) por lo poco realista que sería manejar su deposición de forma perpendicular al sustrato.

## 4.4. Resultados térmicos

Una vez que tenemos los valores del comportamiento en las dimensiones de la simulación se puede ahora estudiar el comportamiento térmico que ocurre dentro de este tiempo.

Primero tomamos los valores a los 2 instantes interesantes planteados anteriormente, estabilización y *peak*, para cada uno de los 16 casos. Estos resultados generales se presentan en la siguiente tabla, para luego ser analizados con mayor detención. Para cada instante se presenta el momento en el que ocurre, la velocidad que le quedaba a la partícula y el volumen asociado (volumen máximo asociado al caso sin conducción o volumen de *peak* asociado al caso con conducción).

Por simplicidad se presenta los resultados ordenados por tamaño y por velocidad en tablas diferentes a pesar de contener la misma información.

El análisis se presenta en 3 secciones; un análisis preliminar basado en la variación manteniendo fijo el tamaño o la velocidad, un análisis profundo enfocado en la energía cinética y finalmente las interpretaciones de los resultados sus predicciones asociadas.

#### 4.4.1. Análisis preliminar

##### Análisis por rangos de tamaño de partículas

En la tabla 4.11 se presentan los valores obtenidos para los casos en los que hubo material a temperatura que podría generar material fundido. Los casos en los que esto no ocurre se denotan como ”-”

Tabla 4.5: Resultados ordenados por tamaño

Mod	D [ $\mu m$ ]	V [m/s]	$t_{est}$	$V_{est}$	$Vol_{max} [\mu m^3]$	$t_{peak}$	$V_{peak}$	$Vol_{peak} [\mu m^3]$
1	10	340	-	-	-	-	-	-
2	10	400	-	-	-	-	-	-
3	10	460	-	-	-	-	-	-
4	10	520	-	-	-	-	-	-
5	40	340	-	-	-	-	-	-
6	40	400	-	-	-	-	-	-
7	40	460	14	400	243,73	13	405	28,87
8	40	520	22	390	661,61	18	415	155,33
9	70	340	60	180	1904,98	48	225	114,49
10	70	400	66	195	3502,13	48	265	701,84
11	70	460	80	180	3903,72	50	300	1430,89
12	70	520	92	165	4577,73	40	385	1678,30
13	100	340	102	140	4260,47	67	230	753,83
14	100	400	120	135	5223,46	52	310	2002,87
15	100	460	146	100	5889,74	38	390	2520,79
16	100	520	184	30	6373,95	120	210	3603,47

Diámetro de 10 [ $\mu m$ ]

De la tabla 4.11 se puede identificar es que para el caso de la partícula de 10 [ $\mu m$ ] no se observa material fundido para ninguna de las 4 velocidades. Si bien la energía cinética aumenta sólo lineal con la temperatura, aumenta de forma cúbica con el volumen, por lo cual esta partícula es significativamente menor energéticamente que las de los diámetros superiores. Como referencia la partícula de 10 [ $\mu m$ ] más rápida tiene una energía cinética cercana a un 3,6 % de la energía cinética de la de 40 [ $\mu m$ ] más lenta.

En primera instancia se podría asumir que este resultado se debe a una falta de sensibilidad de la malla, al ocupar el mismo mallado en tamaño para todos los casos, sin embargo, al ver el comportamiento durante la deformación se puede evidenciar que los elementos superficiales que toman la forma del impacto reducen importantemente su espesor, lo cual se refleja en la siguiente imagen:



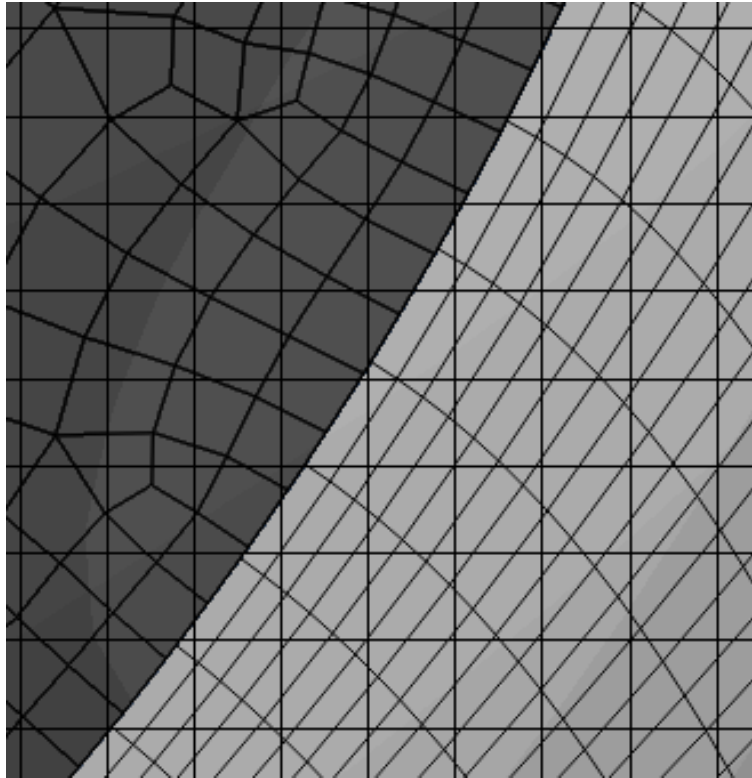


Figura 4.12: Espesor elementos para D10 520 m/s

En la figura 4.12 se muestra la partícula en un gris oscuro y en gris claro. Este acercamiento fue tomado de la partícula más pequeña y rápida (D10, 520 m/s) y se aprecian 2 tipos de mallas superpuestas, una de elementos curvos y alargados generador por el mallado adaptativo ALE y elementos cuadrados, el cual es la malla original de elementos cuadrados de 125 [nm] de arista. De forma aproximada se puede apreciar que los elementos adaptados tienen unos 40 a 50 [nm] de espesor. Lo anterior significa que la resolución real del mallado mucho menor a la inicial, lo cual asegura que efectivamente, de ocurrir fusión, el espesor de esta capa sería inferior a uno 45 [nm].

Profundizando lo anterior es que, no se pudo apreciar fusión para ninguno de los casos, por lo cual si para el caso más energético el espesor es máximo unos 40 [nm], para los casos menos energéticos, de ocurrir, se acercaría a espesores aún mas delgados. De esto se concluye que, independiente de si se genera material fundido o no, para las partículas de 10 [ $\mu m$ ]. Estos espesores, para efectos concretos, no serían significativos por 2 motivos; en primer lugar ser muy delgado como para modificar las propiedades mecánicas de la unión y en segundo lugar ser demasiado delgado como para no verse afectado fuertemente por la conducción.

A continuación se presenta los 4 casos de velocidad tomando en espectro de color el rango 700 [° K] hasta 855 [°K]. Este rango es para mostrar cuan cerca estuvieron los elementos de alcanzar la  $T_{sol}$

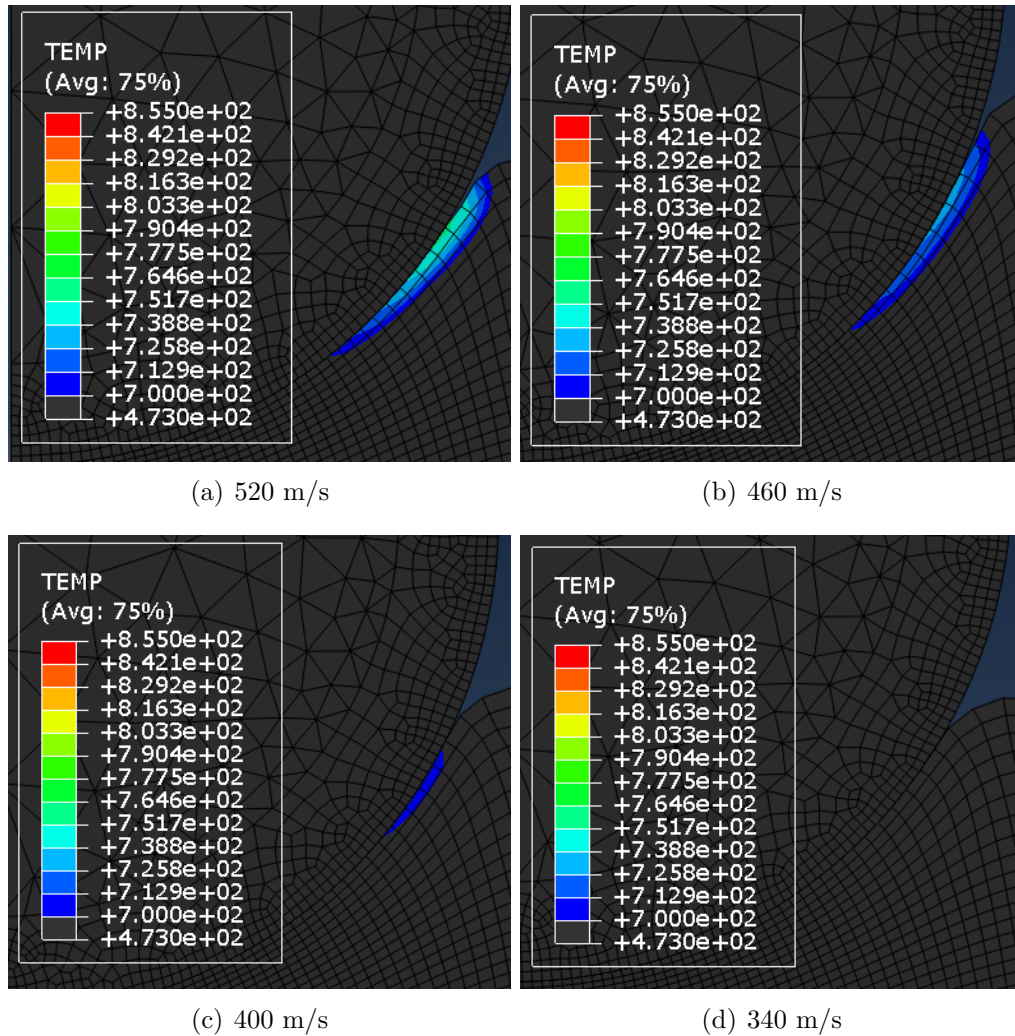


Figura 4.13: *Peak* de temperatura para las 4 velocidades

De la figura 4.13 se puede deducir que con bastante seguridad no ocurrió fusión de material en este impacto, puesto que los elementos de mayor temperatura en el caso más energético alcanzaron cerca de 760 [°K].

Diámetro de 40 [ $\mu m$ ]

La partícula de 40 [ $\mu m$ ] muestra un caso mixto, en el cual las 2 partículas más lentas no presentaron material fundido y las 2 más rápidas si lo hicieron.

Para poder proyectar este comportamiento se presentan los instantes de mayor temperatura para las 2 partículas de menor velocidad. Esto con la intención de analizar la influencia del espesor de los elementos adaptados.

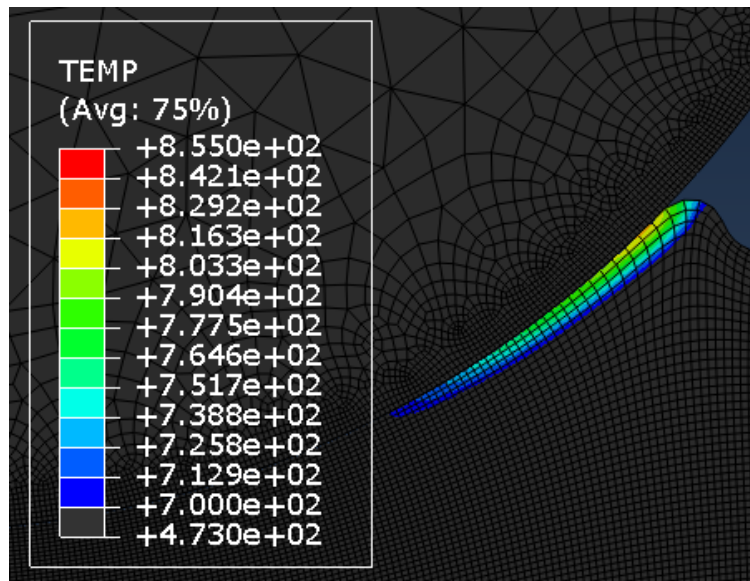


Figura 4.14: *Peak* de temperatura para 340 m/s

Para la partícula de 40 [ $\mu\text{m}$ ] a 340 [m/s] se puede identificar en la figura 4.14 que existe una franja de elementos en el rango de 803 [°K] a 816 [°K]. Esto significa que estos elementos se encuentran a aproximadamente 50 [°K] de entrar en el rango de fusión. Se puede entonces descartar que el material fundido sea significativo ya que tendría un espesor cercano a 50 [nm] de espesor (los elementos del borde la partícula son de 100 [nm] de arista como referencia) y sólo se encontraría en el centro de los 4 elementos de mayor temperatura.

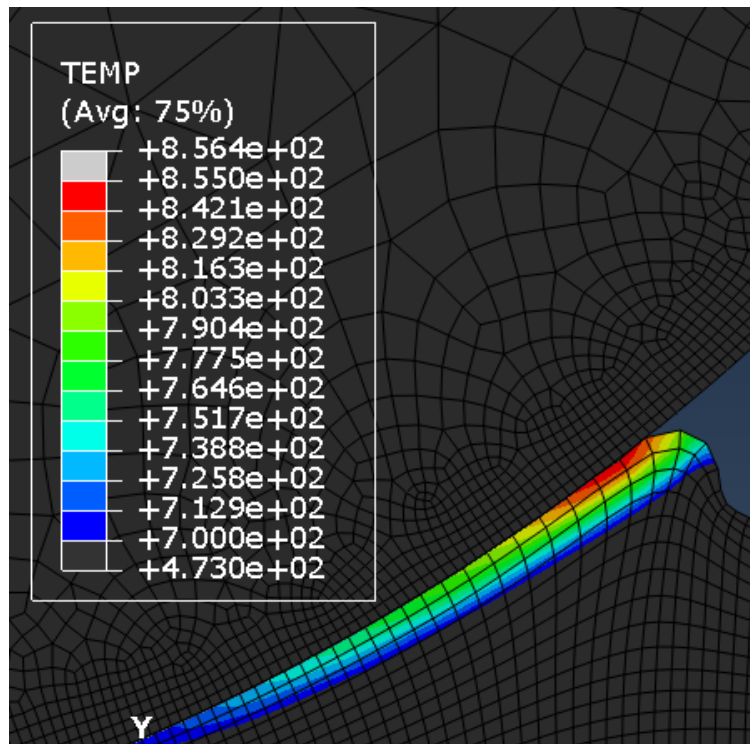


Figura 4.15: *Peak* de temperatura para 400 m/s

Para la partícula de 40 [ $\mu\text{m}$ ] a 400 [m/s], se puede identificar en las figuras 4.15 y 4.16 que existe material en el rango de 821 [°K] a 855 [°K]. Lo cual induce a creer que podría haber material fundido en el centro de la zona de mayor temperatura.

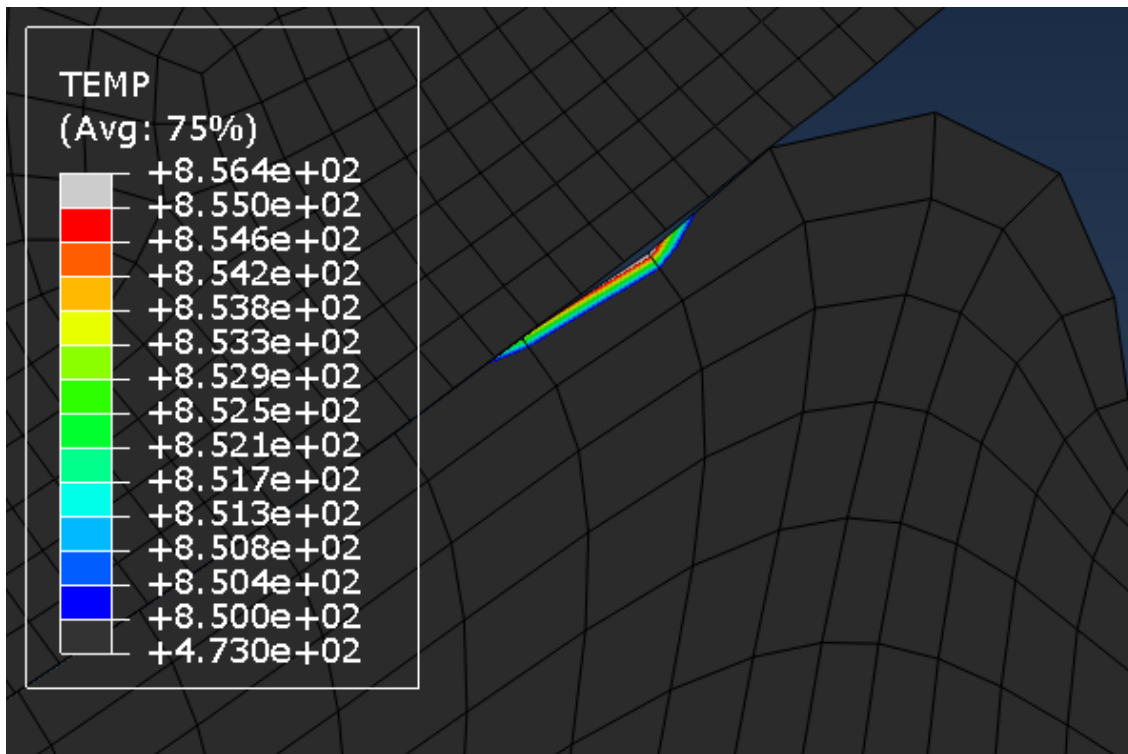


Figura 4.16: Acercamiento *Peak* de temperatura para 400 m/s

Tomando como referencia que los elementos del borde la partícula son de 100 [nm] de arista, este eventual volumen fundido tendría un espesor inferior a los 50 [nm] y un largo de 500 [nm]. Este volumen no es suficiente como para que el elemento completo supere la  $T_{sol}$ , motivo por el cual en la tabla 4.11 no se registra material fundido.

El análisis de los *peaks* de temperatura tenía por objetivo verificar cuan cerca estuvieron de lograr fusión los modelos que no registraron material fundido, sin embargo, en adelante no resulta importante estudiar los *peaks* de temperatura. Esto tiene 2 motivos principales; en primer lugar porque de la tabla 4.11 se sabe que todos los modelos pasados este punto registraron fusión y en segundo lugar, como se explicó en la sección "2.1.6 Obtención de resultados", se asume que todos los elementos parcial y totalmente fundidos tienen igual capacidad de modificar su forma. Profundizando esto, para efectos del estudio, el modelo explícito puede generar *peaks* de temperaturas en 1 elemento que no son representativos del comportamiento térmico general del modelo, Al estudiar los volúmenes fundidos se toma un parámetro mucho más general que, al abarcar varios elementos y cuadros de tiempo, minimiza el efecto de estas desviaciones de la metodología explícita.

De los 2 casos en que si hubo fusión se puede identificar un comportamiento respecto de las velocidades; tanto la velocidad de estabilización como la de *peak* son relativamente constantes, teniendo variaciones de sólo 10 [m/s]. A pesar de esto, la partícula más rápida

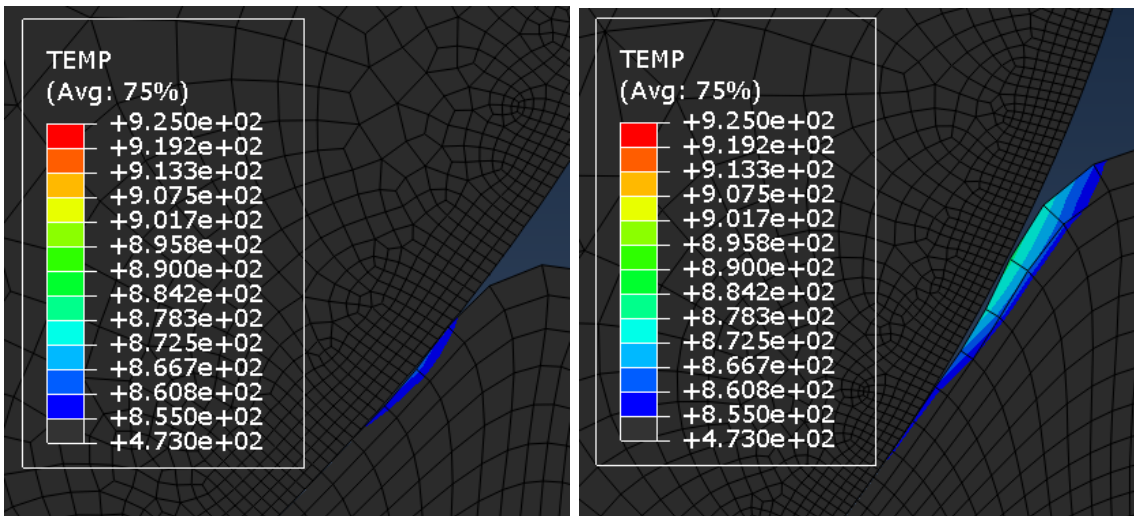
produjo mayores volúmenes fundidos tanto para  $Vol_{max}$  como para  $Vol_{peak}$ . Lo anterior se representa en la siguiente tabla, en la cual se marca el aumento porcentual desde el caso de 460 [m/s] respecto del caso de 520 [m/s]

Tabla 4.6: Valores relativos de material fundido

V [m/s]	$Vol_{max} [\mu m^3]$	$Vol_{peak} [\mu m^3]$
460	243,73	28,87
520	661,61	155,33
Aumento	171,4 %	438,0 %

Tomando en cuenta que el paso 460 [m/s] a 520 [m/s] representa un aumento de un 27,7% de energía cinética, los aumentos en ambos volúmenes es muy significativo. Lo anterior nos indica que el comportamiento no es lineal y habría preliminarmente una velocidad crítica para que comience a existir fusión. En la sección siguiente se estudia en profundidad la totalidad de los 16 modelos en función de la energía cinética.

Los *peak* de fusión para este tamaño de partícula se presentan a continuación. En la primera fila se muestran los  $Vol_{peak}$  obtenido del caso con conducción y en la segunda fila el  $Vol_{max}$  obtenido del caso sin conducción. Para todos los casos el rango de temperatura se toma de  $T_{sol}$  a  $T_{liq}$ .



(a)  $Vol_{peak}$  460 m/s

(b)  $Vol_{peak}$  520 m/s

Figura 4.17:  $Vol_{peak}$  para las 2 velocidades mayores



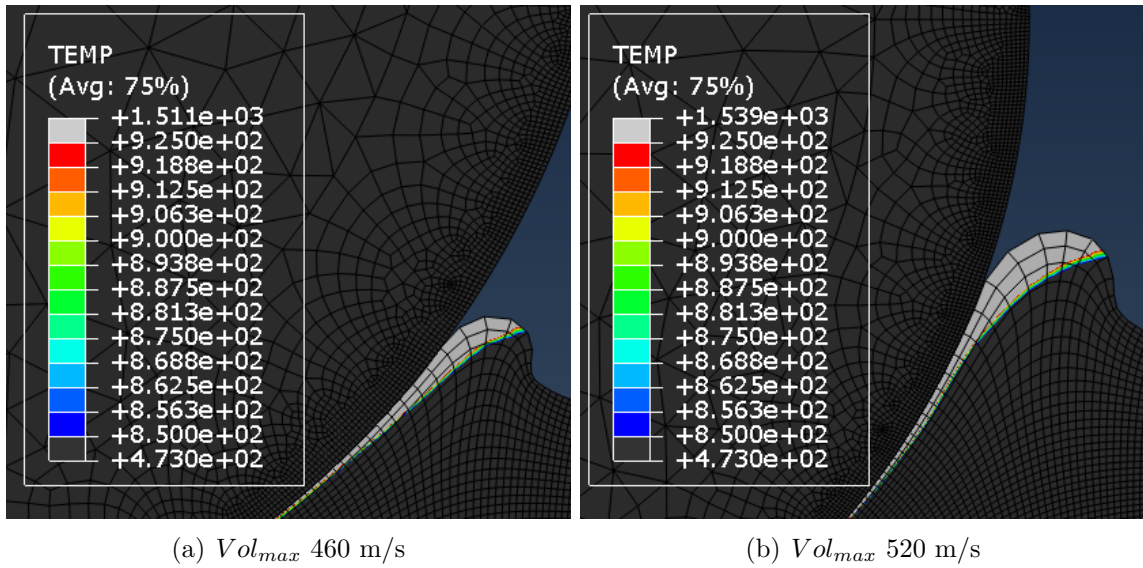


Figura 4.18:  $Vol_{max}$  para las 2 velocidades mayores

De la figura 4.17 se aprecia que para los  $Vol_{peak}$  se conforman de material parcialmente fundido, alcanzando rangos de 870-880 °K. Es posible identificar que para el caso de 460 [m/s] no se registran elementos completos fundidos, sin embargo, su temperatura es suficiente como para que la temperatura del elemento completo supere el mínimo de  $T_{sol}$ . El espesor de este  $Vol_{peak}$  abarca el rango de 100 a 300 [nm] de espesor. De la figura 4.18 se identifica que el  $Vol_{max}$  se genera principalmente en el material del borde del impacto. El espesor de este volumen va de de los 400 a los 1000 [nm] dependiendo de la velocidad.

A continuación se presentan los valores anteriores graficados en función de su velocidad. El análisis por energía cinética se presenta en la sección siguiente.

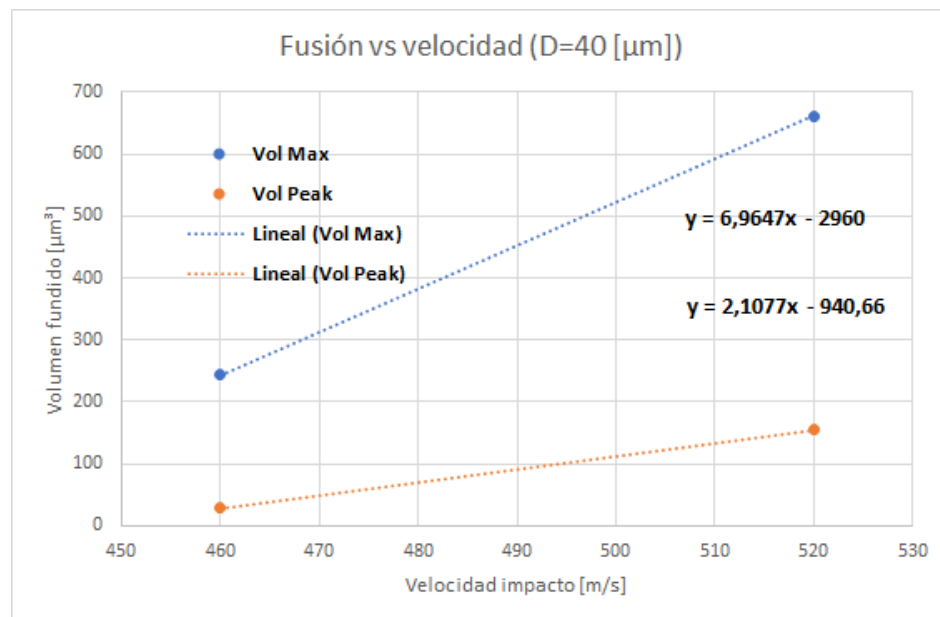


Figura 4.19: Curvas de volumen fundido vs velocidad

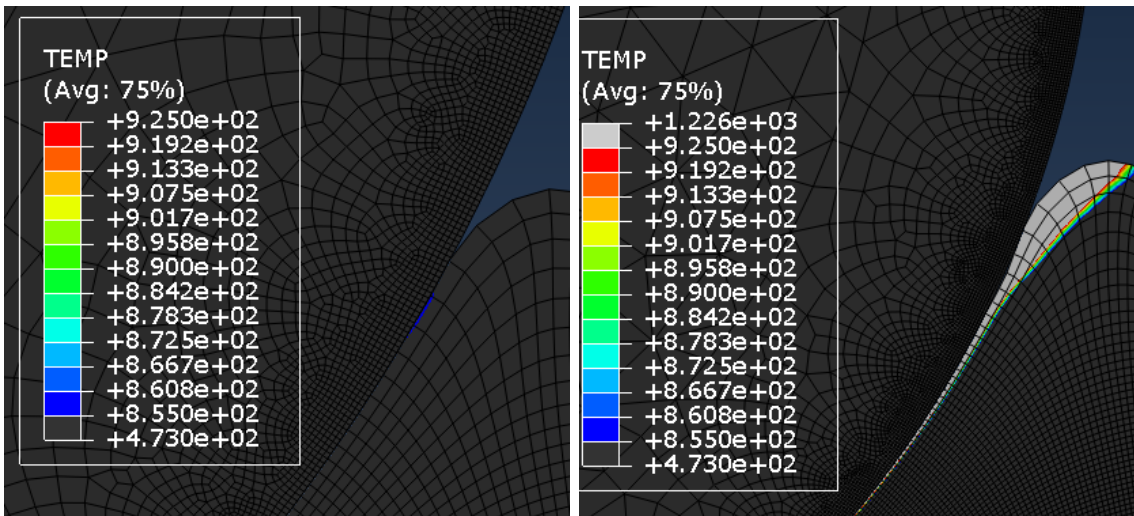
Del gráfico anterior, primero, al disponer de sólo 2 puntos por curva se asume un comportamiento lineal para ambos casos, por lo cual se opta por tomar un ajuste de este tipo. De este ajuste surgen conclusiones importantes. En primer lugar que existiría una velocidad crítica desde la cual ocurriría fusión, el cual correspondería al punto en el cual las curvas cortan el eje X. Este valor es 425 [m/s] para el  $Vol_{max}$  y de 446 [m/s] para el  $Vol_{peak}$ . El valor que debería aproximarse más a la realidad es el de  $Vol_{peak}$ , puesto que no incluye el supuesto fuerte de ignorar la conducción.

Diámetro de 70 [ $\mu m$ ]

Para las partículas de 70 [ $\mu m$ ] se aprecia de la tabla 4.11 que se registró fusión para las 4 velocidades.

A diferencia de los 2 casos anteriores, para este tamaño se puede descartar que la variación de espesor de los elementos producto del mallado adaptativo ALE sea significativo. Esto tiene 2 justificaciones; en primer lugar debido a que se registró material fundido para todos los casos y en segundo lugar por que al trabajar con un tamaño fijo de malla inicial, el peso específico en volumen de cada elemento es menor relativo al tamaño del modelo.

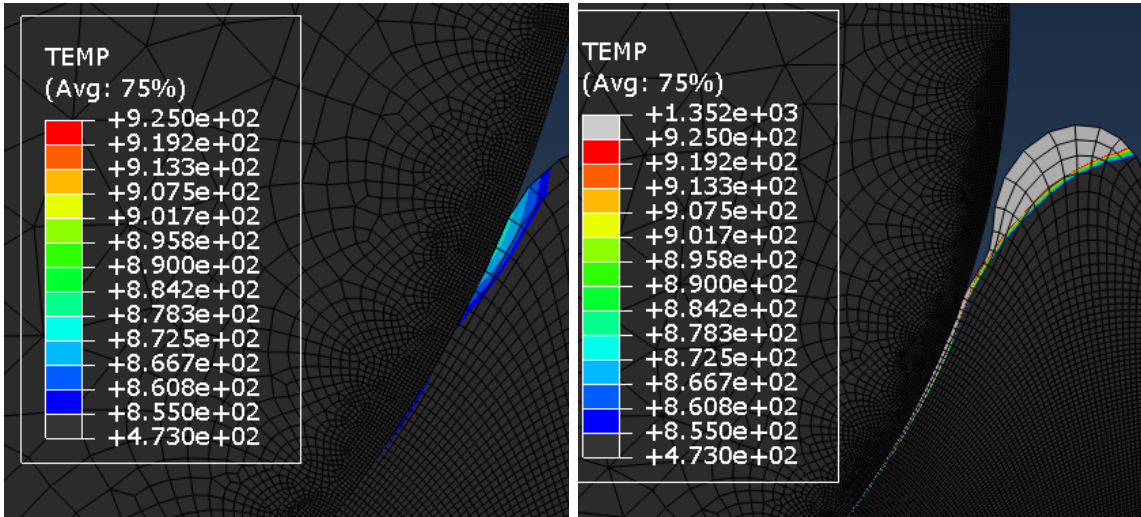
Siguiendo la metodología anterior, ya que todos los casos alcanzaron al menos  $T_{sol}$ , no es necesario estudiar los *peaks* de temperatura. Se estudian los  $Vol_{max}$  y  $Vol_{peak}$  de acuerdo a los casos de conducción correspondiente a continuación. Para todos los casos el rango de temperatura se toma de  $T_{sol}$  a  $T_{liq}$ .



(a)  $Vol_{peak}$  340 m/s

(b)  $Vol_{max}$  340 m/s

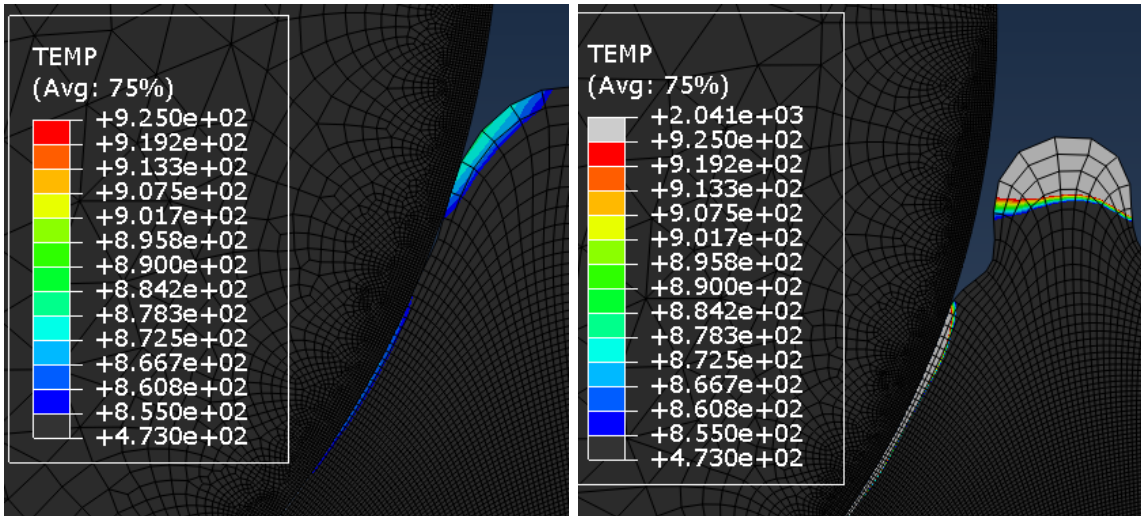
Figura 4.20: Volúmenes fundidos para 340 m/s



(a)  $Vol_{peak}$  400 m/s

(b)  $Vol_{max}$  400 m/s

Figura 4.21: Volúmenes fundidos para 400 m/s



(a)  $Vol_{peak}$  460 m/s

(b)  $Vol_{max}$  460 m/s

Figura 4.22: Volúmenes fundidos para 460 m/s



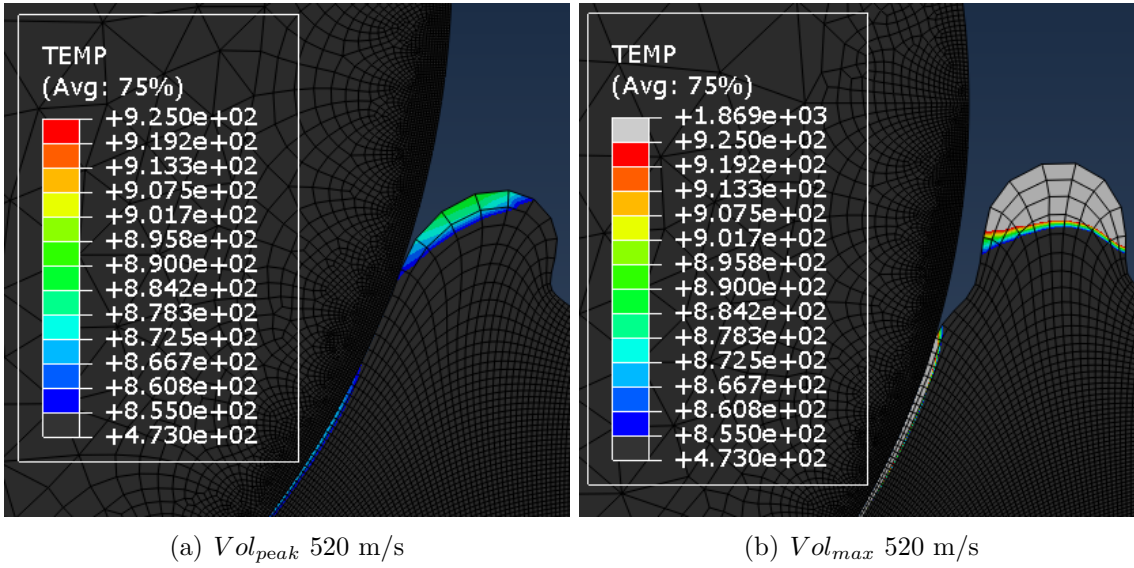


Figura 4.23: Volúmenes fundidos para 520 m/s

Tomando la sucesión de imágenes (figuras 4.20, 4.21, 4.22, 4.23) se tiene que en la columna izquierda se aprecian comportamientos térmicos consistentes. Para el  $Vol_{peak}$ , a medida que se aumenta la velocidad del impacto, se puede identificar que se genera una zona de alto espesor en el material acumulado en el borde y una segunda zona de material fundido de menor espesor en la zona de interfaz entre la partícula y el sustrato. El espesor máximo del material acumulado en el borde alcanza cerca de 700 [nm] y el espesor máximo en la zona de interfaz alcanza un orden 200 [nm]. Las temperaturas registradas en este  $peak$  de volumen fundido ronda el rango de 850 a 880 °K

Los registros de máximo material fundido técnico obtenidos del modelo sin conducción se presentan en la columna de la derecha. En todos los casos se puede apreciar que existe una región de 3 o 4 elementos de espesor en la zona acumulada en el borde y una región larga de bajo espesor en la interfaz. Este espesor acumulado alcanza el orden de 1000 [nm] y pareciera ser muy superior a la imagen correspondiente de la izquierda, sin embargo, cabe recordar que ambas imágenes son tomadas en instantes diferentes de tiempo. Para el caso del material en la interfaz, no se aprecian grandes variaciones en el espesor, manteniéndose en el rango de 100 a 200 [nm].

A medida que aumenta la velocidad de impacto puede apreciarse que el material acumulado en el borde genera una forma de gota que se separa del material fundido en la interfaz, el cual aumenta su espesor y largo. Esta separación en 2 regiones indica que probablemente el material acumulado en el borde podría salir eyectado, mientras que el de interfaz quedaría atrapado.

A continuación se presentan los valores anteriores graficados en función de su velocidad. El análisis por energía cinética se presenta en la sección siguiente.

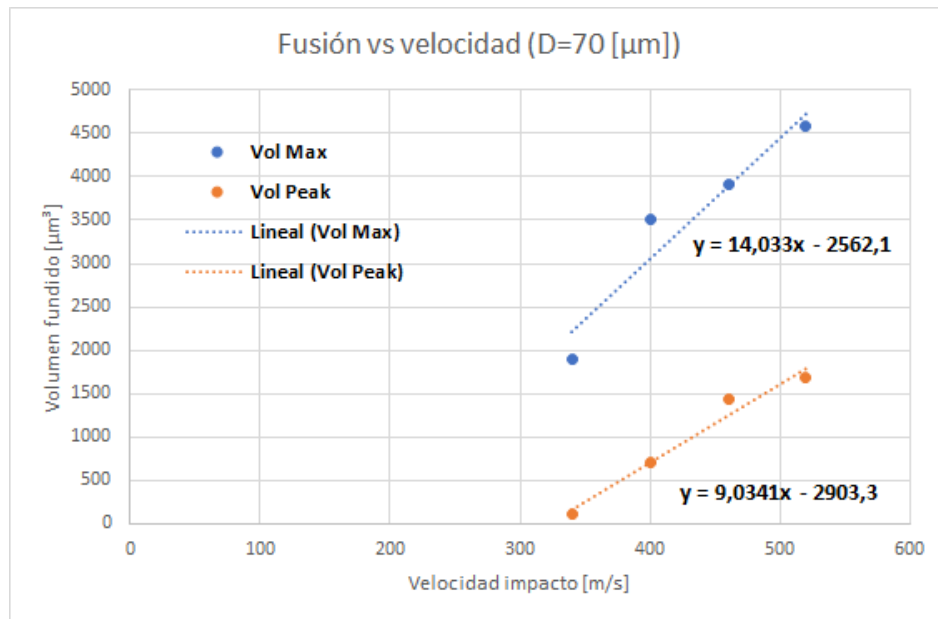


Figura 4.24: Curvas de volumen fundido vs velocidad

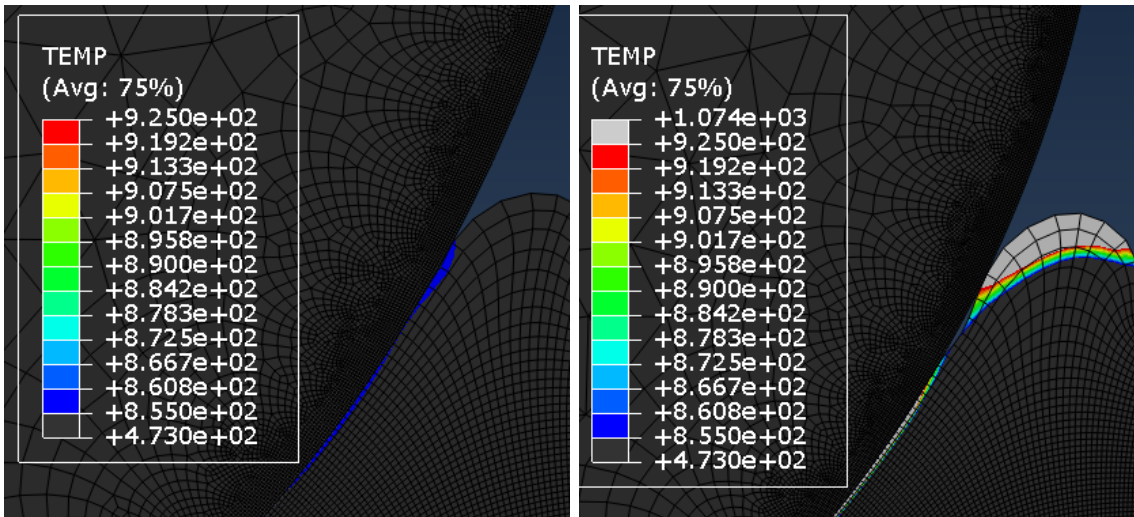
De la figura 4.24, primero se aprecia una distribución aproximadamente lineal para ambos comportamientos, por lo cual se opta por tomar un ajuste de este tipo. De este ajuste surgen conclusiones importantes. En primer lugar que existiría una velocidad crítica desde la cual ocurriría fusión, el cual correspondería al punto en el cual las curvas cortan el eje X. Este valor es 183 [m/s] para el  $Vol_{max}$  y de 321 [m/s] para el  $Vol_{peak}$ . El valor que debería aproximarse más a la realidad es el de  $Vol_{peak}$ , puesto que no incluye el supuesto fuerte de ignorar la conducción.

Diámetro de 100 [μm]

Finalmente queda analizar el comportamiento de las partículas de 100 [μm] de diámetro, en las cuales, como se aprecia en la tabla 4.11 se registró fusión para las 4 velocidades.

Por los mismo argumentos que para el caso de 70 [μm], se puede descartar que la variación de espesor de los elementos producto del mallado adaptativo ALE sea significativo.

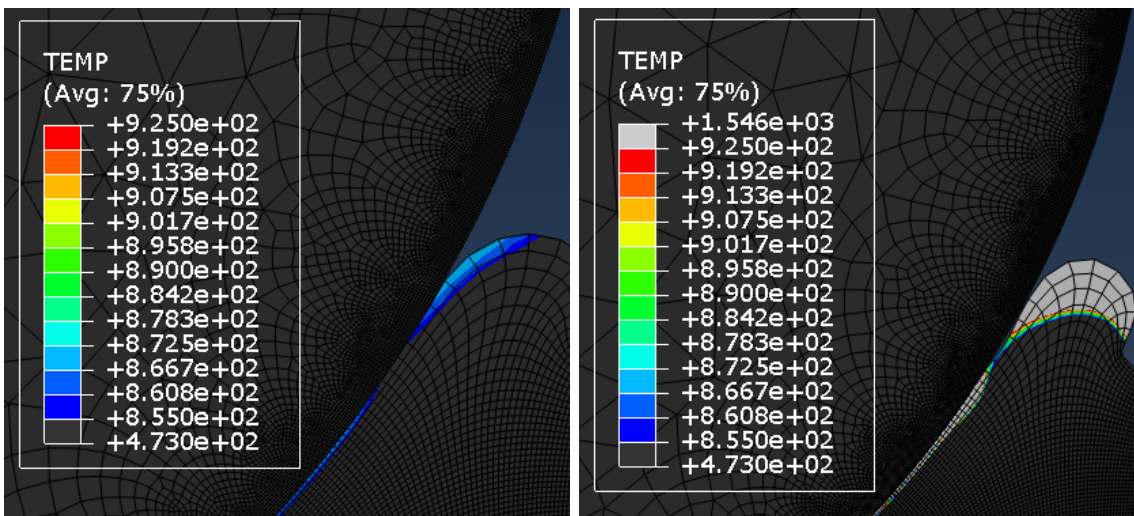
Siguiendo la metodología anterior, ya que todos los casos alcanzaron al menos  $T_{sol}$ , no es necesario estudiar los *peaks* de temperatura. Se estudian los  $Vol_{max}$  y  $Vol_{peak}$  de acuerdo a los casos de conducción correspondiente a continuación. Para todos los casos el rango de temperatura se toma de  $T_{sol}$  a  $T_{liq}$ .



(a)  $Vol_{peak}$  340 m/s

(b)  $Vol_{max}$  340 m/s

Figura 4.25: Volúmenes fundidos para 340 m/s



(a)  $Vol_{peak}$  400 m/s

(b)  $Vol_{max}$  400 m/s

Figura 4.26: Volúmenes fundidos para 400 m/s

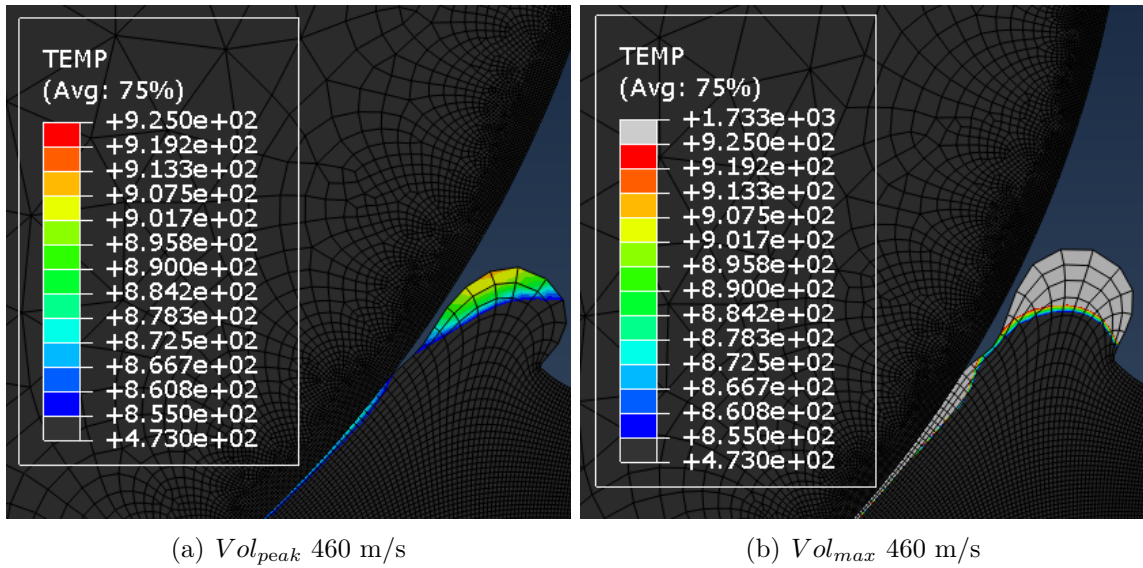


Figura 4.27: Volúmenes fundidos para 460 m/s

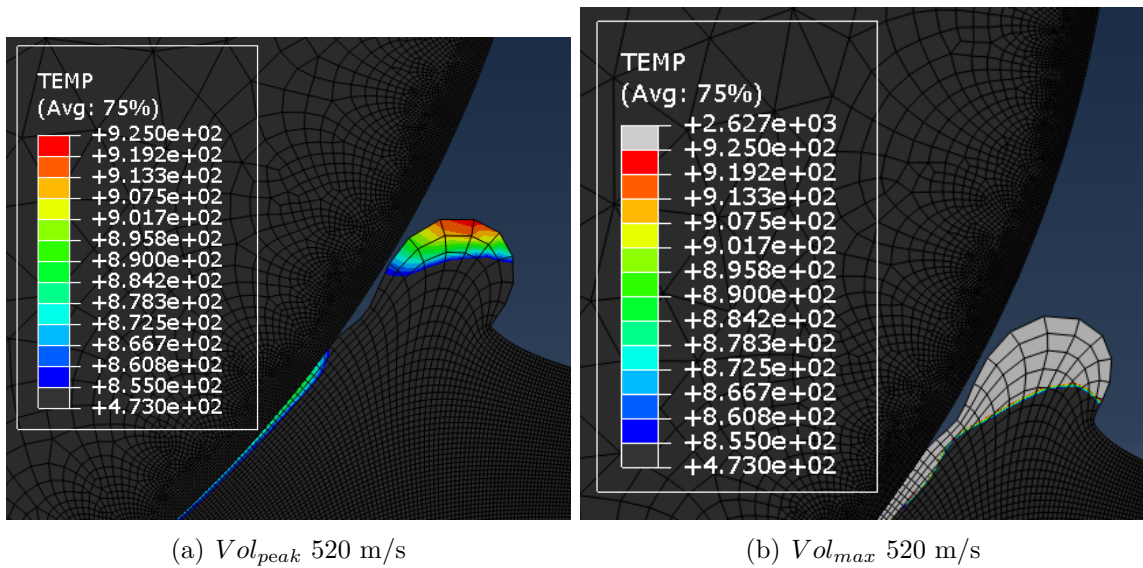


Figura 4.28: Volúmenes fundidos para 520 m/s

Tomando la sucesión de imágenes (figuras 4.25, 4.26, 4.27, 4.28) se tiene que en la columna izquierda se aprecian comportamientos térmicos consistentes. Para el  $Vol_{peak}$ , a medida que se aumenta la velocidad del impacto, se puede identificar que se genera una zona de alto espesor en el material acumulado en el borde y una segunda zona de material fundido de menor espesor en la zona de interfaz entre la partícula y el sustrato. El espesor máximo del material acumulado en el borde alcanza cerca de 1000 [nm] y el espesor máximo en la zona de interfaz alcanza un orden 300 [nm]. Las temperaturas registradas en este  $peak$  de volumen fundido ronda el rango de 900 a 920 [°K]

Los registros de máximo material fundido técnico obtenidos del modelo sin conducción se

presentan en la columna de la derecha. En todos los casos se puede apreciar que existe una región de desde 3 elementos de espesor para el caso más lento hasta 5 en el caso más rápido en la zona acumulada en el borde y una región larga de bajo espesor en la interfaz. Este espesor acumulado alcanza el ronda el orden desde 800 [nm] hasta cerca de 1500 [nm] dependiendo de la velocidad. y pareciera ser muy superior a la imagen correspondiente de la izquierda, sin embargo, cabe recordar que ambas imágenes son tomadas en instantes diferentes de tiempo. Para el caso del material en la interfaz, no se aprecian grandes variaciones en el espesor, manteniéndose en el rango de 200 a 300 [nm].

A medida que aumenta la velocidad de impacto puede apreciarse que el material acumulado en el borde genera una forma de gota que se separa del material fundido en la interfaz, el cual aumenta su espesor y largo. Esta separación en 2 regiones indica que probablemente el material acumulado en el borde podría salir eyectado, mientras que el de interfaz quedaría atrapado.

A continuación se presentan los valores anteriores graficados en función de su velocidad. El análisis por energía cinética se presenta en la sección siguiente.

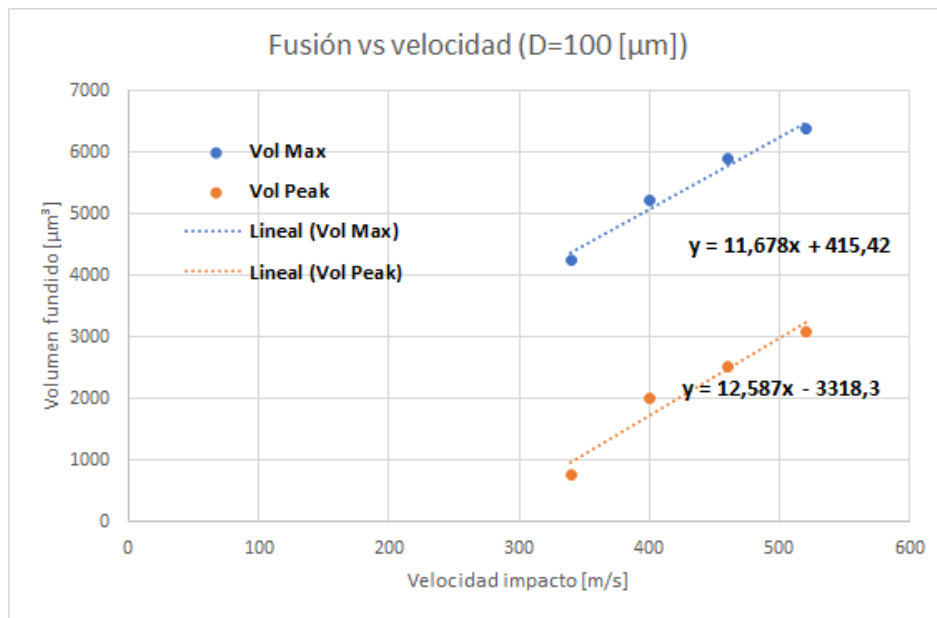


Figura 4.29: Curvas de volumen fundido vs velocidad

De la figura 4.29, primero se aprecia una distribución aproximadamente lineal para ambos comportamientos, por lo cual se opta por tomar un ajuste de este tipo. De este ajuste surgen conclusiones importantes. En primer lugar que existiría una velocidad crítica desde la cual ocurriría fusión, el cual correspondería al punto en el cual las curvas cortan el eje X. Este valor es 35,5 [m/s] para el  $Vol_{max}$  y de 264 [m/s] para el  $Vol_{peak}$ . El valor que debería aproximarse más a la realidad es el de  $Vol_{peak}$ , puesto que no incluye el supuesto fuerte de ignorar la conducción.

Una vez analizados todos los casos de diámetros, se puede analizar el comportamiento de la velocidad mínima para generar fusión en función del tamaño de partícula. Para esto se



considera la velocidad obtenida de  $Vol_{peak}$ , ya que representa el mejor momento para fusión en cada caso.

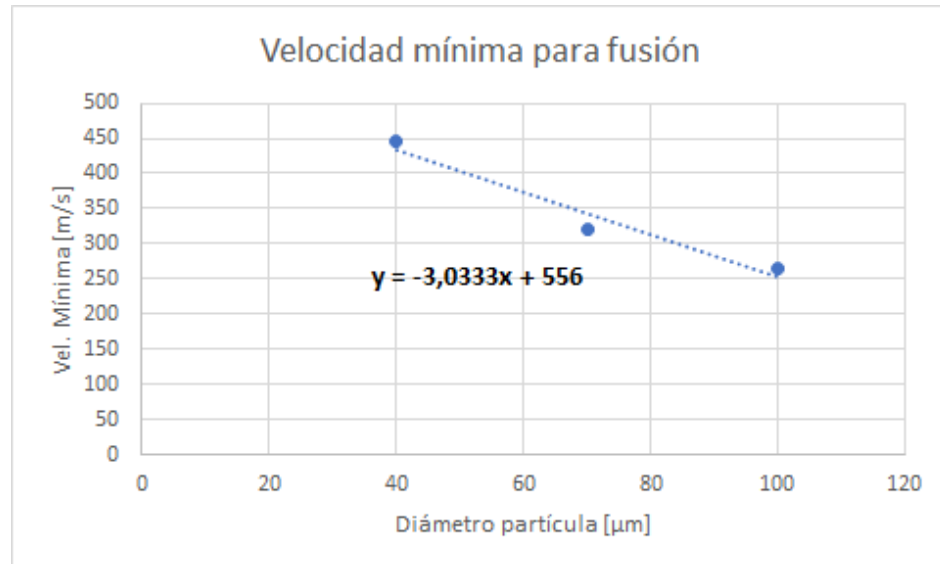


Figura 4.30: Velocidad mínima para fusión

De la figura 4.30 se obtienen 2 conclusiones. En primer lugar tenemos que, en teoría, con una velocidad de 556 [m/s] toda partícula debería generar fusión independiente de su tamaño. Análogamente esto ocurriría para toda partícula de al menos 185 [ $\mu m$ ] de diámetro.

Como segunda conclusión, podemos estudiar la velocidad crítica para el caso de partícula de 10 [ $\mu m$ ] de diámetro, el cual no registró fusión, y sería 556 [m/s]. Lo anterior significa que esta partícula estuvo en su mayor velocidad a cerca de un 1% de alcanzar este valor teórico.

### Análisis por rango de velocidad de partícula

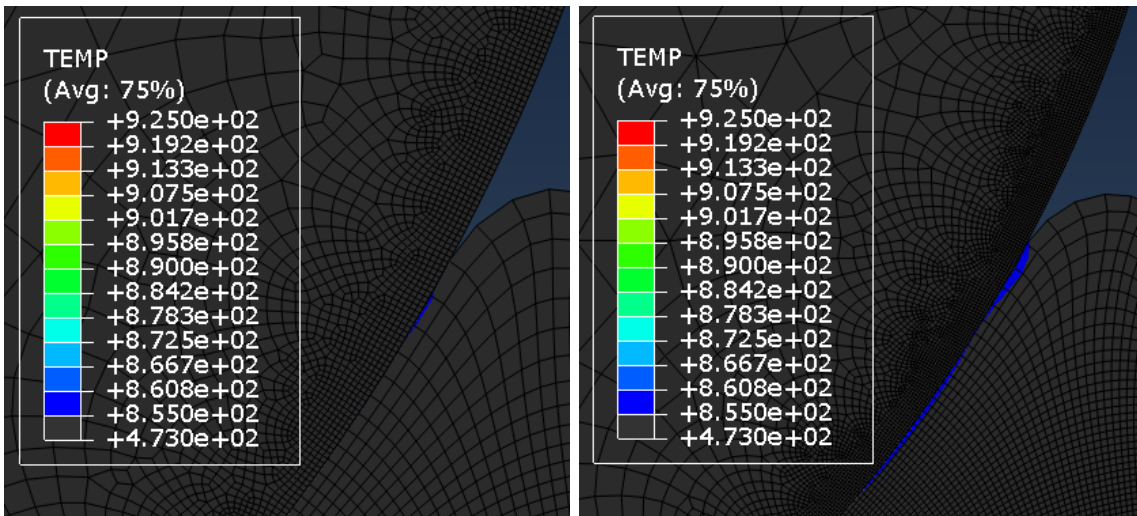
Para el análisis en esta sección se fijarán los rangos de velocidad y se variará los tamaños, con la intención de hacer el análisis inverso. Por simplicidad y para evitar redundancia, no se volverá a hablar de los casos que no presentaron material fundido, ya que el argumento para descartarlos es transversal. Debido a que los instantes de estudio son los mismos que para la sección anterior, se utilizan las mismas imágenes pero ahora comparando la variable de velocidad correspondient. A continuación se presenta la tabla 4.11, pero ordenada agrupando los modelos por velocidad.

Tabla 4.7: Resultados ordenados por velocidad

Mod	D [ $\mu\text{m}$ ]	V [m/s]	$t_{est}$	$V_{est}$	$Vol_{max}[\mu\text{m}^3]$	$t_{peak}$	$V_{peak}$	$Vol_{peak}[\mu\text{m}^3]$
1	10	340	-	-	-	-	-	-
5	40	340	-	-	-	-	-	-
9	70	340	60	180	1904,98	48	225	114,49
13	100	340	102	140	4260,47	67	230	753,83
2	10	400	-	-	-	-	-	-
6	40	400	-	-	-	-	-	-
10	70	400	66	195	3502,13	48	265	701,84
14	100	400	120	135	5223,46	52	310	2002,87
3	10	460	-	-	-	-	-	-
7	40	460	14	400	243,73	13	405	28,87
11	70	460	80	180	3903,72	50	300	1430,89
15	100	460	146	100	5889,74	38	390	2590,79
4	10	520	-	-	-	-	-	-
8	40	520	22	390	661,61	18	415	155,33
12	70	520	92	165	4577,73	40	385	1678,30
16	100	520	184	30	6373,95	120	210	3603,47

Primero estudiando el rango de 340 [m/s]. Para este rango sólo se cuenta con 2 casos, pues las 2 partículas más pequeñas no generaron fusión.

Primero comparamos el comportamiento de  $Vol_{peak}$  y  $Vol_{max}$  para ambos casos, representado en las figuras 4.31 y 4.32.



(a)  $Vol_{peak}$  70  $\mu\text{m}$

(b)  $Vol_{peak}$  100  $\mu\text{m}$

Figura 4.31:  $Vol_{peak}$  para los 2 diámetros mayores

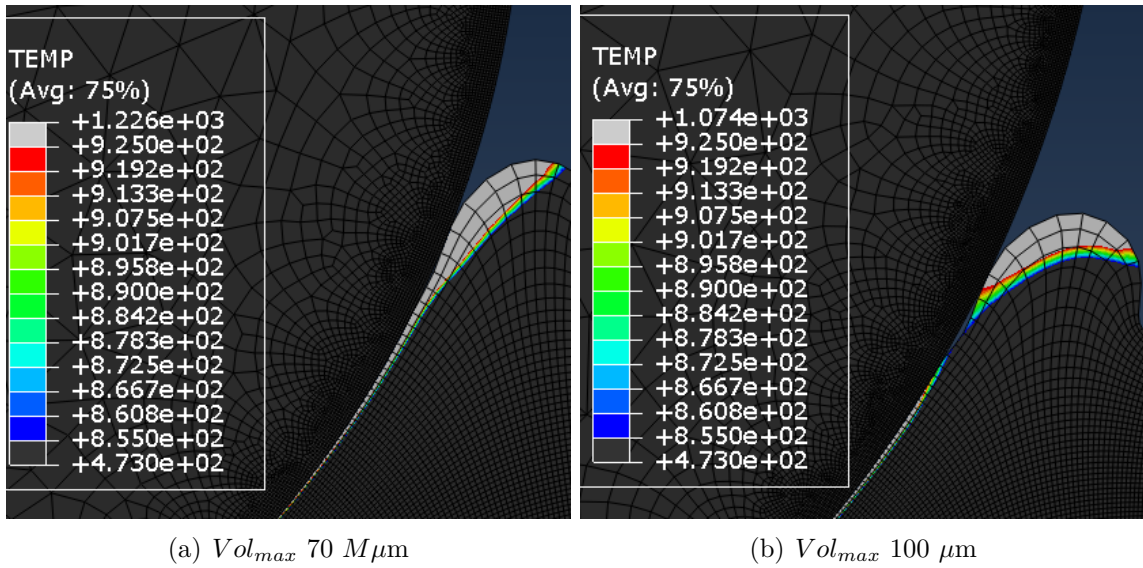


Figura 4.32:  $Vol_{max}$  para los 2 diámetros mayores

Comparando ambos diámetros, se puede apreciar que el  $Vol_{peak}$  no aumenta de forma considerable el espesor, encontrándose cerca de los 100 a 200 [nm] pero sí en largo, pasando de abarcar de sólo unos 500 [nm] a cerca de 4000 [nm]. Para el caso del  $Vol_{max}$  se puede identificar que para el caso de la partícula de menor diámetro existe una región continua entre el material de borde y el de interfaz, el cual se separa para el caso de mayor. En ambos casos el espesor del material fundido en la interfaz ronda los 150 [nm], sin embargo, para la partícula de 100 [ $\mu\text{m}$ ] el espesor del material fundido en el borde crece de unos 1000 [nm] a unos 1200 [nm].

Los valores anteriores graficados en función del tamaño de partícula quedan como:

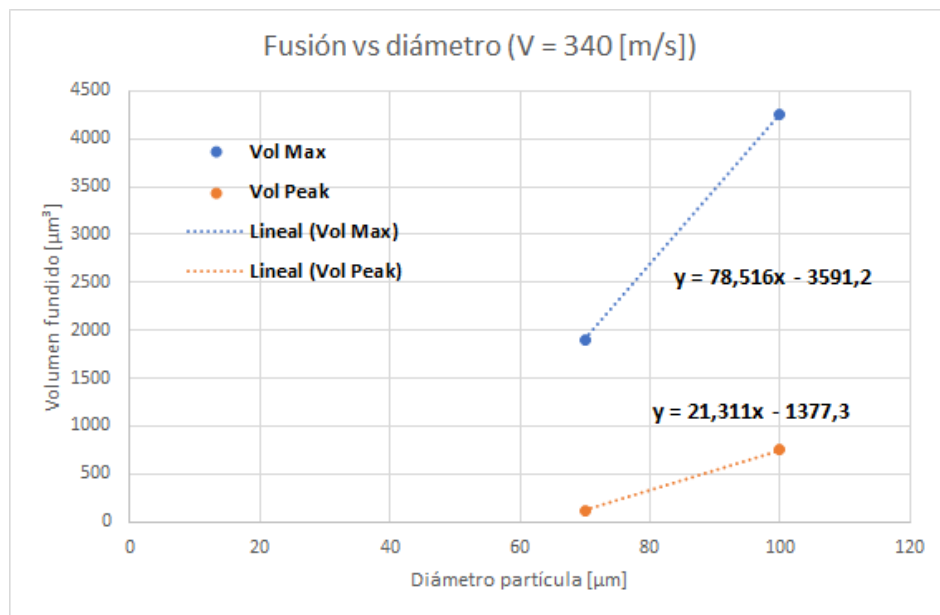
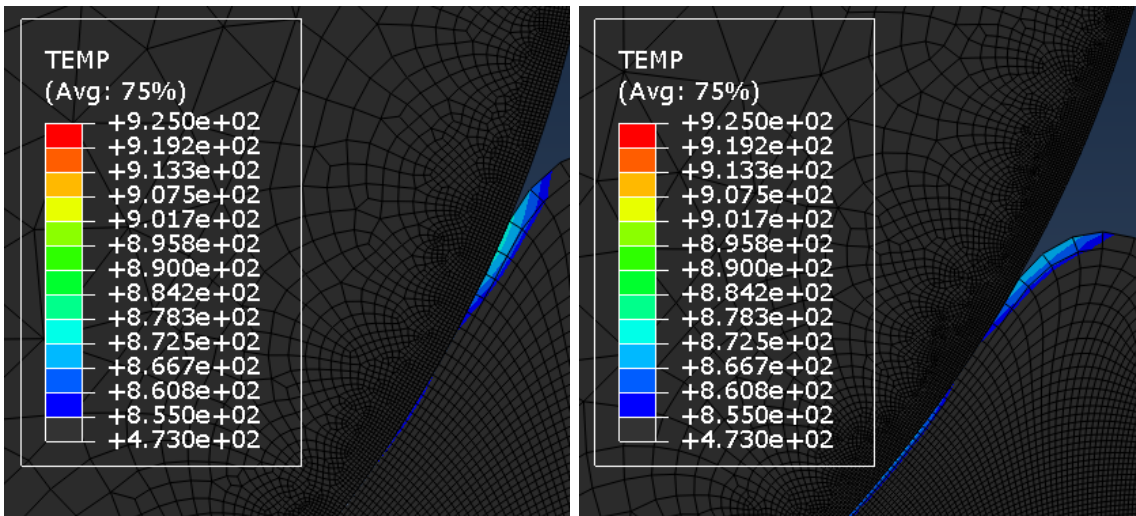


Figura 4.33: Curvas de volumen fundido vs diámetro



De la figura 4.33, primero, al disponer de sólo 2 puntos por curva se asume un comportamiento lineal para ambos casos, por lo cual se opta por tomar un ajuste de este tipo. De este ajuste surgen conclusiones importantes. En primer lugar que existiría un diámetro mínimo desde el cual ocurriría fusión, el cual correspondería al punto en el cual las curvas cortan el eje X. Este valor es de  $46 [\mu m]$  para el  $Vol_{max}$  y de  $65 [\mu m]$ . El valor que debería aproximarse más a la realidad es el de  $Vol_{peak}$ , puesto que no incluye el supuesto fuerte de ignorar la conducción. Lo anterior resulta consistente con ls resultados, en los que se puede apreciar que como la partícula de  $70 [\mu m]$  está a penas sobre este valor, presentó muy poco material fundido.

Estudiando para una velocidad de partícula de  $400 [m/s]$ . En este caso nuevamente sólo se cuenta con 2 casos que generaron material fundido, comportamiento que se presenta en las figuras 4.34 y 4.35



(a)  $Vol_{peak}$   $70 \mu m$

(b)  $Vol_{peak}$   $100 \mu m$

Figura 4.34:  $Vol_{peak}$  para los 2 diámetros mayores

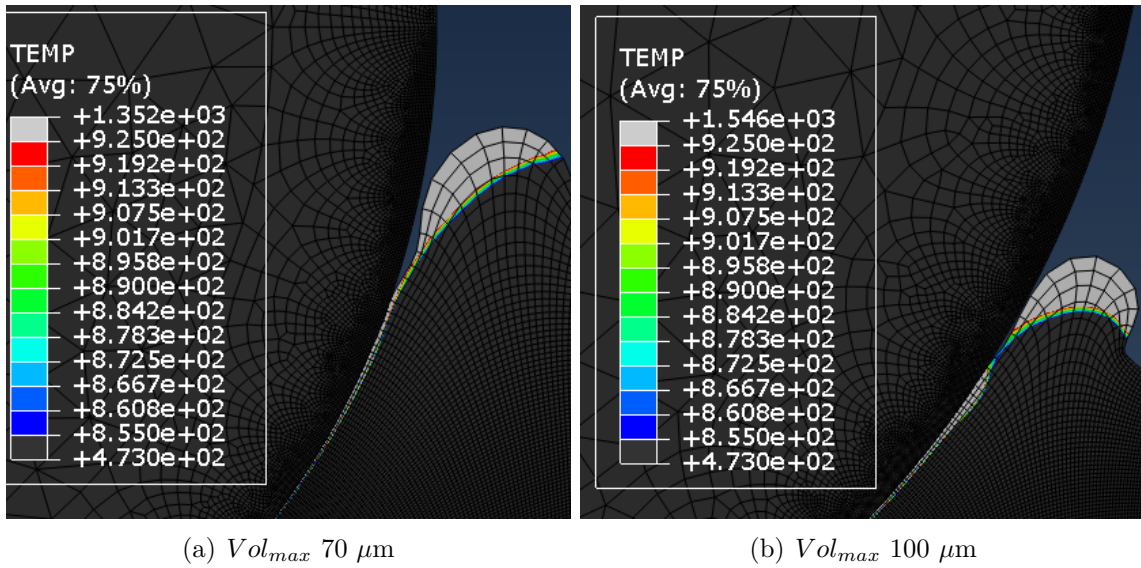


Figura 4.35:  $Vol_{max}$  para los 2 diámetros mayores

En las figuras 4.34 y 4.35 se presentan los comportamientos obtenidos. Respecto del  $Vol_{peak}$  se puede notar que se pasa de un caso donde el volumen está en contacto completo con la partícula a un estado en el cual comienza a haber una separación del material acumulado en el borde. El espesor mayor pareciera no variar mucho entre ambos casos, encontrándose en un rango de 300 a 400 [nm]. Nuevamente aquí la variación del volumen ocurre en el largo de la región de interfaz, lo cual justifica el paso de 700 [ $\mu\text{m}^3$ ] a 2000 [ $\mu\text{m}^3$ ] de la tabla 4.7. Se observa un comportamiento similar para el caso de  $Vol_{max}$ , en el cual para la partícula de mayor diámetro se aprecia un alejamiento del material fundido en el borde, por lo cual este pudiera salir eyectado en el impacto real.

Siguiendo la metodología anterior, se presenta el gráfico de fusión vs diámetro de este caso.

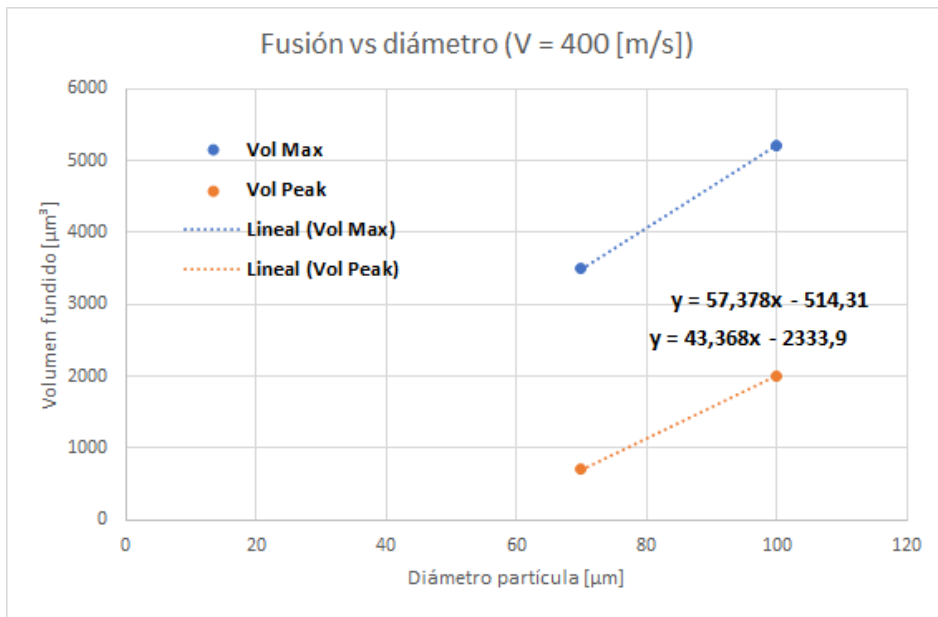


Figura 4.36: Curvas de volumen fundido vs diámetro

De la figura 4.36, primero, al disponer de sólo 2 puntos por curva se asume un comportamiento lineal para ambos casos, por lo cual se opta por tomar un ajuste de este tipo. Tomando los valores de diámetro mínimo para fusión, los cuales corresponderían al punto en el cual las curvas cortan el eje X se obtiene que los valores son de  $9 [\mu\text{m}]$  para el  $Vol_{max}$  y de  $54 [\mu\text{m}]$  para  $Vol_{peak}$ . Lo anterior resulta consistente con el razonamiento del caso de  $340 [\text{m/s}]$ . El bajo valor asociado al  $Vol_{max}$  se atribuye a sólo contar con 2 puntos para la aproximación.

Para el caso de velocidad de partícula de  $460 [\text{m/s}]$  se cuenta con 3 puntos, ya que la partícula de  $10$  no generó fusión pero la de  $40 [\mu\text{m}]$  si lo hizo. Tomando la metodología de  $Vol_{peak}$  en la columna izquierda y  $Vol_{max}$  en la derecha tenemos:

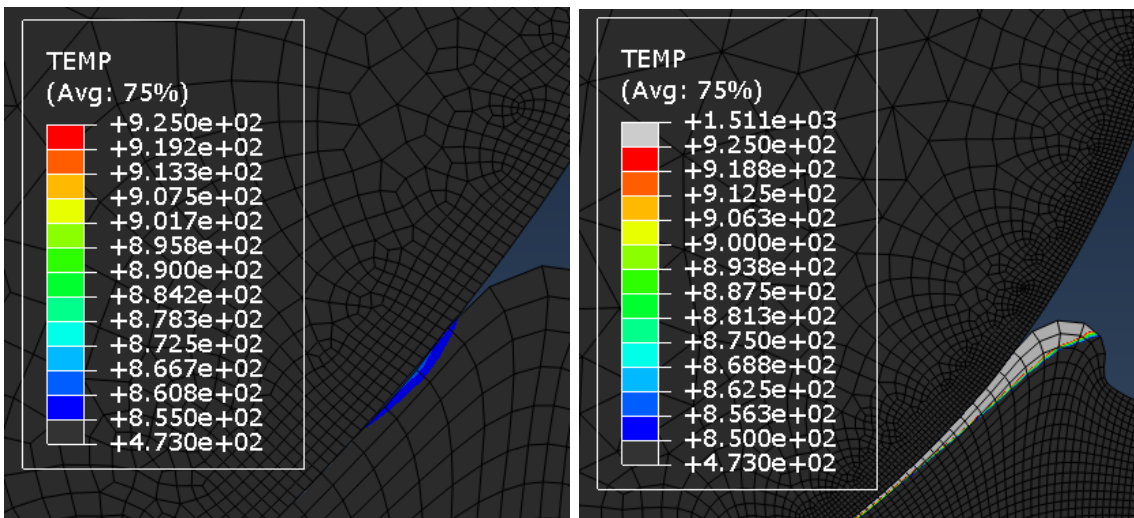


Figura 4.37: Volúmenes fundidos para diámetro de  $40 [\mu\text{m}]$

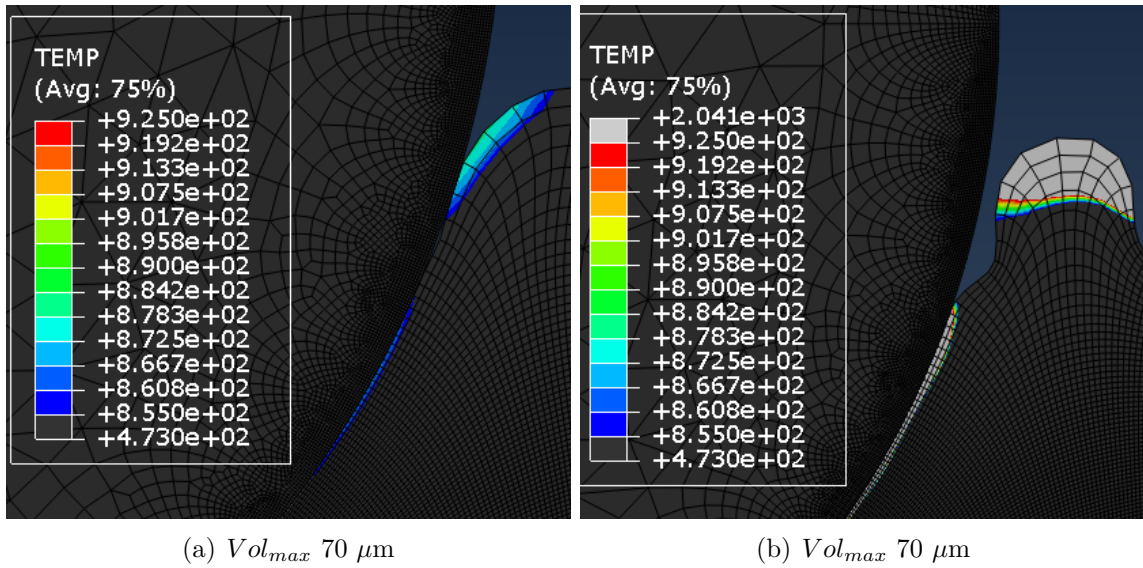


Figura 4.38: Volúmenes fundidos para diámetro de 70 [ $\mu m$ ]

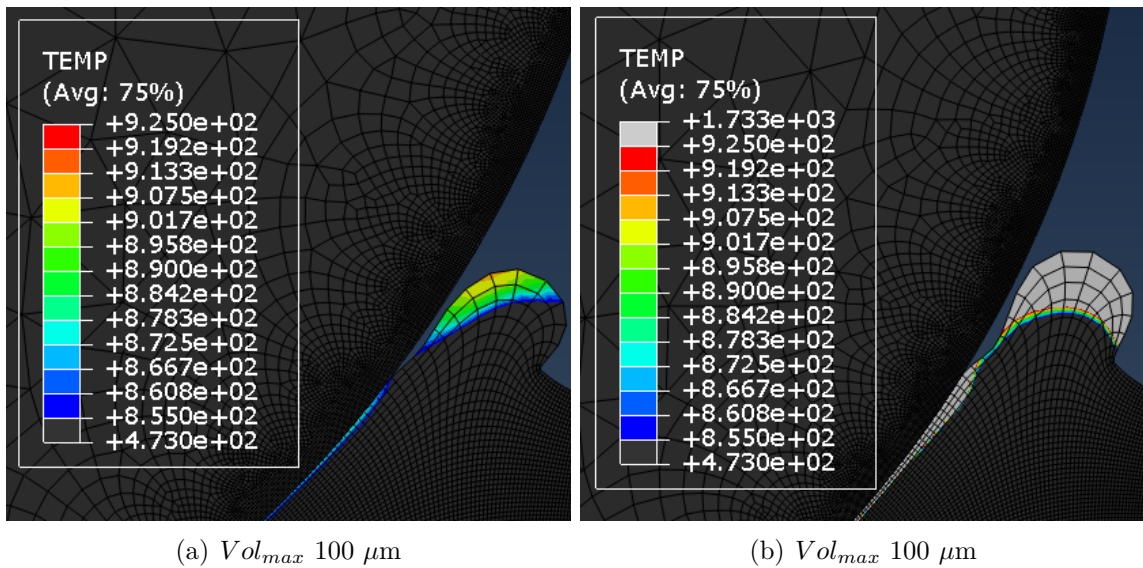


Figura 4.39: Volúmenes fundidos para diámetro de 100 [ $\mu m$ ]

En las figuras 4.37, 4.38 y 4.39 se presentan los comportamientos obtenidos. Respecto del  $Vol_{peak}$  se aprecia que para el primer caso se está comenzando a generar la región fundida cerca del borde del impacto. Para los diámetros siguientes el comportamiento es de generar 2 zonas de material fundido, la del borde que alcanza unos 600 [nm] de espesor y temperaturas superiores a los 900 [K]. El espesor del material fundido en la interfaz se mantiene en un rango de 100 a 200 [nm] de espesor.

Se observa un comportamiento similar para el caso de  $Vol_{max}$ , en el cual para la partícula de mayor diámetro se aprecia un alejamiento del material fundido en el borde, por lo cual este pudiera salir eyectado en el impacto real.

Siguiendo la metodología anterior, se presenta el gráfico de fusión vs diámetro de este caso.

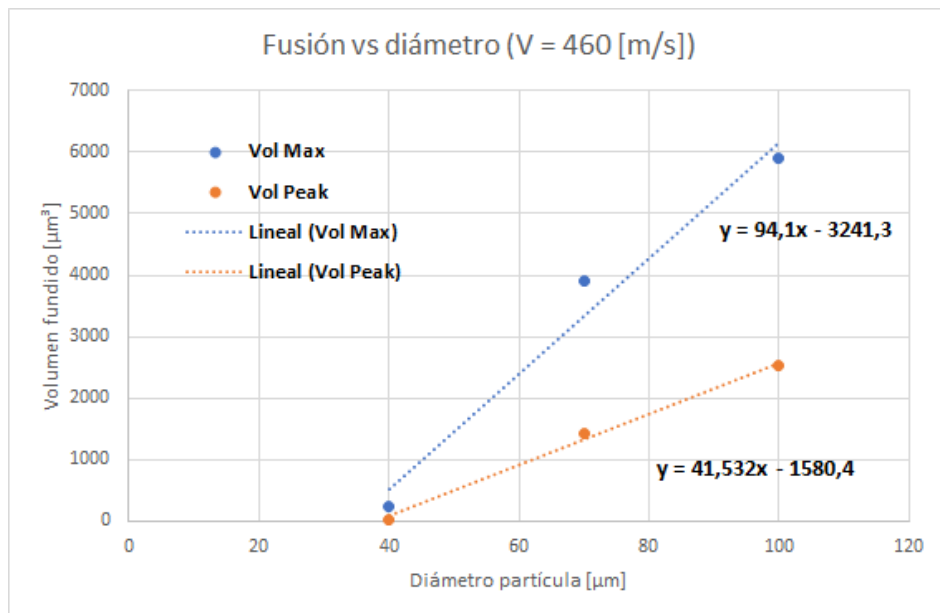
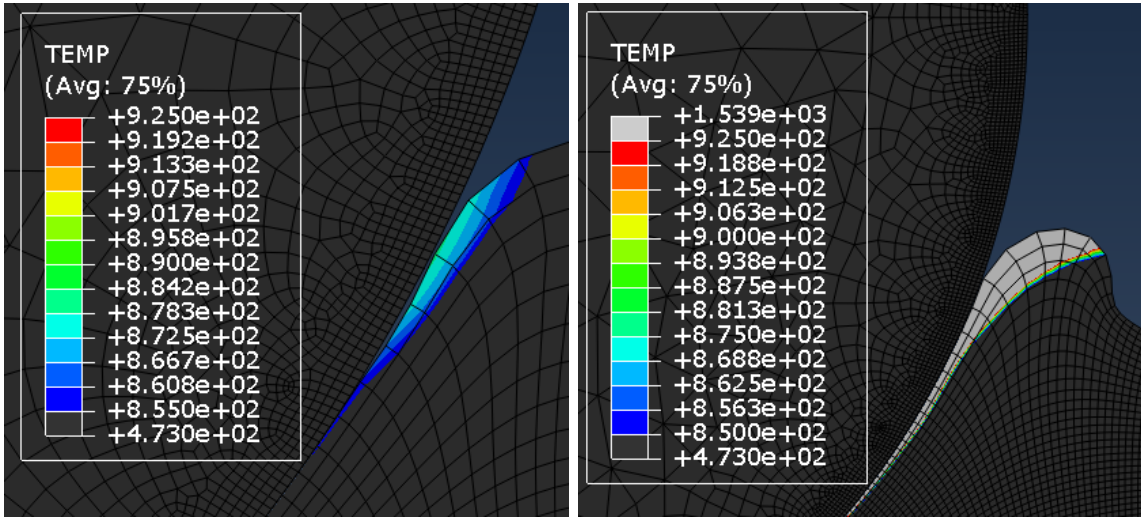


Figura 4.40: Curvas de volumen fundido vs diámetro

En la figura 4.40 se presentan los resultados. Se cuenta con 3 puntos, los cuales se ajustan mediante una función lineal para ambos casos. Tomando los valores de diámetro mínimo para fusión, los cuales corresponderían al punto en el cual las curvas cortan el eje X se obtiene que los valores son de  $34 [\mu\text{m}]$  para el  $Vol_{max}$  y de  $38 [\mu\text{m}]$  para  $Vol_{peak}$ .

Para el caso de velocidad de partícula de  $520 [\text{m/s}]$  se cuenta con 3 puntos, ya que la partícula de  $10$  no generó fusión pero la de  $40 [\mu\text{m}]$  si lo hizo. Tomando la metodología de  $Vol_{peak}$  en la columna izquierda y  $Vol_{max}$  en la derecha tenemos:

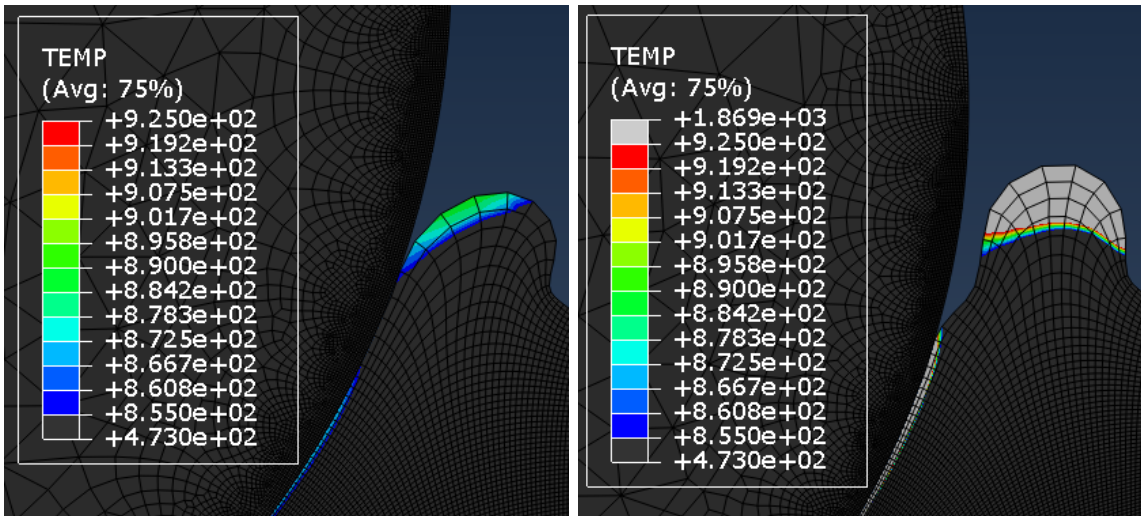




(a)  $Vol_{max}$  40  $\mu\text{m}$

(b)  $Vol_{max}$  40  $\mu\text{m}$

Figura 4.41: Volúmenes fundidos para diámetro de 40 [ $\mu\text{m}$ ]



(a)  $Vol_{max}$  70  $\mu\text{m}$

(b)  $Vol_{max}$  70  $\mu\text{m}$

Figura 4.42: Volúmenes fundidos para diámetro de 70 [ $\mu\text{m}$ ]

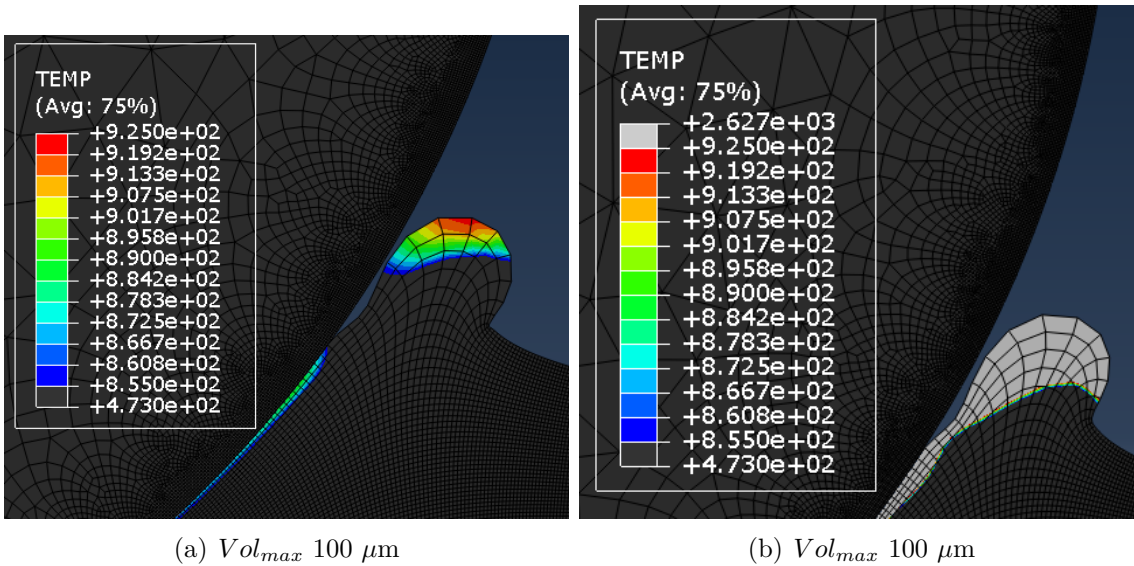


Figura 4.43: Volúmenes fundidos para diámetro de 100 [ $\mu\text{m}$ ]

En las figuras 4.41, 4.42 y 4.43 se presentan los comportamientos obtenidos. Primero, respecto del  $Vol_{peak}$  se aprecia que incluso para el caso de partícula más pequeña se genera un importante espesor fundido de sobre 300 [nm] de espesor. Al aumentar el diámetro este espesor aumenta hasta cerca de 1000 [nm], marcándose fuertemente el comportamiento de separarse en 2 regiones y alcanzando temperaturas cercanas a  $T_{liq}$ .

Se observa un comportamiento similar para el caso de  $Vol_{max}$ , en el cual para la partícula de mayor diámetro se aprecia un alejamiento del material fundido en el borde, por lo cual este pudiera salir eyectado en el impacto real.

Siguiendo la metodología anterior, se presenta el gráfico de fusión vs diámetro de este caso.

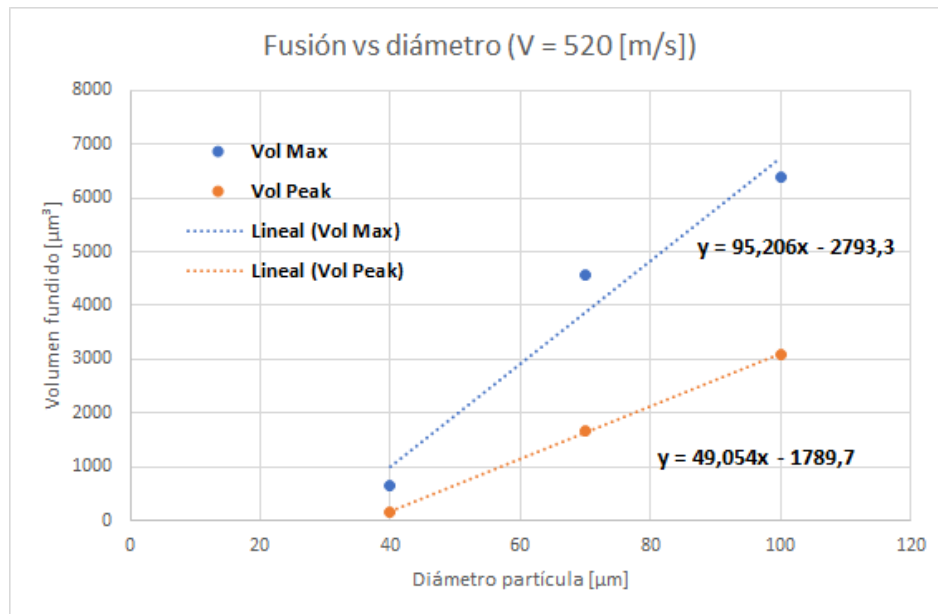


Figura 4.44: Curvas de volumen fundido vs diámetro

En la figura 4.44 se presentan los resultados. Se cuenta con 3 puntos, los cuales se ajustan mediante una función lineal para ambos casos. Tomando los valores de diámetro mínimo para fusión, los cuales corresponderían al punto en el cual las curvas cortan el eje X se obtiene que los valores son de 29 [ $\mu\text{m}$ ] para el  $Vol_{max}$  y de 36 [ $\mu\text{m}$ ] para  $Vol_{peak}$ .

Una vez analizados todos los casos de velocidades, se puede analizar el comportamiento del diámetro mínimo para generar fusión en función de la velocidad de partícula. Para esto se considera el diámetro de  $Vol_{peak}$ , ya que representa el mejor momento para fusión en cada caso.

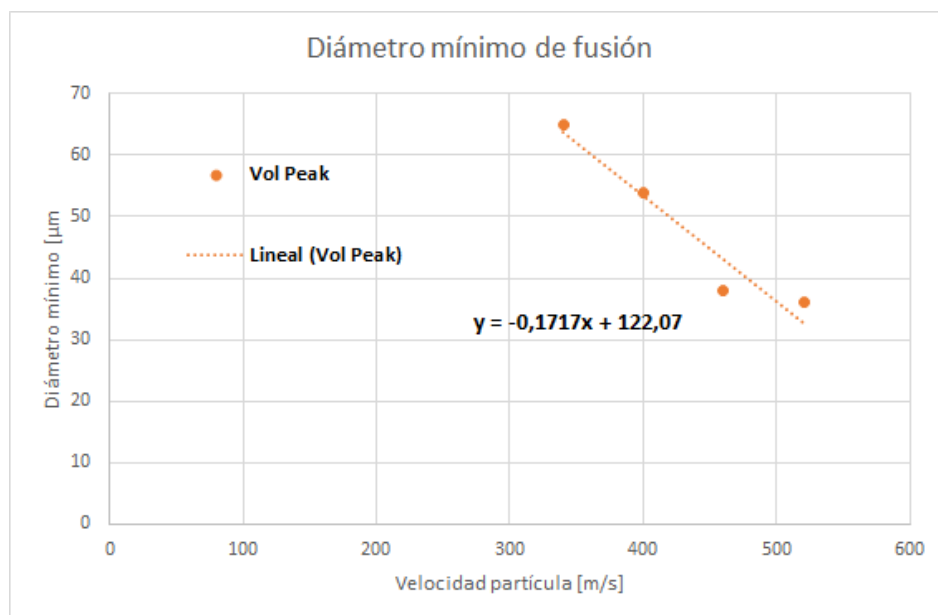


Figura 4.45: Velocidad mínima para fusión



De la figura 4.45 se obtienen 2 conclusiones. En primer lugar tenemos que, en teoría, con un diámetro de 122 [ $\mu m$ ] se debería generar fusión independiente de la velocidad. Análogamente, esto ocurriría para toda partícula con velocidad mínima de 710 [m/s]

Como segunda conclusión, podemos estudiar el diámetro crítico para el cual la partícula de velocidad 340 [m/s] generaría fusión. De la curva se obtiene que esto ocurre para 64 [nm] de diámetro.

## Conclusiones del análisis

Comparando los resultados de 4.30 y 4.45 notamos que existen 2 pares de diámetro/velocidad mínimos para generar fusión.

Tabla 4.8: Resultados por tipo de análisis

Tipo Análisis	$D_{min}[\mu m]$	$V_{min}[m/s]$
Por D	185	556
Por V	122	710

De la tabla 4.9 se aprecia como diferencia que, al estudiar por diámetro, se requiere de un diámetro mayor y al hacerlo por velocidad, se requiere de una velocidad mayor. De ambos casos se considera mas cercano a la realidad al estudio por diámetro, ya que al obtener puntos de velocidad crítica fijando el tamaño, esta curva consideraría el efecto del área de impacto. El caso de análisis por velocidad es indiferente al área, que como se vio en 4.11, sí tiene un efecto en los resultados del impacto.

Es evidente que en la realidad no tienen sentido partículas sin velocidad o sin diámetro, por lo cual estos se asume que son comportamientos dentro del rango estudiado y los cuales pueden cambiar para valores menores o mayores.

### 4.4.2. Análisis completo por energía cinética

Anteriormente se fijó un valor de tamaño o de velocidad para estudiar de forma independiente los conjuntos de casos. Para poder analizar los 16 modelos en su globalidad es necesario tomar un parámetro que sea transversal a todos y característico de cada caso. La mejor forma de estudiar este fenómeno es mediante la energía cinética de la partícula, ya que es el único input de energía del sistema y es un valor único para cada uno de los 16 modelos.

Una ventaja de estudiar los modelos en función de su energía cinética radica en que, al tener los tiempos y velocidades de los 2 instantes interesantes del modelo, se puede saber la cantidad de energía entregada al sustrato en ese momento y verificar las relaciones tanto absolutas del impacto como su comportamiento durante este.

Tomando los valores relevantes de las tablas 4.3 y 4.11 se genera la siguiente tabla de energías. Se utiliza  $E_c$  como la energía entregada al sustrato hasta el instante de estabilización, el volumen teórico máximo que se puede fundir con esa energía y luego el volumen real fundido hasta ese instante. Para esto se utiliza el  $Vol_{max}$  En la sección anterior ya se establecieron

los umbrales para que los casos en los que no hubo material fundido si hubiera por lo que en esta sección sólo se estudian los casos en los que hubo fusión.

Tabla 4.9: Resultados ordenados por energía cinética

Mod	$E_{c_{tot}}[\mu J]$	$Vol_{tot}[\mu m^3]$	$E_{c_{est}}[\mu J]$	$Vol_{est}(teo)[\mu m^3]$	$Vol_{est}real[\mu m^3]$
7	14,0	6462	3,4	1583	243
8	17,8	8265	7,8	3628	661
9	41,0	18854	29,5	13676	1904
10	56,75	26152	43,2	20050	3502
11	75,0	34634	63,5	29456	3903
12	95,9	44299	86,2	39972	4577
13	119,5	54968	99,2	46006	4260
14	165,4	76245	146,6	67943	5223
15	218,8	100974	208,4	96613	5889
16	279,6	129153	278,6	129153	6373

De la anterior tabla se pueden obtener 2 proporciones importantes; la primera la razón entre energía total y energía absorbida hasta la estabilización y la segunda la razón entre el volumen teórico posible y el volumen real fundido. esta información se presenta a continuación.

Tabla 4.10: Resultados de eficiencia

Mod	$E_{c_{tot}}/E_{c_{est}}\%$	$Vol_{est}(teo)/Vol_{est}(real)\%$
7	24,4	15,4
8	43,8	18,2
9	72,0	13,9
10	76,2	17,4
11	84,7	13,2
12	89,9	11,4
13	83,0	9,2
14	88,6	7,6
15	95,3	6,0
16	99,7	5,0

Ahora para observar el comportamiento obtenido se grafican las relaciones importantes de la información presentada. En primer lugar el volumen fundido en función de la energía cinética y luego las razones presentadas en 4.10.

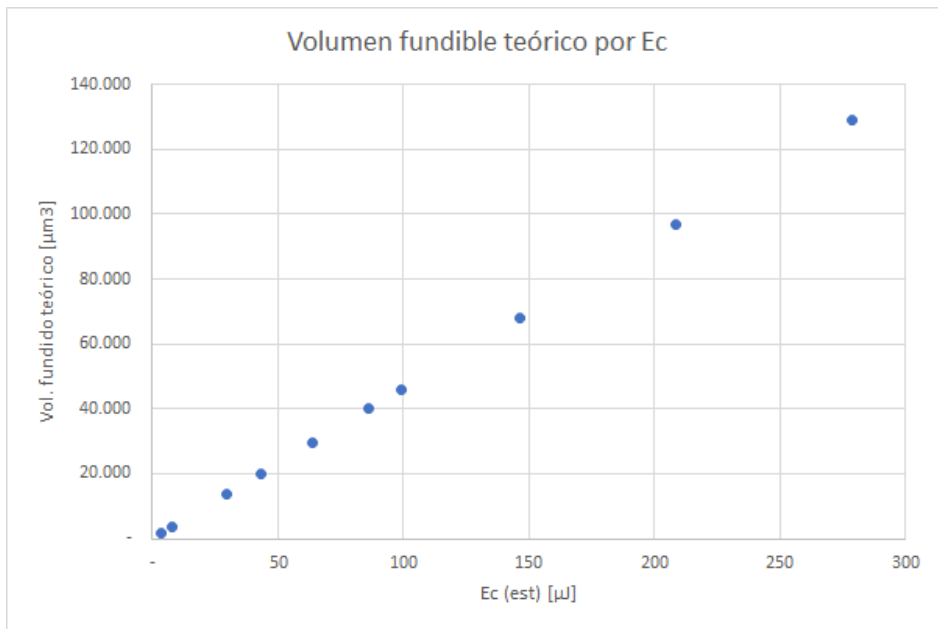


Figura 4.46: Comportamiento teórico

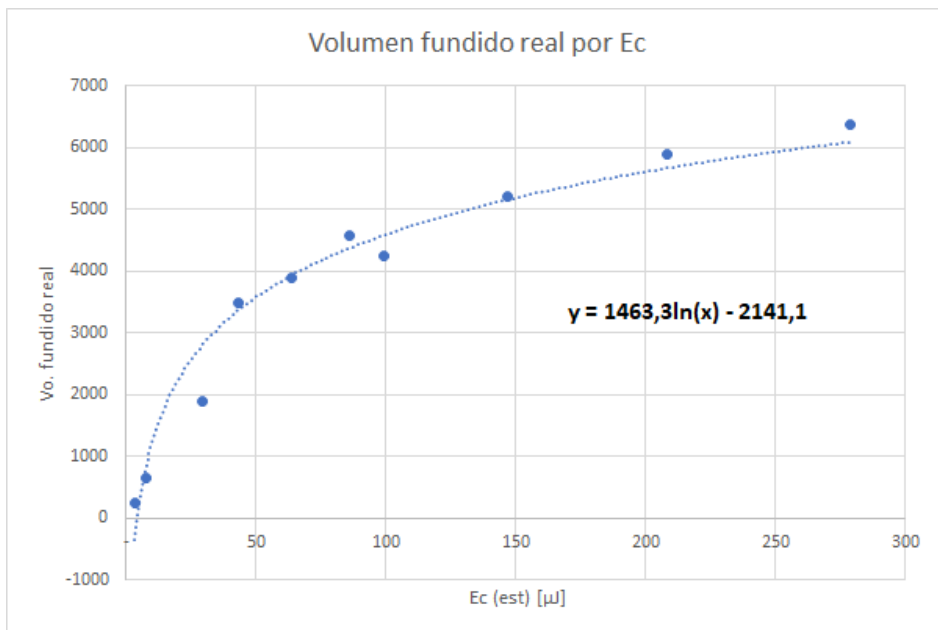


Figura 4.47: Comportamiento real

De las curvas presentadas en las figuras 4.46 y 4.47 se puede apreciar inmediatamente que la eficiencia de fundición es baja, cercana al 10 %, por lo cual se opta mostrar las curvas en gráficos separados. El comportamiento teórico resulta lineal, lo cual es consistente ya que se origina de la ecuación 2.3. El comportamiento real es ajustado mediante una curva de tipo logaritmo natural de la cual se obtiene que el mínimo de energía cinética absorbida por el sustrato para generar fusión es de 4,3 [μJ]. Es importante recordar que esta es la energía traspasada de la partícula al sustrato durante el tiempo de estabilización y **no** la energía cinética inicial de la partícula.

Este comportamiento de logaritmo natural se atribuye a que mientras mas energético es el impacto, se genera un mayor volumen térmicamente afectado. Este volumen afectado significa un crecimiento exponencial de volumen de material que se calienta pero que nunca alcanzará el umbral de fusión.

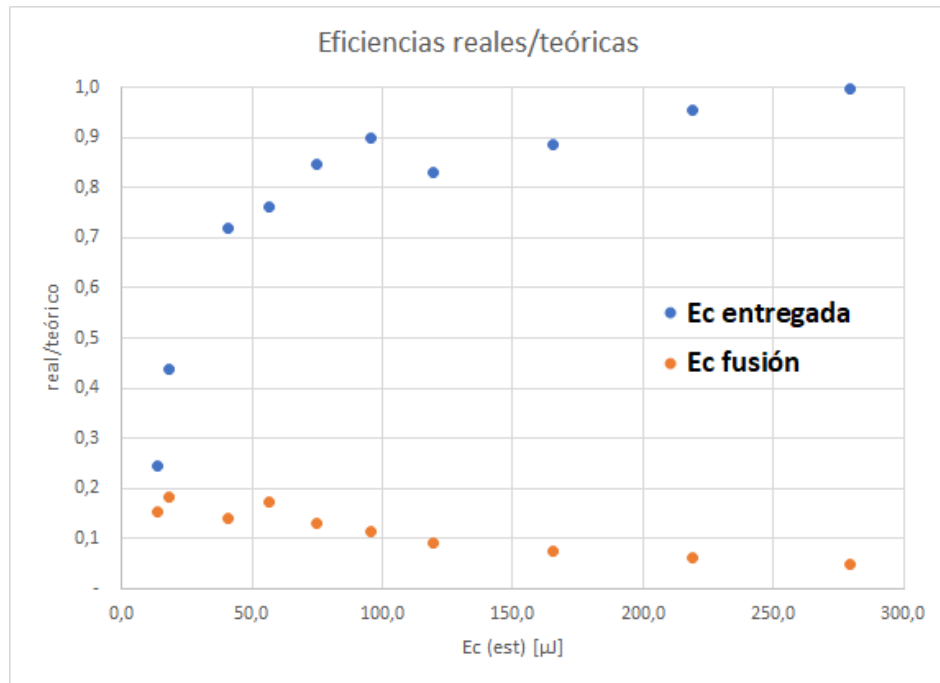


Figura 4.48: Razones de comportamiento real vs teórico

De la figura 4.48 se puede apreciar que a medida que la velocidad de partícula aumenta, la energía remanente luego de la estabilización disminuye. Esto resulta coherente si pensamos que, en teoría, el material pudiera seguir fundido incluso luego del frenado completo de la partícula si es que la conducción interna no ha terminado de enfriar. Por otro lado vemos que la eficiencia de material fundido baja desde cerca de un 20 % hasta un 5 %. Esto se entiende debido a que a mayor velocidad el área afectada térmicamente aumenta, generando mucho material que se calienta pero no alcanza la temperatura de fusión.

Finalmente, tomando la distribución de tamaños de 1.2 y una distribución normal de las velocidades es posible hacer un análisis estadístico del % de partículas en proporción volumétrica que generaron fusión. Para esto se toma que la energía cinética de la primera partícula que generó fusión (40 [ $\mu$ m] de diámetro a 460 [m/s]), la cual tenía 14 [ $\mu$ J] de energía cinética.

Tabla 4.11: Resultados ordenados por tamaño

D [ $\mu m$ ]	% Vol	$V_{min}[m/s]$	% $V > V_{min}$	% funde
0-10	1,73	3679	0,000	0,0
10-20	5,17	1301	0,000	0,0
20-30	16,4	708	0,002	0,0
40-50	44,8	460	30,754	13,6
50-60	16,9	329	92,078	15,6
60-70	8,56	250	99,489	8,5
70-80	3,69	199	99,956	3,7
80-90	1,58	163	99,994	1,6
90-100	0,0	136	99,998	0,0
100+	0,42	116	99,999	0,4
				Total: 43,3

De la tabla 4.11 se pueden concluir que pasado los 50 [ $\mu m$ ] de diámetro, sobre el 90 % de las partículas logran generar material fundido. En total, por distribución volumétrica, un 43,3 % de las partículas generaron fusión en el sustrato. Este valor surge de que casi la mitad (44,8 %) de la distribución volumétrica se encuentra en el rango 40-50 [ $\mu m$ ] de diámetro, donde la distribución de velocidad solo permite superar el umbral crítico a un 30,7 % de los impactos.

Este análisis es teórico y no contempla los efectos que pudiera existir entre el gas y el tamaño de partícula, es decir, asume que el gas tiene la misma distribución de velocidad independiente del tamaño de partícula.

## 4.5. Interpretaciones y predicciones teóricas

En primer lugar es importante identificar como se comportan las regiones térmicamente afectadas.

### 4.5.1. Regiones térmicamente afectadas

De los modelos se pueden identificar 2 secciones térmicamente afectadas diferentes; la primera corresponde a la acumulación de material que ocurre en el borde del impacto y la segunda al material fundido que se ubica en la interfaz partícula-sustrato. De ambas se esperan comportamientos diferentes que se pasan a explicar en esta sección:

#### 1. Material fundido acumulado en el borde

Este material, el cual representa la mayor porción en espesor, tiene una alta probabilidad de salir eyectado durante un impacto real. Por estabilidad del mallado adaptativo ALE no resulta conveniente entregarle al modelo la capacidad de reflejar si este fenómeno efectivamente ocurriría. El fenómeno de *jetting*, o eyección de material, esta documentado en literatura sobre impactos, por lo cual es razonable creer que puede ocurrir en este caso. Este fenómeno se ha evidenciado en imágenes SEM de estudios

experimentales ([5]). La figura 4.49 presenta el fenómeno de *jetting* obtenido de estas imágenes.

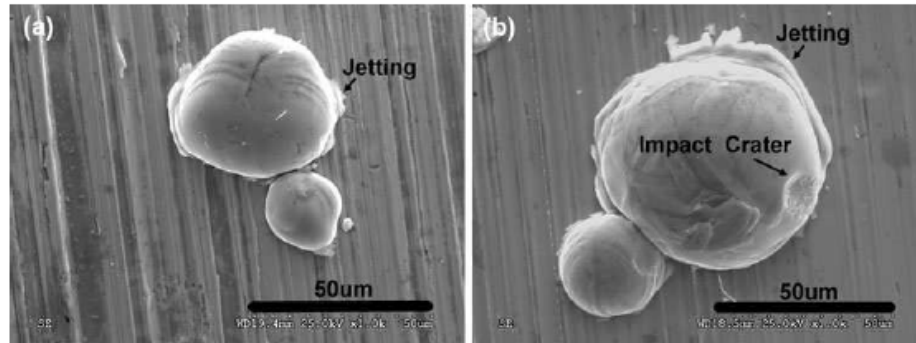


Figura 4.49: Jetting en bordes de impacto

Las consecuencias que podría traer este efecto no son significativas desde una perspectiva de material, debido a lo masivo del sustrato, pero si pueden ser relevantes respecto de la aspereza o condiciones para unión mecánica que su desprendimiento hereda a la superficie. En la sección 4.2 se hablaba sobre un eventual efecto de abrazo que el sustrato podría generar pasada una velocidad límite. Este efecto ocurriría, desde un punto de vista teórico/geométrico, al menos después de penetrado 1 radio, sin embargo, al suponer que el material acumulado en los bordes pudiera salir eyectado, la profundidad del impacto tendría que ser mayor, con tal de generar que sólo material permanentemente sólido rodee a la partícula.

## 2. Material fundido en la interfaz

Este material, de mucho menor espesor que el anterior, llega a cubrir mantos grandes de la superficie de contacto en los casos de impactos más energéticos. La principal característica que se le puede atribuir es que no debería salir eyectado durante el impacto. Esto por 2 razones principales, en primer lugar porque se ve obstaculizada por la gota de material acumulada que se esta desprendiendo y en segundo lugar porque está en estado líquido muy poco tiempo y se encuentra enfriándose rápidamente en la interfaz.

Este efecto es indiferente a la sección del manto, pudiendo presentarse en teoría en cualquier parte desde la base del impacto a lo largo del arco.

Las consecuencias que el tipo de material fundido tiene en la unión se explican en la sección siguiente.

### 4.5.2. Consecuencias en la unión

De todos los casos estudiados se puede descartar que exista fusión en la partícula. Esto significa que todas las características que se generen en la unión por material fundido debe venir directamente del comportamiento del sustrato. El *peak* de temperatura alcanzado (figura 4.50 en el cuadro más caliente de la partícula más energética alcanza cerca de los 1300 [K]. Esto se encuentra lejos de afectar a la partícula, la cual alcanza cerca de los 800 [K] en igual momento de la simulación. La temperatura de fusión del  $Al_2O_3$  es superior a los 2200 [K].

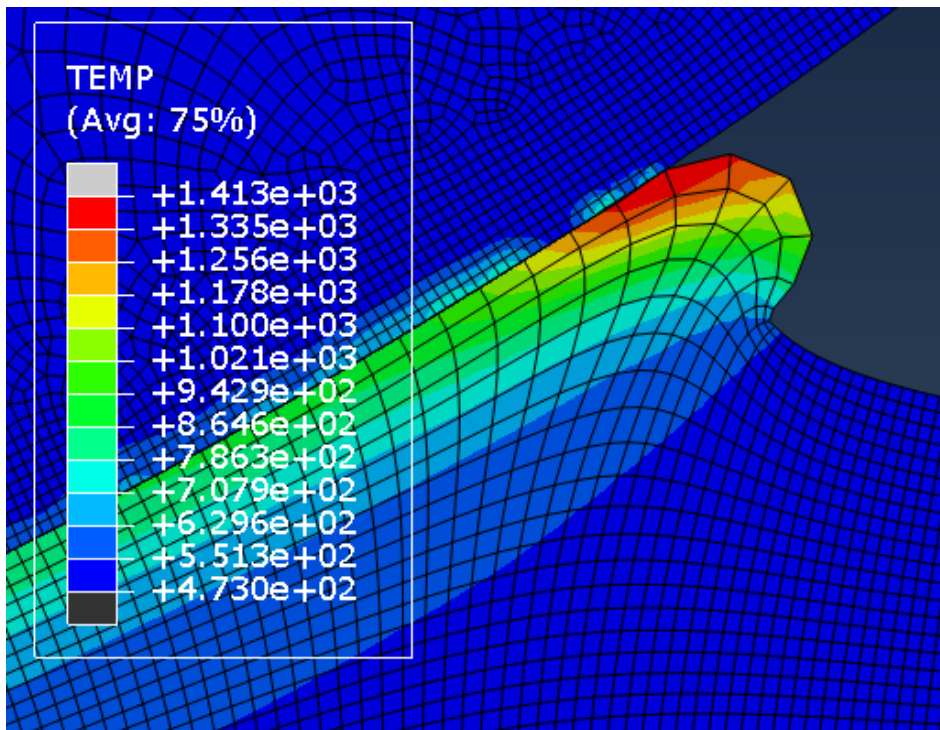


Figura 4.50: *Peak* térmico del fenómeno

Respecto de lo anterior sí es posible esperar mejoras en la adherencia en la interfaz. Lo anterior se debe a que las partículas no son perfectamente esféricas y poseen pequeñas grietas e irregularidades en su superficie como se ve en la figura 4.51. El material fundido podría adaptarse a esas zonas, aumentando la superficie de fricción y por lo tanto generando una mayor adherencia. Las formas de estas partículas se pueden evidenciar en la siguiente imagen [7]:

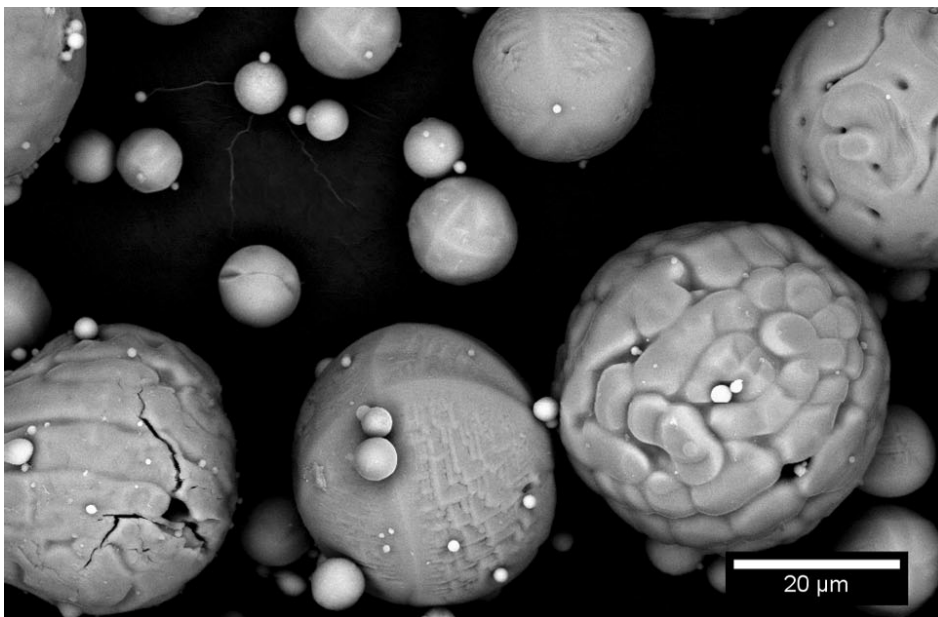


Figura 4.51: Imagen de las partículas reales

### 4.5.3. Consecuencias en la microestructura

De acuerdo a la literatura, los granos de un AL6061-T6 comercial son de aproximadamente  $75\ [\mu m]$  de tamaño [11] (suponiendo una dimensión principal al no ser perfectamente esféricos). Además, el tamaño tradicional de los precipitados de esta aleación corresponde a agujas de en promedio  $22\ [nm]$  de largo y  $2\ [nm]$  de espesor[16].

Debido a que los impactos pueden deformar hasta 1 radio de profundidad del modelo, los precipitados serían desplazados y concentrados cerca del borde del grano orientado al impacto. Esto supone una alta concentración de precipitados y dislocaciones en la superficie, lo que se traduce en un endurecimiento por trabajo en frío y por concentración de precipitados. Este comportamiento se explica mediante las figuras 4.52 y 4.53.

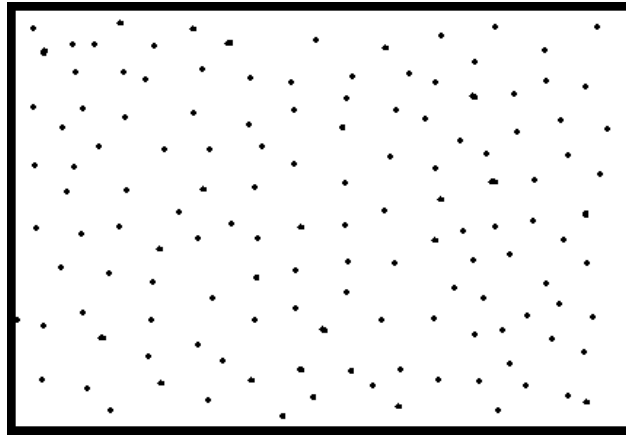


Figura 4.52: Dispersión inicial de precipitados

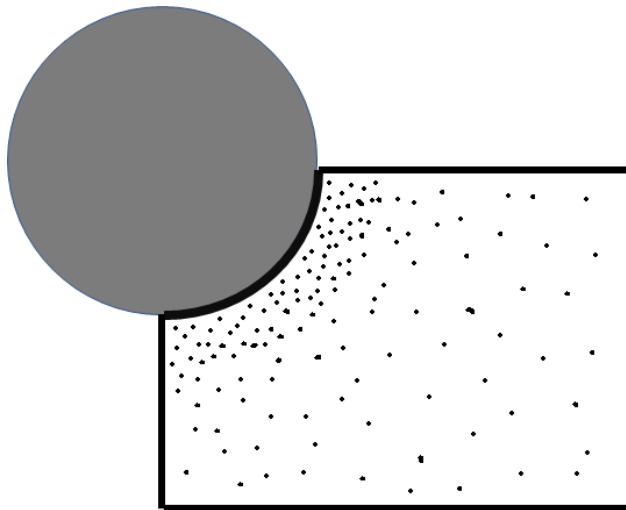


Figura 4.53: Dispersión acumulada en el borde de precipitados

Desde un punto de vista térmico, este aluminio está endurecido por envejecimiento, por lo cual podría perder dureza. De los modelos presentados, la temperatura de la zona térmicamente afectada decrece rápidamente en función de la profundidad. Además, el tiempo que



permanece caliente esta en el orden de los nanosegundos respecto del calor por el impacto, y de minutos por el calor absorbido por la temperatura del gas. Todo lo anterior indica que el material no debería perder dureza por sobre envejecimiento ya que este se mueve en el rango de horas.

Como ejemplo de esto se muestra en la figura 4.54 la distribución de temperatura para el caso de 70 [ $\mu m$ ] de diámetro y 520 [m/s].

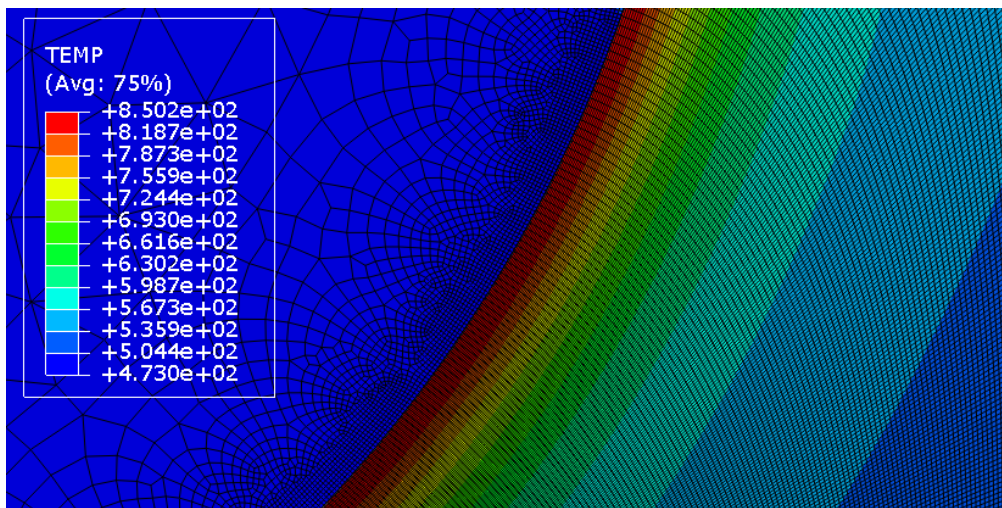


Figura 4.54: Distribución de temperatura por impacto

Tomando en cuenta que la capa de color rojo tiene cerca de 1 [ $\mu m$ ] de espesor, se aprecia que a los 5 [ $\mu m$ ] de profundidad la temperatura es sólo uno 60 [K] mayor que la temperatura base.

Uno de los fenómenos que se ha registrado en la literatura respecto de efectos en la microestructura producto de deformaciones corresponde a la recristalización dinámica. Esto supone que el material genera granos durante la deformación y no después de esta. Ya que en los impactos generados durante el proceso de generar recubrimientos, resulta coherente que se haya encontrado este fenómeno en las investigaciones ligadas al proceso de cold spray. En la figura 4.55 [17] se presenta un ejemplo de esto.

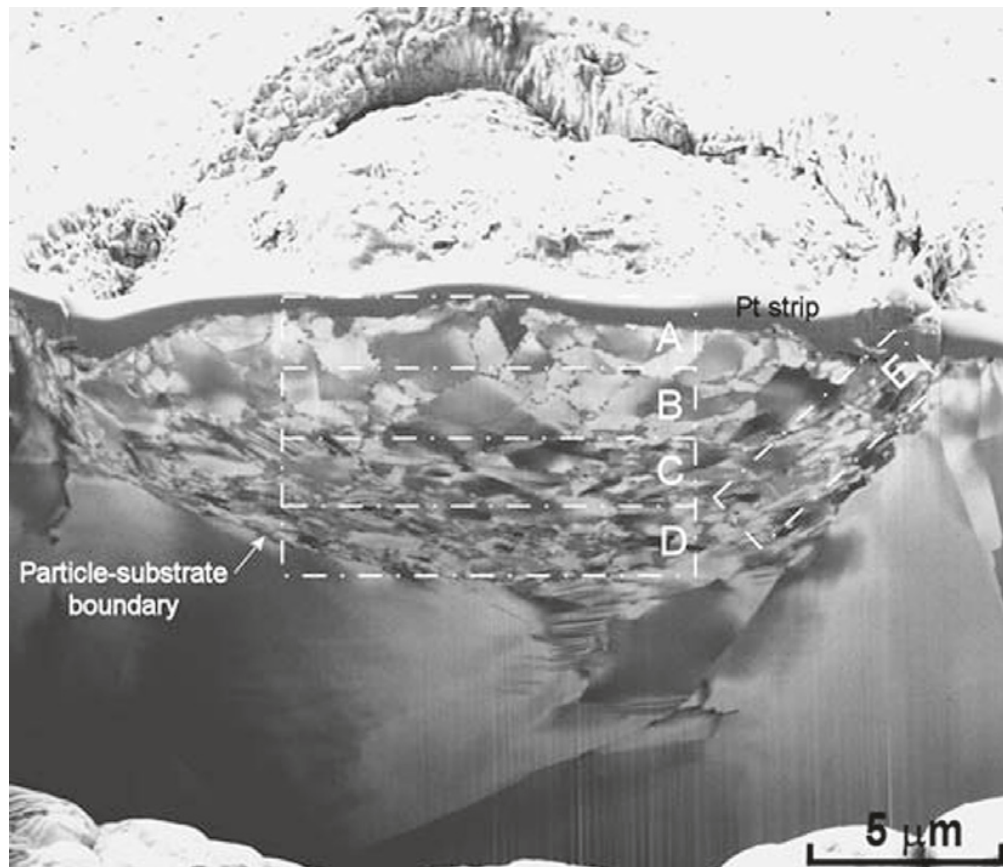


Figura 4.55: Ejemplo de recristalización dinámica

Como se puede apreciar, el efecto de recristalización dinámica ocurre en la partícula y no en el sustrato., siendo registrado en diferentes combinaciones de materiales. En este estudio, la partícula es de un material que no puede recristalizar. Como se mencionó anteriormente los granos del sustrato tendrían en promedio  $75 \mu\text{m}$  de dimensión principal, lo cual contrastado con la escala de tamaños de las partículas significa que los impactos abarcarían en general 1 borde de grano. Esta escala se parece a la de la imagen 4.55, en la que se aprecia que la partícula deformó a 2 granos continuos.

Este análisis entonces sostiene que un aumento de dureza producto de la deformación plástica tiene como causa más probable una acumulación de precipitados en el borde, como se detalló anteriormente, y no por un refinamiento de tamaño de grano originado de la mezcla de alta deformación y temperatura.

Los cambios de microestructura detallados cobran sentido al pensarlos en la región de material afectado térmicamente en la interfaz, debido a que representa la mayor parte del área de interacción del impacto. La zona de acumulación en el borde en primera instancia no tiene una condición de restricción espacial que la lleve a adaptar su forma. Lo anterior sumado al fenómeno de *jetting* lleva a concluir que los eventuales cambios microestructurales de esta zona de material son despreciables en la porción de área de cubren y de menor magnitud al tener mayor libertad de movimiento.

# Conclusión

A continuación se presentan las conclusiones de este trabajo.

- Fue posible generar un modelo para predecir la generación de material fundido que se puede ajustar a diferentes tamaños y velocidades de partícula manteniendo consistencia. En este sentido, dentro del rango estudiado se considera que optar por un mallado de tamaño constante y no de número de elemento constante favoreció al estudio al entregar uniformidad en la resolución. No se puede asegurar que esta consistencia se mantendría al trabajar en otros rangos de tamaños y velocidades, así como tampoco en una versión ampliada de los rangos presentes.
- La primera conclusión de los resultados de las dimensiones del modelo es que habría una velocidad crítica cercana a 520 [m/s] para la cual la penetración del impacto sería cercana a 1 radio. Además de estos resultados se obtuvo que la velocidad media durante el frenado sería constante para todos los casos, independiente del tamaño y de la velocidad de la partícula. Esto entrega un acercamiento a la tasa de transferencia de energía y la velocidad que favorece adherencia mecánica.
- Al estudiar los tramos de diámetro, se identifica que existe una velocidad crítica teórica desde la cual se debería generar fusión. Esta velocidad disminuye a medida que aumenta el diámetro de forma lineal, alcanzando una velocidad crítica de fusión de 556 [m/s].
- Al estudiar los tramos de velocidad, se identifica que existe un diámetro crítico teórico desde el cual se debería generar fusión. Este diámetro disminuye a medida que aumenta la velocidad de forma lineal, alcanzando un diámetro crítico de 122 [nm].
- Al estudiar los modelos por energía cinética se identifica que a pesar de que el comportamiento teórico debiera tener una forma lineal, en la realidad esto se estanca, tomando una forma de crecimiento más cercano a una curva de logaritmo natural. Lo anterior se puede asociar a que el material no es ilimitadamente deformable y que a medida que se aumenta la energía de impacto, se aumenta la ineficiencia por regiones que se calientan pero no funden y por sobrecalentamiento de regiones ya fundidas.
- Estadísticamente se concluye que cerca de un 43% de las partículas en porción volumétrica generaron material fundido. Esto para las placas reales supone que el modelo representa correctamente el polvo comercial utilizado.
- Se puede esperar que los impactos que tuvieron material fundido en la interfaz mejoren su adherencia debido al aumento de superficie de contacto. Esto se origina en la adaptación de la forma del sustrato a las irregularidades de la partícula.
- De los resultados obtenidos es posible confirmar que en las placas reales sí se presentan las condiciones para generar material fundido durante su fabricación. Más aún, es

posible asegurar con igual certeza que este material fundido se presenta en 2 formatos; material eyectado y material que se queda en la interfaz del impacto.

- Este trabajo cumple con entregar un nuevo antecedente respecto del fenómeno sin consenso científico de fusión en impacto.

El estudio realizado puede profundizarse y ampliarse en varios aspectos, los cuales quedan propuestos como trabajos futuros. Algunos de estos lineamientos son:

- Como las placas reales ya están fabricadas, se podría analizar la interfaz de los impactos mediante un microscopio electrónico de transmisión (TEM).
- Estudiar el efecto de los modelos de plasticidad en los resultados. Esto para verificar la validez de usar la ecuación de Johnson Cook.
- Estudiar el mismo caso pero en rangos de tamaño/velocidad diferentes. Lo anterior para estudiar el nivel de energía en el cual el comportamiento cambia.
- Generalizar para otros materiales de sustrato manteniendo el de la partícula (y el caso inverso).
- Estudiar en detalle variaciones de otros parámetros como la dureza.
- Confirmar que el recubrimiento aumenta localmente la dureza, al concentrar dislocaciones y precipitados, sin tener suficiente tiempo de impacto térmico como para afectar el envejecimiento del aluminio.
- Estudiar mejoría en la adherencia por adaptación de forma del material de la interfaz.

# Bibliografía

- [1] Núria Pinyol Alba Yerro, Eduardo Alonso. *MPM modelling of landslides in brittle and unsaturated soils*. PhD thesis, Universidad Politécnic de Catalunya, 2015.
- [2] Sergey Klinkov Anatolii Alkhimov Vasily M. Fomin Anatolii Papyrin, Vladimir Kosarev. *Cold Spray Techonology*. Elsevier Science, 2007.
- [3] Stoltenhoff Thorsten Kreye Heinrich Assadi Hamid, Gärtner Frank. Bonding mechanism in cold gas spraying, 2003.
- [4] Stoltenhoff Thorsten Kreye Heinrich Assadi Hamid, Gärtner Frank. Development of a generalized parameter window of cold spray deposition, 2005.
- [5] Stepehen Yue Eric Irissou Jean-Gabriel Legoux Dina Goldbaum, Richard R. Chromik. Mechanical property mapping of cold sprayed ti splats and coatings, 2010.
- [6] Jodoin Bertrand Fernández Rubén. Cold spray aluminum-alumina cermet coatings: Effect of alumina content, 2018.
- [7] Jodoin Bertrand Fernández Rubén. Cold spray aluminum-alumina cermet coatings: Effect of alumina morphology, 2018.
- [8] S. Kumar Kicheol Kang Changhee Lee Gyuyeol Bae, Yuming Xiong. General aspects of interface bonding in kinetic sprayed coatings, 2008.
- [9] ASM International. *ASM Metals Handbook, Vol 02. Properties and Selecion: Nonferrous Alloys ans Special-Purpose Materials*. ASM International, 1990.
- [10] Hélene Walter-Le Berre Kazuhiro Ogawa-Yuji Ichikawa Jing Xie, Daniel Nelias. Simulation of the cold spray particle deposition process, 2014.
- [11] W. Dale Comptona Alexander H. King M. Ravi Shankar, Srinivasan Chandrasekar. Characteristics of aluminum 6061-t6 deforms to large plastic strains by machining, 2005.
- [12] K. Spencer M. Saleh, V. Iuzin. Analysis of the residual stress and bonding mechanism in the cold spray technique using experimental and numerical methods, 2014.
- [13] Keith A. Nelson Cristopher A. Schuh Mostafa Hassani-Gangaraj, David Veysset. Melting

can hinder impact-induced adhesion, 2017.

- [14] Keith A. Nelson Víctor K. Champagne Mostafa Hassani-Gangaraj, David Veysset. Adiabatic shear instability is not necessary for adhesion in cold spray, 2018.
- [15] Saden H. Zahiri Mahnaz Jahedi Changhee Lee Peter C. King, Gyuyeol Bae. An experimental and finite element study of cold spray copper impact onto two aluminum substrate, 2009.
- [16] X. Li M.A. Wall S.C. Bergsma, M.E. Kassner. Strengthening in the aluminum alloy aa 6069, 1998.
- [17] Xinkun Suo Rocco Lupoi Shuo Yin, Chaoyne Chen. Cold-sprayed metal coatings with nanostructure, 2018.
- [18] Fu-Lin Shang Guan-Jun Yang Yu-Yue Wang Chang-Jiu Li Xiao-Tao Luo, Cheng-Xin Li. High velocity impact induced microstructure evolution during deposition of cold spray coatings: A review, 2014.
- [19] Keisuke Atsumi Motohiro Yamada Masahiro Fukumoto Yuta Watanabe, Chisato Yoshida. Influence of substrate temperature on adhesion strength of cold sprayed coatings, 2014.