



MEMORIAS DEL XXVII SEMINARIO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN PICYT 2024

León, Guanajuato, México, 4 y 5 de Julio de 2024.



ISBN: 978-970-96602-0-3



9 789709 660203

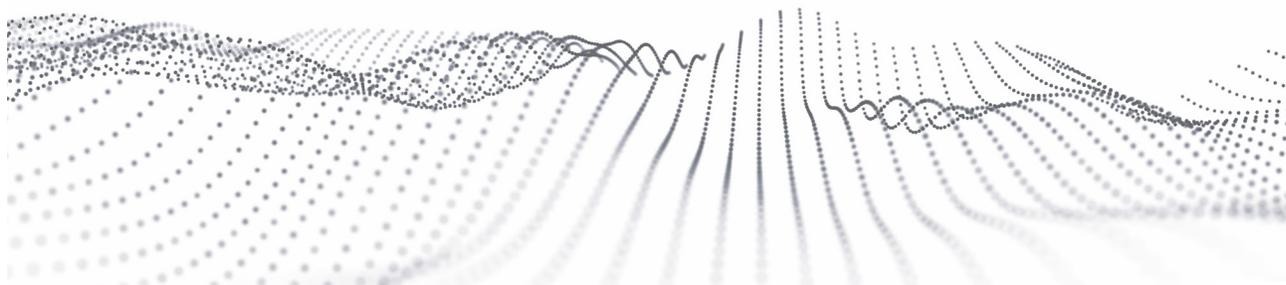
MEMORIAS DEL XXVII SEMINARIO NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN PICYT 2024
León, Guanajuato, México, 4 y 5 de Julio de 2024

CONSEJO DE POSGRADO

COMITÉ ACADÉMICO INTERINSTITUCIONAL

COMITÉ EDITORIAL

Dr. Israel Miguel Andrés (CIATEC)
Dr. Guillermo Ronquillo Lomelí (CIDESI)
Dr. Rodolfo Martínez Manuel (CIO)
Dr. David Alfonso Camarena Pozos (CIATEC)
Dra. María Yolanda Reyes Vidal (CIDETEQ)
Dr. Juan José Quiroz Ramírez (CIATEC)
Dr. Javier Yáñez Mendiola (CIATEC)
Dr. José Octavio Saucedo Lucero (CIATEC)
Dr. Julio Alejandro Rodríguez González (CIDESI)
Dra. Guadalupe Sánchez Olivares (CIATEC)
Dr. Luis Manuel Valentín Coronado (CIO)
Dr. Oscar Manuel Rodríguez Narváez (CIATEC)
Dra. Rocío Saldaña Garcés (INNOVA)



MEMORIAS DEL XXVII SEMINARIO NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN PICYT 2024
León, Guanajuato, México, 4 y 5 de Julio de 2024

COMITÉ ORGANIZADOR

Emma Acevedo Moreno
Antonio Quijas Cervantes
Israel Miguel Andrés
Oscar Arturo Silva Rocha
Elisa López Alaniz
Gildardo Mujica Herrera
María Guadalupe Zermeño Ríos
Heriberto Carlos Gómez García
Armando Martínez Flores
Jorge Armando Ramos Frutos
Iván Fernando Hernández Araujo
Roberto Rosas Rangel
José Martín Sánchez Careaga
Montserrat de Lourdes Aguilar Pedraza
Jazmín Aranda Zamora
Alonso Santibañez Ung
Guadalupe Sánchez Olivares
Beatriz Padilla Rizo
Marisol González Bueno
Cinthia Paulina Escalera Garnica
Natyeli Alejandra Ortiz Tirado

MEMORIAS DEL XXVII SEMINARIO NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN PICYT 2024
León, Guanajuato, México, 4 y 5 de Julio de 2024

REVISORES DE LOS ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN

Dr. David Andrés Fernández Benavides
Dra. Raiza Ojaliju Hernández Bravo
Dr. Ismael Torres Gómez
Dr. Guillermo Ronquillo Lomelí
Dr. Francisco Javier Cuevas de la Rosa
Dr. Mauricio Torres Arellano
Dr. Saúl Piedra González
Dr. Daniel Porfirio Luis Jiménez
Dr. Javier Yáñez Mendiola

MEMORIAS DEL XXVII SEMINARIO NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN PICYT 2024
León, Guanajuato, México, 4 y 5 de Julio de 2024

Prefacio

La presente memoria reúne los trabajos de investigación presentados en el XXVII Seminario Nacional de Investigación, PICYT 2024 y que han sido aprobados por un comité evaluador por pares. El centro sede organizador fue CIATEC y el evento se llevó a cabo en la ciudad de León, Guanajuato, el 4 y 5 de julio de 2024. Los trabajos presentados corresponden a la línea de investigación en mecatrónica y diseño mecánico.

MEMORIAS DEL XXVII SEMINARIO NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN PICYT 2024
León, Guanajuato, México, 4 y 5 de Julio de 2024

Contenido

Desarrollo de sensores piezoresistivos de baja presión bajo la tecnología polimérica y del silicio.	9
Desarrollo del modelo numérico de elemento finito para la simulación de la evolución de la temperatura y microestructura en aceros.	16
Análisis de mecanismos de bloqueo en la alimentación de polvos en el proceso de laser metal deposition.	23

DESARROLLO DE SENSORES PIEZORESISTIVOS DE BAJA PRESIÓN BAJO LA TECNOLOGÍA POLIMÉRICA Y DEL SILICIO

César Hernández-Enríquez*, Carlos Augusto López-Lazcano, Daniela Diaz-Alonso,
Víctor Samuel Balderrama-Vázquez*

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, CIDESI
Playa pie de la cuesta 702, 76130, Santiago de Querétaro,
Querétaro, México.

* Autor de correspondencia:

César Hernández Enríquez,
CIDESI, Santiago de Querétaro, Querétaro, México.
c.hernandez@posgrado.cidesi.edu.mx

Resumen

El desarrollo de sensores piezoresistivos de baja presión utilizando substratos bajo las tecnologías polimérica-flexible y del silicio es presentada en esta investigación. La reciente crisis del silicio y de los semiconductores, el fenómeno del “nearshoring”, aunado al apremio de crear tecnología nacional, han propiciado la necesidad de explorar tecnologías diferentes a la del silicio. Los polímeros son materiales con características interesantes para el desarrollo de una nueva línea de investigación en sistemas electromecánicos (MEMS). Su bajo precio, propiedades mecánicas favorables, características aislantes y semiconductoras, su biocompatibilidad, entre otras características, los hacen candidatos para usarse en el desarrollo de sensores de baja presión. En este proyecto se pretende contribuir tecnológicamente en el desarrollo de dispositivos capaces de medir bajas presiones en rangos de -150 cm H₂O a +150 cm H₂O, con sensibilidades (S) de alrededor de 0.10 mV/V-kPa para aplicaciones en este rango.

Palabras clave: Modelado de un sensor de presión, puente de Wheatstone, diafragma flexible, sensibilidad, piezoresistores de nicromel.

Introducción

Los sensores de baja presión piezoresistivos para ambientes gaseosos con tecnología flexible es una tecnología alternativa al silicio. Pocos han sido los grupos de investigación que han reportado sensores de baja presión para ambientes gaseosos. En 2011 y 2012 Moinuddin, Nadvi y colaboradores, fabricaron y caracterizaron un sensor de presión MEMS tipo apilamiento entre capas flexibles de poliimida [1], [2], [3]. El sensor está compuesto de un diafragma suspendido de óxido de aluminio donde piezoresistores de nicromel, tienen una geometría de medio puente de Wheatstone para asegurar una respuesta a la más simple variación en cambio de su resistencia para ser lineal y con estabilidad al cambio de temperatura.

En 2014, Huang y colaboradores presentaron un sensor de ultra-baja presión altamente sensible y lineal [4]. La propuesta novedosa consistió en un diafragma de estructura tipo península con piezoresistores especialmente diseñados para esta aplicación.

En 2016, Zhang y colaboradores desarrollaron y optimizaron un sensor de presión piezoresistivo usando nanocables de doble silicio como elemento sensible piezoresistivo [5]. En 2018, Vang y colaboradores presentaron el diseño, metodología y proceso de fabricación de un nuevo sensor piezoresistivo de presión con una combinación de membrana en forma de viga en cruz para mediciones de micro presiones [6].

En 2021, Balderrama y colaboradores presentaron el estudio experimental de la operación de un sensor de presión hecho en sustratos flexibles de tereftalato de polietileno (PET) a baja temperatura [7]. Los piezoresistores de material nicromel con una orientación emulando a los sensores de silicio fueron colocados en configuración de puente de Wheatstone, todos sobre un diafragma circular. Esta investigación abre una nueva línea de investigación sobre sensores piezoresistivos de baja presión con membrana flexibles basadas en polímeros.

En 2024, Zhang y colaboradores han diseñado y fabricado un sensor de baja presión con puente de Wheatstone en tándem, de alta sensibilidad que puede utilizarse ampliamente en aplicaciones médicas e industriales [8]. Tabla 1, muestra un resumen de las diferentes contribuciones en sensores de presión, donde se muestran características sobresalientes de cada tecnología.

La hipótesis a destacar para este desarrollo, plantea optimizar, desarrollar y fabricar sensores de baja presión en rangos de -150 cm H₂O a +150 cm H₂O y con sensibilidades (S) de alrededor de 0.10 mV/V-kPa que podrían ser mejorados mediante la combinación de la tecnología del silicio y polimérica. Mejorar el desempeño de la sensibilidad involucra realizar modificaciones a la sección transversal, materiales y formas geométricas de la membrana del sensor de presión, dichas

Tipo de sensor	Rango de presión (kPa)	Material de diafragma	Material de piezoresistor	Forma de diafragma	Tamaño de diafragma (mm)	Factor de Galga	No linealidad	Sensibilidad (mV/V-kPa)	Referencia
Fuerza Presión	0.0 - 0.40 0.01- 100.0	Al ₂ O ₃	Nicromel	Cuadrado	0.120	5.23	-	0.24	[1]
		Al ₂ O ₃	Nicromel	Cuadrado	0.120	1.97	-	0.0015	[2]
Presión	0.0 - 5.0	Si	Si tipo p	Cuadrado	2.900	-	0.28	25.7	[3]
Presión	0.0 - 100.0	Si	Si	Cuadrado	0.200	-	-	0.495	[4]
Presión	0.0 - 7500	Al ₂ O ₃	Nicromel	Cuadrado	0.120	1.75	-	-	[5]
Presión	0.0 - 5.0	Si	Polisilicio	Cruz	1.900	-	0.36	18.4	[6]
Presión	60 - 130	PET	Nicromel	Circular	3.7	4.7	10.9	6.36	[7]
Presión	-10 - (+)10	Si	Si tipo p	Cuadrado	3.5	-	0.19	23.07	[8]
Presión	-14.71 - 14.71	PET	Nicromel	Cuadrado	1.500	Por definirse	≤10	0.10	Sensor propuesto

Tabla 1 Comparación de las principales características técnicas de los sensores piezoresistivos.

características pueden impactar directamente en obtener mejores linealidades en la respuesta de salida del sensor de baja presión.

El objetivo general del desarrollo es diseñar, modelar, simular, fabricar, empaquetar y caracterizar electromecánicamente un sensor de baja presión bajo el principio de piezoresistividad para alcanzar una sensibilidad de al menos de 0.10 mV/V-kPa con rango de trabajo entre -150 cm de H₂O a +150 cm de H₂O (-14.71 kPa a +14.71 kPa) realizado bajo la tecnología polimérica-silicio.

Metodología

El desarrollo de sensores MEMS de presión se presenta a continuación. El proceso está relacionado con la manufactura de materiales polímeros, como es el PET. Estos presentan condiciones diferentes a la fabricación en comparación a las del silicio. Características sobresalientes de los polímeros es su bajo punto de fusión (alrededor de 220 °C), por lo que para aplicaciones de altas temperaturas quedan descartados. De manera general, la metodología se desarrolla como sigue.

Primero, se hace un constante análisis del estado del arte donde se conocen los antecedentes generales del área de sensores piezoresistivos de baja presión bajo la tecnología polimérica y la de silicio.

Después, se hace un exhaustivo análisis respecto a la propuesta de diseño donde se establecen las geometrías (dimensiones generales) de los piezoresistores, membrana, conexiones eléctricas para alcanzar las especificaciones técnicas definidas del sensor. Para optimizar cada variable de cada elemento del sensor de presión, se utiliza un software comercial de simulación, en este caso se utiliza el COMSOL Multi-Física. En esta etapa consiste en hacerse un análisis de modelación y simulación con características definidas como en dimensiones, asignación de materiales, establecer condiciones de frontera y definición del rango de presión al cual trabaja el sensor de presión. Mediante la simulación de análisis de elemento finito (FEA, por sus siglas en inglés) se busca optimizar ciertos parámetros del sensor de presión con el objetivo de mejorar la sensibilidad (S). Se

definen los parámetros específicos de simulación de la siguiente manera. El rango de presión correspondiente es en base al valor que el cuerpo humano trabaja y que se definieron anteriormente (-14.7 kPa a +14.7 kPa). El material de la membrana del sensor de presión es de polímero PET; los piezoresistores son de Nicromel definidos bajo un comportamiento piezoresistivo isotrópico y estableciéndose con un factor de galga de 4; las líneas metálicas conductoras para formar el puente de Wheatstone son de Au; y la geometría de la membrana es cuadrada teniendo una longitud de 2000 um por lado.

Los esfuerzos mecánicos máximos son calculados, así como los desplazamientos máximos y la respuesta del diferencial de potencial de salida con respecto a la presión de entrada en el sensor. En el mismo análisis, se calcula el factor de seguridad y la sensibilidad. Los valores obtenidos usando el simulador COMSOL, se relacionan con algunos estudios previos y cálculos teóricos donde el sensor puede compararse estando bajo ciertas condiciones de funcionamiento.

Alcanzadas las especificaciones técnicas para el sensor, se prosigue en obtener el diseño de flujo del proceso de fabricación y protocolos necesarios. El condensado de pasos a seguir se concentran en un procedimiento normalizado de operación (PNO), el cual define de manera detallada cada paso del proceso de microfabricación hasta obtener el sensor de presión. Algunos procesos que se requieren son desde los procedimientos de fotolitografía, depósito de materiales mediante técnicas de pulverización catódica, micromaquinado volumétrico y superficial, entre otros (Figura 1).

Terminado la etapa de fabricación, se hace el corte de la oblea procesada para obtener los chips. La siguiente etapa es el empaquetamiento que abarca la parte eléctrica, electrónica y mecánica. El empaquetamiento consiste en la colocación y pegado del chip sobre una placa electrónica PCB y posterior a ello es hacer el microalambrado eléctrico para seguir después con el conectado con componentes externos. Se utiliza para esta etapa, procedimientos estándar de empaquetamiento o de lo contrario se diseñan.

Una vez empaquetado el chip se procede con

la caracterización mecánica- eléctrica y además bajo un entorno de temperatura controlada. Los principales parámetros a evaluar son: sensibilidad, linealidad, rango de trabajo de presión, voltaje de entrada, voltaje de salida e histéresis. Cada parámetro obtenido siempre es necesario compararlo con referencias calibradas.

De acuerdo a las especificaciones técnicas del sensor, en caso de que no se alcance, es hacer una serie de iteraciones de manera general.

El grado de madurez tecnológica para este proyecto es el TRL 3 que debate ser alcanzado, la cual comprende los siguientes aspectos:

- Investigación de laboratorio.
- Prueba experimental de concepto.
- Primera evaluación de la factibilidad de un concepto y su tecnología.

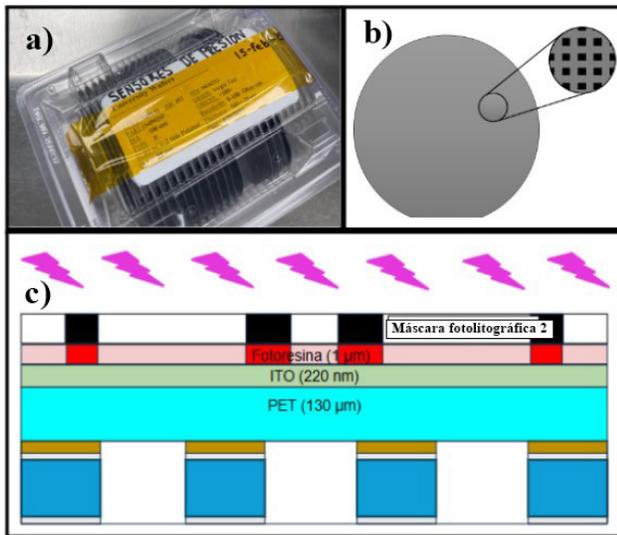


Figura 1. Pasos representativos del proceso de fabricación del sensor de presión diferencial. a) Limpieza de obleas de silicio, b) Ataque por DRIE sobre el sustrato de silicio, c) Proceso de micromaquinado volumétrico y superficial.

Otro aspecto fundamental, es que los sensores de presión deben de cubrir protocolos de seguridad tales como el aspecto de funcionamiento eléctrico norma MIL-STD-202G, pruebas de vibraciones norma 204D, prueba de impacto norma 213B y pruebas bajo humedad norma IPC/ JEDEC J-STD-020.

Resultados y discusión

La optimización, es uno de los puntos clave para obtener parámetros idóneos relacionado en cuanto con la geometría de los piezoresistores adecuados, tamaño de la membrana lo suficiente para que pueda deformarse y donde este efecto mecánico pueda ser transmitido a los piezoresistores que están puestos sobre la membrana de PET y conectados bajo una configuración de puente de Wheatstone. El espesor de la membrana es otro de los parámetros que son optimizados.

Los resultados obtenidos como los esfuerzos que se generan en la membrana del sensor son simulados a partir por elemento finito (COMSOL), ver Figura 2. En la Figura 3 se puede observar la respuesta de salida de voltaje en función de la presión aplicada al sensor, resultado por simulación FEA.

Se han diseñado las primeras etapas del proceso de flujo de fabricación de tal manera que es-

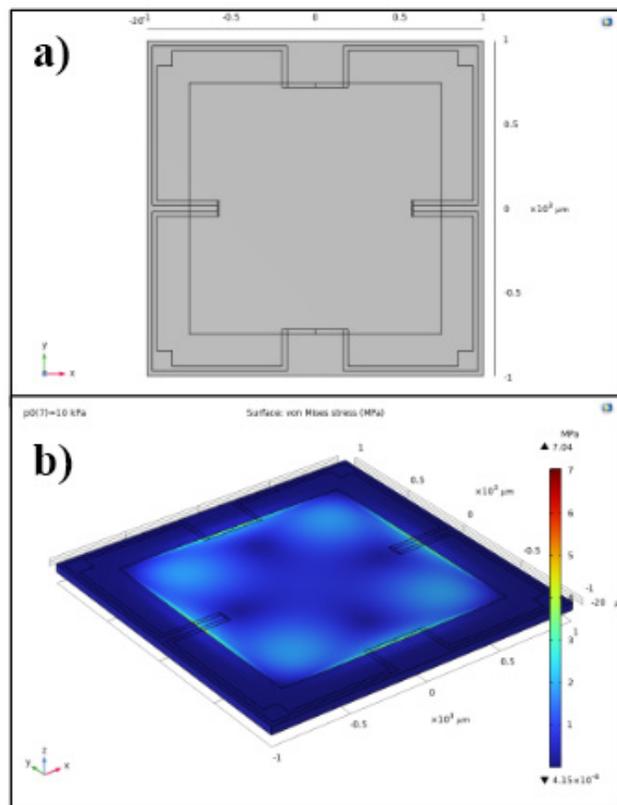


Figura 2. Simulación FEA en COMSOL a) Geometría CAD del sensor de presión flexible, b) Análisis de esfuerzos de von Mises.

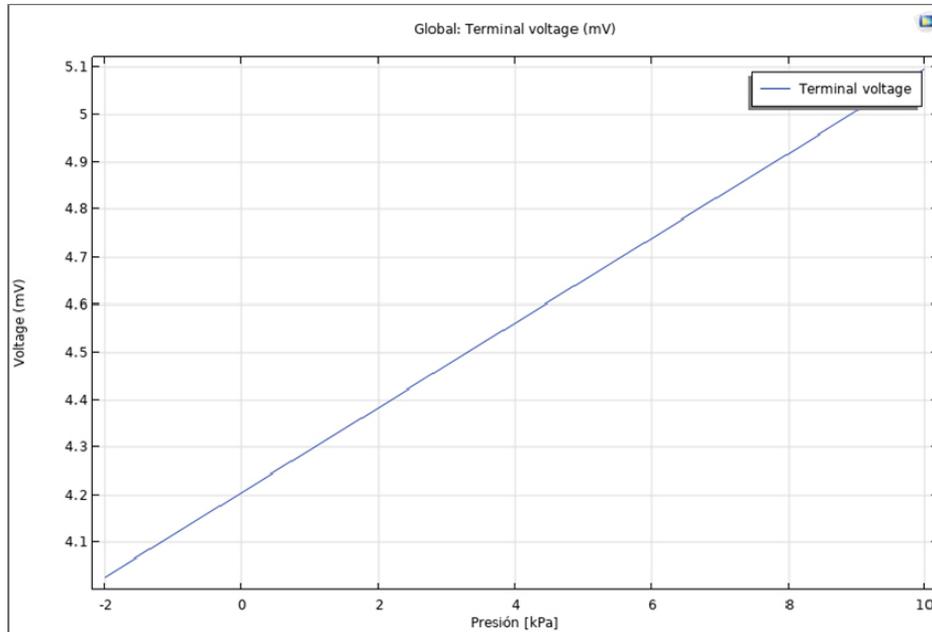


Figura 3. Gráfica de voltaje de salida contra presión de entrada en el sensor de presión bajo la simulación por FEA.

tas sean las óptimas y puedan aplicarse durante la microfabricación del sensor. Un conjunto de máscaras fotolitográficas se ha diseñado cuidadosamente y fabricado, teniendo en cuenta la ubicación de las conexiones eléctricas, distancias y espacios de separación mínima permisible el cual deben de alcanzar el sensor de presión. En esta etapa se deben de tomar en cuenta todos los procesos de grabado y remoción de material ya sea, usando técnicas de ataque químico o por procesos de lift-off.

En la caracterización del sensor, es necesario desarrollar un banco de pruebas para la caracterización eléctrica-mecánica. Este banco de pruebas consiste en una fuente de voltaje regulable, un multímetro para medir las resistencias y voltajes de salida. Una placa de pruebas y cables para todas las conexiones eléctricas entre las terminales del sensor de presión donde es necesario alimentarlo y conexiones donde se lee la variación de salida de voltaje, como se puede ver en la Figura 4.

Para garantizar los valores de sensibilidad requeridos, este sensor deberá tener una resistencia en un rango de 100Ω a $10 \text{ k}\Omega$ para los piezoresistores, un rango de presión de -14.7 a $+14.7 \text{ kPa}$ (-150 a $+150 \text{ cm H}_2\text{O}$) y un voltaje de polarización

de suministro de 5 V . Se está considerando que la temperatura de trabajo del sensor esté en el rango de $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ a $50 \text{ }^\circ\text{C}$ y con un tiempo de respuesta de 5 ms .

Otra característica es la geometría y ubicación de sus piezoresistores sobre la membrana flexible. Los piezoresistores se localizan en el centro-borde de cada lado del diafragma debido que ahí se ubica la mayor concentración de esfuerzos. La forma geométrica de los cuatro piezoresistores es rectangular. En el caso de los piezoresistores transversales (los que tienen dirección al centro del diafragma) se han dividido en dos piezoresistores en serie para aprovechar la deformación en esa área. El objetivo es obtener el mayor desbalance entre los dos pares de piezoresistencias transversales y longitudinales. El sensor analizado tiene una forma cuadrada y la longitud por lado es de $2000 \mu\text{m}$. Estos parámetros fueron obtenidos derivados de los resultados obtenidos de simulaciones en COMSOL. El material PET es usado como la membrana y el material piezoresistivo nicromel es usado en el análisis. Las conexiones eléctricas usadas son a partir de Al y Au.

Otro aspecto importante es la caracterización eléctrica para el sensor de presión, donde se desa-

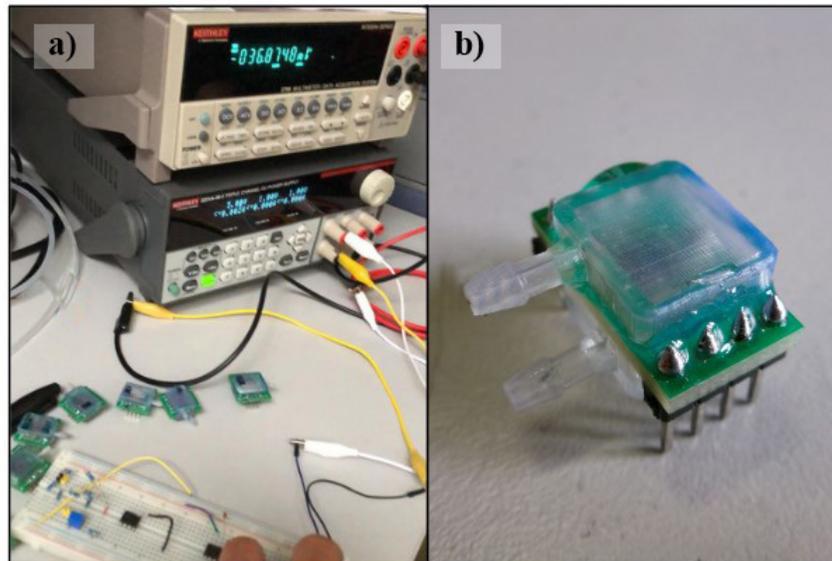


Figura 4. Caracterización experimental de sensores de presión a) Banco de pruebas, b) Sensor de presión.

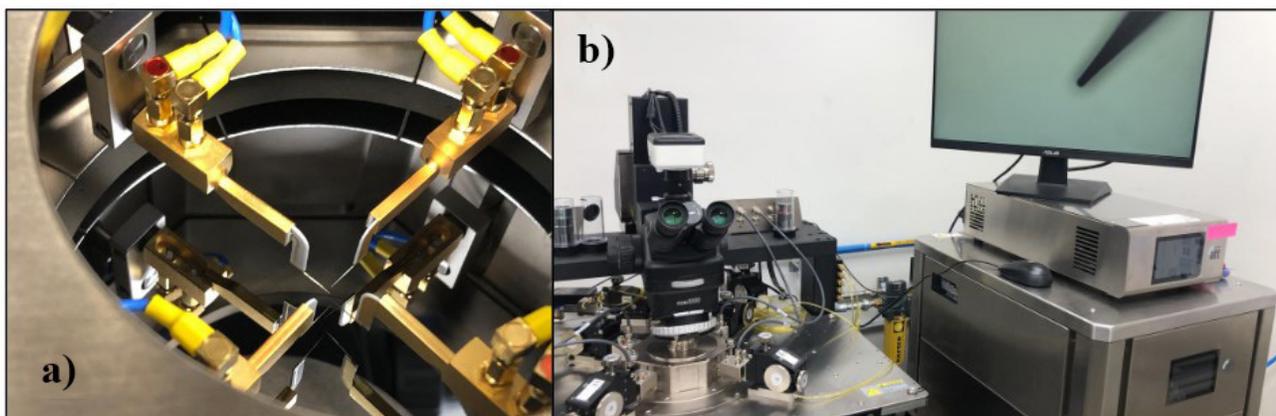


Figura 5. Estación de caracterización eléctrica de materiales, a) Micropuntas para hacer las mediciones eléctricas. b) Estación Summit 11000.

rollan protocolos de medición; en la estación de caracterización de semiconductores se realizan las mediciones y pruebas de resistencias, donde se obtienen las resistividades y la resistencia de hoja, ver Figura 5.

Conclusiones

La primera parte del desarrollo de sensores piezoresistivos de baja presión están siendo explorados bajo la tecnología polimérica y del silicio. El desarrollo de sensores de presión con tecnologías polimérica, presenta desafíos durante la etapa de manufactura ya que usar metodologías similares a la tecnología bajo el silicio no aplican, debido al procesamiento de fabricación que estos tienen de alta temperatura.

La optimización de los parámetros del sensor de presión, se ha realizado usando simulador por elemento finito COMSOL. Los protocolos de diseño de fabricación han sido desarrollados. Las especificaciones técnicas que debe de alcanzar el sensor de presión son en el rango de presión de -14.7 a +14.7 kPa (-150 a +150 cmH₂O), voltaje de polarización de suministro de 5 V, tiempo en respuesta de 5ms y una sensibilidad de al menos de 0.10 mV/V-kPa . Este sensor puede ser usado para aplicaciones de tipo médica siempre y cuando estén dentro del rango de trabajo de presión del cuerpo humano y / o similares.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Agradecimientos

Agradecemos al CONAHCYT por otorgar el número de beca 1019302. A CIDESI y al posgrado de PICYT. A la gerencia de Microtecnología, DFA y a la DIEE. Agradecimiento a Carlos Lazcano por el apoyo y entrenamiento en el cuarto limpio. A mis asesores y al personal de microtecnologías. Agradecimiento de Victor Balderrama especialmente al CONAHCyT por el proyecto “Investigadores por México de CONAHCyT” a través del proyecto 2.

Referencias

- [1] Ahmed, M., Butler, D. P., & Celik-Butler, Z. (2012, January). MEMS absolute pressure sensor on a flexible substrate. In 2012 IEEE 25th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) (pp. 575-578). IEEE.
- [2] Ahmed, M., Butler, D. P., & Butler, Z. C. (2011, October). MEMS relative pressure sensor on flexible substrate. In SENSORS, 2011 IEEE (pp. 460-463). IEEE.
- [3] Nadvi, G. S., Butler, D. P., Çelik-Butler, Z., & Gönenli, İ. E. (2012). Micromachined force sensors using thin film nickel–chromium piezoresistors. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 22(6), 065002.
- [4] Huang, X., & Zhang, D. (2014). High sensitive and linear pressure sensor for ultra-low pressure measurement. *Procedia Engineering*, 87, 1202-1205.
- [5] Zhang, J., Zhao, Y., Ge, Y., Li, M., Yang, L., & Mao, X. (2016). Design optimization and fabrication of high-sensitivity SOI pressure sensors with high signal-to-noise ratios based on silicon nanowire piezoresistors. *Micromachines*, 7(10), 187.
- [6] Tran, A. V., Zhang, X., & Zhu, B. (2017). The development of a new piezoresistive pressure sensor for low pressures. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 65(8), 6487-6496.
- [7] Balderrama, V. S., Leon-Gil, J. A., Fernández-Benavides, D. A., Ponce-Hernández, J., & Bandala-Sánchez, M. (2021). MEMS piezoresis-

ive pressure sensor based on flexible PET thin-film for applications in gaseous-environments. *IEEE Sensors Journal*, 22(3), 1939-1947.

- [8] Zhang, Y., Luo, J., Ma, B., Deng, J., Cui, W., Liang, X., ... & Wang, X. (2024). High Sensitivity Pressure Sensor Using Tandem Wheatstone Bridge for Low Pressures. *IEEE Sensors Journal*.

DESARROLLO DEL MODELO NUMÉRICO DE ELEMENTO FINITO PARA LA SIMULACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA Y MICROESTRUCTURA EN ACEROS

Fidel Martínez-Olvera^{a*}, José Julián III Montes- Rodríguez^a, Esperanza Rodríguez-Morales^b, Eduardo Macías-Ávila^c

^aCentro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, CIDESI, Av. Playa pie de la cuesta 702, 76125, Querétaro, Querétaro, México.

^bTecnológico Nacional de México, Av. Tecnológico, 76000, Querétaro, Querétaro, México.

^cCentro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI NL), Alianza sur 203, 66629, Apodaca, Nuevo León, México.

* Autor de correspondencia:

Fidel Martínez Olvera,

CIDESI, Santiago de Querétaro, Querétaro, México.

fidelmartinez@cidesi.edu.mx

Resumen

Este estudio se centra en el desarrollo de un modelo más completo, respecto de los que han sido publicados, para simular la transferencia de calor y porcentaje de fases en aceros, por el método numérico del elemento finito, para predecir la evolución de la temperatura y microestructura. La mayoría de los modelos son omisos respecto de detalles que se han validado por otros autores, por lo tanto, se describen los fenómenos de transferencia de calor y evolución de microestructura por medio de ecuaciones matemáticas, discretizadas en el dominio de cálculo, e implementación de estas ecuaciones algebraicas obtenidas en un lenguaje de programación, finalmente la validación experimentalmente del modelo desarrollado, para asegurarse de que produce resultados exactos y confiables. Se resolvieron dos problemas de temperatura en estado estacionario y transitorio, aplicando el método de Galerkin con elementos rectangulares y triangulares. Los resultados mostraron buena concordancia con ANSYS. Además, en la microestructura se corrigió la fracción volumétrica y se aplicó una fórmula para la transformación de fase inicial de ferrita obteniendo resultados similares a los del diagrama de transformación por enfriamiento continuo (*CCT*, por sus siglas en inglés) del acero 8620.

Palabras clave: elemento finito, estado estacionario y transitorio, transformación de fase, diagrama CCT.

Introducción

Algunos modelos para simular la evolución de la temperatura y microestructura en los tratamientos térmicos (Liang *et al.*, 2021; Venediktov, Nekrasov, Kuzmin, Ilyaschenko y Deneko, 2020 y Wang *et al.*, 2021) no consideran el efecto de los elementos aleantes, por ejemplo, en la difusividad del carbono. Sin embargo, (Wang, H., Wang, B., Wang, Z., Tian, y Misra, 2019) si consideran dicho efecto; no obstante, algunos autores consideraron el coeficiente de transferencia de calor por convección, h , como constante, de lo cual se sabe, por (Wang *et al.*, 2021) que está en función de la temperatura en el temple. Por otra parte, otros modelos consideran el calor latente de transformación de fase (Liang *et al.*, 2021) en la distribución de temperatura, o el fenómeno de crecimiento de grano austenítico el cual está en función de la temperatura y tiempo (Lasne, Bristiel, y Poulain, 2021). Así también, al calcular la fracción de masa al equilibrio, no se hace corrección para transformar a fracción en volumen a través de la densidad. Es decir, no hay un modelo que considere de manera integral lo validado por otros autores.

Hipótesis

Con el desarrollo de un modelo de elemento finito más detallado que los encontrados en la literatura, que calcula la distribución de temperatura y proporción de fases en una pieza de acero, se puede predecir correctamente dicha evolución de temperatura y microestructura.

Objetivo general

Desarrollar un modelo numérico de elemento finito más completo para la simulación de la evolución de la temperatura y microestructura en aceros durante algún tratamiento térmico, implementado en una aplicación computacional con su correspondiente validación experimental.

Objetivos específicos

- Representar el fenómeno de evolución de temperatura y microestructura, en un tratamiento térmico de una pieza de acero, por medio de las ecuaciones matemáticas que rigen la transferencia de calor y porción de fases microestructurales.

- Discretizar las ecuaciones que representan los fenómenos físicos, para su resolución, mediante el método numérico del elemento finito utilizando elementos rectangulares y triangulares para resolver problemas de temperatura en estado estacionario y transitorio.

- Implementar las ecuaciones algebraicas obtenidas de la discretización en un lenguaje de programación, para generar un código.

Metodología

La metodología propuesta se centró en el análisis y simulación de la evolución de temperatura y microestructura en tratamientos térmicos. El primer paso consistió en revisar en la literatura existente sobre simulación numérica en este ámbito. Este análisis permitió identificar las ecuaciones utilizadas para modelar fenómenos de transferencia de calor y evolución de microestructura, así como los métodos numéricos y las técnicas computacionales aplicadas para convertir las ecuaciones algebraicas en código. Posteriormente, se definieron las ecuaciones que rigen los procesos de transferencia de calor y evolución microestructural durante los tratamientos térmicos. Estas ecuaciones se ajustaron y complementaron con expresiones adicionales cuando fue necesario para describir dichos fenómenos. Una vez establecidas las ecuaciones, se discretizaron utilizando el método numérico de elemento finito, eligiendo el tipo de elemento más adecuado para la simulación del sistema. Esto generó un sistema de ecuaciones algebraicas que representó adecuadamente la evolución térmica. Se implementó este sistema de ecuaciones en un lenguaje de programación, desarrollando un algoritmo que resolviera el sistema y creando una aplicación computacional capaz de simular dicha evolución de la temperatura. La aplicación fue evaluada mediante simulaciones, cuyos resultados se compararon con los resultados obtenidos usando el software comercial ANSYS 2020 R1 Workbench para verificar la funcionalidad.

Además, se digitalizó en OriginPro 2017 el diagrama CCT del acero 8620, obteniendo curvas con el mejor ajuste para representar las fases y

derivar las expresiones necesarias para evaluar las velocidades de enfriamiento. Las temperaturas críticas A_{c3} y A_{c1} se identificaron utilizando ThermoCalc 2019a, y se aplicó la regla de la palanca para determinar las fracciones de fase de ferrita al equilibrio. Utilizando la ecuación de Avrami, se calculó la fracción en volumen de ferrita y se desarrolló un algoritmo en MATLAB R2023b basado en optimización por enjambre de partículas (*PSO*, por sus siglas en inglés) para minimizar el error relativo y ajustar los coeficientes en la ecuación de Avrami. Los datos del diagrama CCT se usaron como referencia experimental; se discretizaron las velocidades de enfriamiento para la transformación de la ferrita y se compararon con los valores calculados para estimar el error. Finalmente, se determinó el tamaño de grano austenítico y se verificó experimentalmente la composición química, considerando la estimación de incertidumbre en las mediciones.

Dado que el diagrama CCT corresponde a un acero 8620, se adquirió una barra de 0.0254 m de diámetro para la preparación de muestras

destinadas a la caracterización. Se determinó la composición química (Tabla 1) promedio de 5 mediciones, de acuerdo al método estándar para análisis de carbono y aceros de baja aleación por espectroscopia de emisión óptica por chispa (ASTM E45, 2017) y para las fuentes de incertidumbre se consideraron las incertidumbres de: la falta de repetibilidad del espectrómetro y no uniformidad del material, la resolución del equipo, la reproducibilidad del método y el material de referencia estándar trazable al NIST. Se reporta la incertidumbre expandida (U) con un factor de cobertura $k=2$ para un intervalo de confianza del 95.45 %, la cual fue estimada según la norma mexicana (NMX-CH-140-IMNC-2002) seguido de la evaluación de la microestructura en su condición inicial (Figura 1).

De acuerdo con las expresiones del modelo que incluyen el tamaño de grano austenítico, se llevó a cabo una prueba de oxidación bajo la norma estándar (ASTM E112, 2014), obteniendo un valor de tamaño de grano ASTM 9, resultado comparable con el diagrama CCT del acero 8620.

	C	Cr	Mn	Si	Ni	Mo
Proveedor	0.200	0.540	0.840	0.300	0.430	0.160
Experimental	0.227	0.546	0.832	0.291	0.434	0.174
U_{\pm}	0.010	0.015	0.024	0.012	0.021	0.010

Tabla 1. Composición química del acero 8620 (% masa).

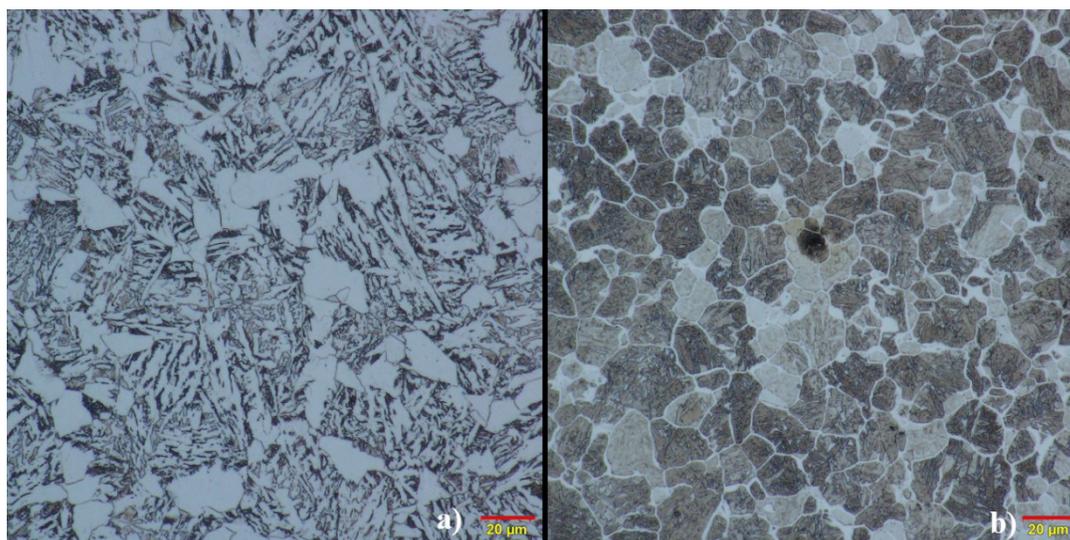


Figura 1. a) Microestructura del acero 8620 en la condición de recibido, ataque con nital al 3 % y b) Tamaño de grano austenítico por el método de oxidación, ataque con cloruro de hierro III.

Resultados y discusión

Se aplicó el método de elemento finito para discretizar la ecuación de transferencia de calor en estado estacionario y transitorio. Se utilizó el método de Galerkin para minimizar los residuos entre la solución aproximada y exacta, considerando dos tipos de elementos lineales: rectangulares y triangulares, posteriormente, se realizaron dos problemas reportados en la literatura utilizando este enfoque, y se compararon los resultados con los obtenidos mediante el paquete computacional ANSYS 2020 R1 Workbench. Los resultados demostraron una alta proximidad entre ambos resultados, lo que valida la efectividad y precisión del método de elemento finito empleado en este estudio como se muestra en la Figura 2 para la distribución de temperatura de una barra de acero.

Respecto a la evolución de la microestructura durante el tratamiento térmico, el campo de temperatura se ve afectado por el calor latente, debido al cambio de fase. Por lo tanto, es necesario evaluar la evolución de la microestructura, la cual está directamente relacionada con la velocidad de enfriamiento. En este contexto, se busca conocer cómo varía dicha microestructura, y determinar el contenido de fases presentes en función de la velocidad de enfriamiento. Para lograrlo, se inicia con la siguiente ecuación de Avrami:

$$f_i = 1 - \exp(-kt^n) \quad (1)$$

donde f_i es la fracción en volumen de la fase i , k contiene información de la velocidad de nucleación y crecimiento y n refleja el mecanismo de reacción y la dimensión de crecimiento, t es el tiempo (Pietrzyk et al., 2014).

Aplicando el método de la regla de adición, y basándose en la teoría de Scheil, se extiende esta ecuación en el campo de condiciones no isotérmicas, discretizando la curva de velocidad de enfriamiento. Por lo tanto, se empieza por determinar los valores de dichos parámetros a partir de diagramas de transformación tiempo-temperatura (*TTT*, por sus siglas en inglés) o CCT. El material utilizado es el acero SAE/AISI 8620, del cual su diagrama CCT fue digitalizado en OriginPro 2017 junto con las curvas de enfriamiento, los resultados se muestran en la Figura 3.

Para la velocidad de enfriamiento de $0.02 \text{ } ^\circ\text{C/s}$, el final de la transformación de la ferrita (F) coincide exactamente con la temperatura A_{c1} (Figura 3 b)), alcanzando un máximo del 75 % de ferrita (Figura 3 a)). Para obtener este valor, es necesario considerar la influencia de elementos aleantes que estabilizan la austenita o la ferrita, lo que desplaza las curvas A_{c3} y A_{c1} . Con ThermoCalc 2019a se hizo una combinación de elementos aleantes, y sus contenidos como se muestra en la Figura 4 para A_{c3} . La mejor aproximación se ob-

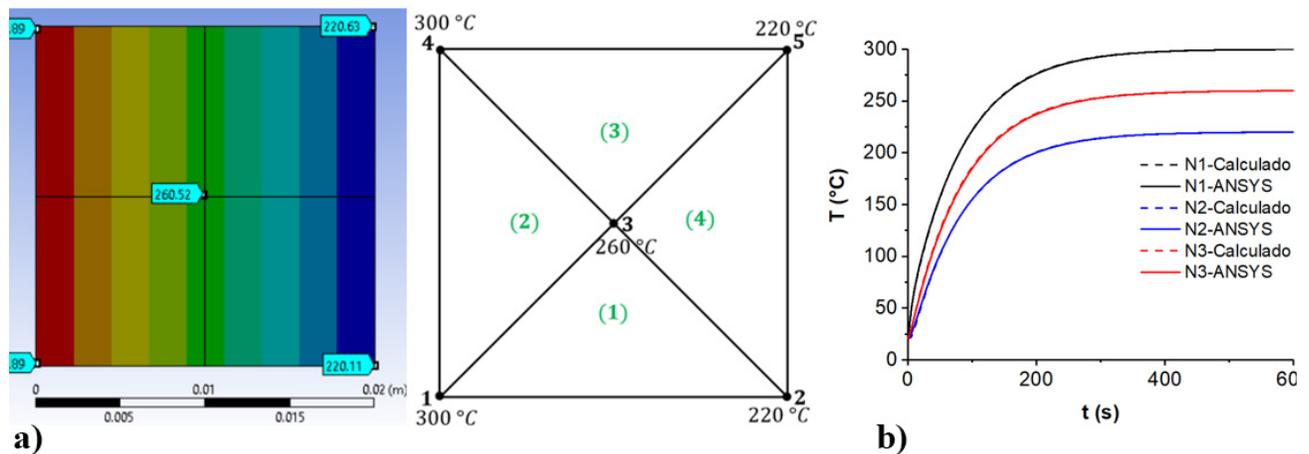


Figura 2. Comparación de resultados con ANSYS 2020 R1 Workbench a) calculados manualmente en estado estable y b) estado transitorio.

Simulación de la evolución de la temperatura y microestructura en aceros.

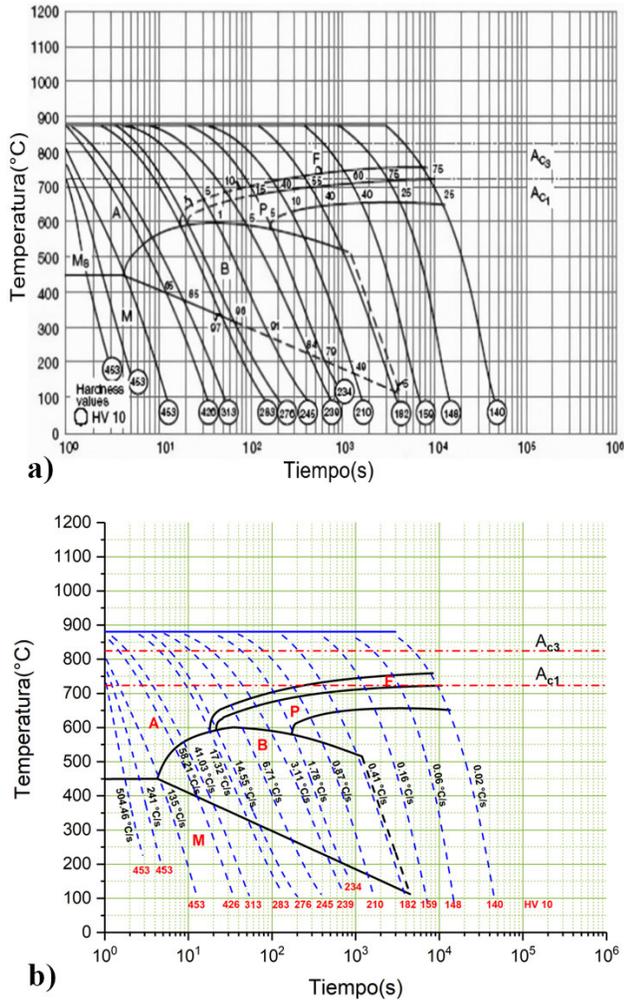


Figura 3. Diagramas CCT del acero 8620 a) tamaño de grano promedio ASTM 9 y austenizado en 880 °C (Tuğçe, 2017) y b) digitalizado de a).

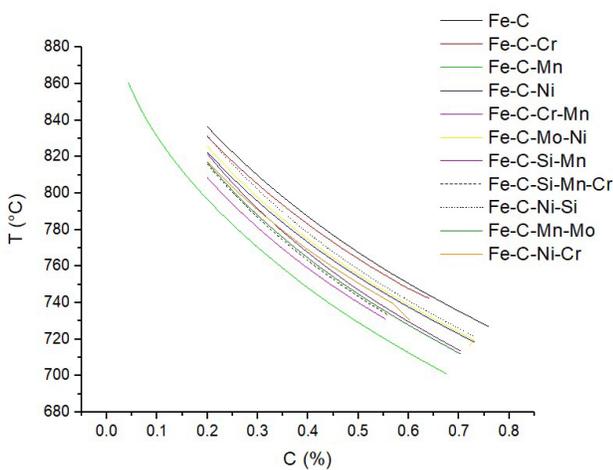


Figura 4. Temperatura A_{c3} para diferente combinación de elementos en ThermoCalc.

tuvo utilizando la curva Fe, C, Mo, Ni, que proporcionó un contenido de carbono en la austenita de 0.733742 % en masa a 722 °C (temperatura correspondiente a A_{c1}) y un contenido de carbono en la ferrita de 0.01795 % en masa a esa misma temperatura. Al sustituir estos valores en la regla de la palanca (ecuación 2), el resultado es 74.6%. Dado que los valores en la Figura 3 a) son enteros, redondeamos este resultado al porcentaje entero más cercano, que es 75%.

$$W_{\alpha} = \frac{C_{\gamma} - C_0}{C_{\gamma} - C_{\alpha}} \quad (2)$$

donde W_{α} es la fracción en masa de ferrita al equilibrio, C_{γ} y C_{α} es el contenido de carbono en austenita y ferrita respectivamente (Figura 5) y C_0 es el contenido inicial de carbono (Rauch, Bachiak, Kuziak, Kuziak y Pietrzyk, 2018).

El valor de n de la ecuación (1) se mantiene constante y el valor de k es calculado con la ecuación (3) para la ferrita, que representa una función Gaussiana.

$$k = k_{max} \exp \left[- \left(\frac{T - T_{nose}}{a_3} \right)^{a_4} \right] \quad (3)$$

donde $k_{max} = a_1 / D_{\gamma}$, $T_{nose} = A_{c3} + (400 / D_{\gamma}) - a_2$ y D_{γ} es el tamaño de grano austenítico (Rauch *et al.*, 2018). Para identificar el valor de los coeficientes ($a_1 - a_4$) se creó un algoritmo de optimización

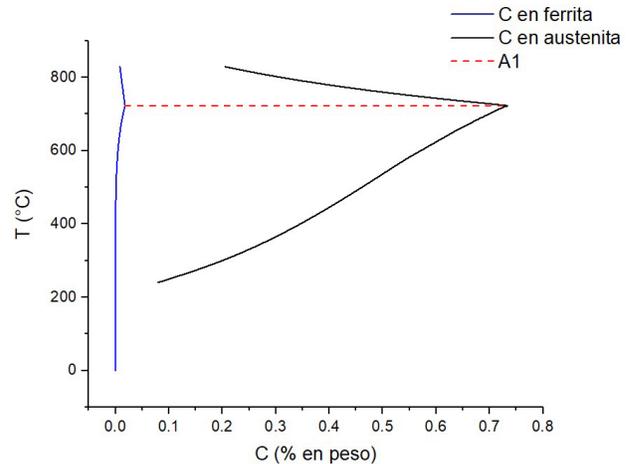


Figura 5. Contenido de carbono en ferrita y austenita para un acero 8620.

(PSO) de la función objetivo, y se programó en MATLAB, en donde se busca minimizar el error relativo. En el algoritmo, se utilizaron 100 partículas en la población, con un máximo de 500 iteraciones. Las aceleraciones 1 y 2 fueron establecidas en 1.49445. Esta información se basa en el estudio de (Bachniak, Rauch, Pietrzyk y Kusiak, 2017).

En el caso de las transformaciones de fase, los métodos de optimización convencionales son casi imposibles de aplicar. Además, las acciones manuales durante los cálculos son muy lentas, requieren experiencia y un profundo conocimiento del problema. Bachniak et al. (2017) compararon varios algoritmos inspirados en la naturaleza y encontraron que el PSO ofrecía la mayor eficiencia. Por esta razón, se eligió el PSO para realizar la optimización de manera más efectiva.

Para validar el modelo se discretizaron las velocidades de enfriamiento del diagrama CCT, los resultados se presentan en la siguiente tabla.

En velocidades de enfriamiento de 0.41 y 0.87

°C/s	0.02	0.06	0.16	0.41	0.87	1.78	3.11	6.71
%fase-CCT	75	75	60	55	40	15	10	5
%fase-Calc.	74.1	73.8	60.9	37.9	24.9	15.8	13.4	7.5
Error	0.9	1.2	0.9	17.1	15.1	0.8	3.4	2.5

Tabla 2. Resultados obtenidos de la discretización de las diferentes velocidades de enfriamiento °C/s en la ferrita.

°C/s, se observa un error superior al 10%. Este error se debe a que los diagramas CCT representan una regresión de puntos experimentales que define las fronteras de las fases.

Las ventajas de este método en comparación con los métodos previamente reportados son las siguientes:

- Tiempo de incubación de la ferrita: La literatura suele indicar que este tiempo comienza cuando se alcanza el 5% de transformación. Sin embargo, el algoritmo PSO incorpora una ecuación.
- Corrección del porcentaje en masa a volumen: El método ajusta este porcentaje teniendo en cuenta la densidad de las fases de ferrita y perlita.

- Consideración del tamaño del grano austenítico: El tamaño del grano austenítico es un factor incluido en el análisis.

Conclusiones

Estos resultados respaldan la utilidad del método de elemento finito en la simulación de problemas de transferencia de calor, tanto en estado estacionario como transitorio. Los resultados cercanos obtenidos entre la solución aproximada y los reportados en la literatura, y con el paquete computacional ANSYS, indican que el método de elemento finito utilizado es una herramienta confiable para el análisis y la predicción de fenómenos térmicos.

Este estudio proporciona una base sólida para la implementación de estas ecuaciones en un lenguaje de programación, y para el desarrollo de aplicaciones del método de elemento finito en la simulación de problemas de transferencia de calor, permitiendo un mayor entendimiento de estos fenómenos y brindando una herramienta precisa para el diseño y optimización de sistemas térmicos.

Además, el algoritmo PSO es una herramienta útil en la optimización e identificación de parámetros para la determinación de la evolución de la microestructura en aceros.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por su invaluable y generoso respaldo financiero que es fundamental para llevar a cabo este proyecto con éxito.

Referencias

ASTM International E112. (2014). Standard test methods for determining average grain size. U.S.

ASTM International E415. (2017). Analysis of carbon and low-alloy steel by spark atomic emission spectrometry. U.S.

Bachniak, D., Rauch, L., Pietrzyk, M., y Kusiak, J. (2017). Selection of the optimization method for identification of phase transformation models for steels. *Materials and Manufacturing Processes*. DOI: 10.1080/10426914.2017.1292035

Batalha, G. F., Van Tyne, C. J., y Yilbas, B. (2014). Thermal engineering of steel systems. *Comprehensive materials processing*. 12.

Hetnarski, R. B. (2014). *Encyclopedia of thermal stresses*. Media Dordrecht: Springer Science+Business.

Lasne, P., Bristiel, P., y Poulain, N. (2021). Numerical simulation of full carburizing process of an automotive gear. *Heat Treat 2021: Proceedings of the 31st ASM Heat Treating Society Conference (71-75)*. St. Louis, Missouri. DOI: 10.31399/asm.cp.ht2021exabp0071

Liang, R., Wang, Z., Yang, S., y Chen, W. (2021). Study on hardness prediction and parameter optimization for carburizing and quenching: an approach based on FEM, ANN and GA. *Materials Research Express*, 8, 1-13.

McNamara, K., Ji, Y., Lia, F., Promopattum, P., Yao, S.-C., Zhou, H., Wang, Y., Chen, L.-Q., y Martukanitz, R. P. (2022). Predicting phase transformation kinetics during metal additive manufacturing using non-isothermal Johnson-Mehl-Avrami models: Application to Inconel 718 and Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing*, 49 (102478).

NMX-CH-140-IMNC-2002, Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones.

Pietrzyk, M., Kusiak, J., Kuziak, R., Madej, Ł., Szeliga, D., y Goła, R. (2014). Conventional and multiscale modeling of microstructure evolution during laminar cooling of DP steel strips. *Metallurgical and materials transactions A*, 45, 5835-5851.

Rauch, Ł., Bachniak, D., Kuziak, R., Kusiak, J., y Pietrzyk, M. (2018). Problem of identification of phase transformation models used in simulations of steels processing. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(11), 5725-5735.

Tuğçe, K. (2017). Determination of residual

stress state in SAE/AISI 8620 carburized steel by non-destructive testing methods (Thesis of master of sciences). Middle east technical university.

Venediktov, A.N., Nekrasov, R.Yu., Kuzmin, M.S., Ilyaschenko, D.P., y Deneko, M.V. (2020). Simulation of the carbon diffusion saturation gear from 15Cr2 steel in the cementation process. *Solid State Phenomena*, 303, 24-31. doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.303.24

Wang, H., Wang, B., Wang, Z., Tian, Y., y Misra, R.D.K. (2019). Optimizing the low-pressure carburizing process of 16Cr3NiWMoVNbE gear steel. *Journal of Materials Science & Technology*, 35, 1218-1227. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.02.001>

Wang, J., Yang, S., Li, J., Ju, D., Li, X., He, F., Li, H., y Chen, Y. (2021). Mathematical simulation and experimental verification of carburizing quenching process based on multi-field coupling. *Coatings*, 11(1132), 1-16. <https://doi.org/10.3390/coatings11091132>

ANÁLISIS DE MECANISMOS DE BLOQUEO EN LA ALIMENTACIÓN DE POLVOS EN EL PROCESO DE LASER METAL DEPOSITION

Arturo Tadeo Calderón-Salazar*, Ángel Iván García-Moreno, Juansethi Ibarra-Medina

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, CIDESI,
Av. Playa Pie de la Cuesta No. 702. Desarrollo San Pablo, 7,
Santiago de Querétaro, Querétaro, México.

* Autor de correspondencia:

Arturo Tadeo Calderón Salazar
CIDESI, Santiago de Querétaro, Querétaro, México.
a.salazar@posgrado.cidesi.edu.mx

Resumen

El Depósito de Metales por Láser (LMD, Laser Metal Deposition), es una técnica de manufactura aditiva, para el recubrimiento, reparación de componentes de alto valor, así como la fabricación de componentes tridimensionales. En este proceso, un continuo y estable flujo de partículas de polvo, es fundamental para lograr depósitos con calidad. Sin embargo, bajo ciertas condiciones, el avance de las partículas de polvo puede ser bloqueado o inhibido, lo cual puede generar defectos notorios en el depósito. Algunos autores han identificado bloqueos en el flujo de polvo que afectan negativamente la calidad de las piezas. Aunque diversas formas de bloqueo han sido observadas y documentadas, a la fecha ninguna investigación profundiza en el o los mecanismos que los originan ni en los factores o fenómenos que favorecen su ocurrencia. En el presente proyecto se pretende identificar, analizar y modelar los fenómenos y parámetros que dan origen a los mecanismos de bloqueo, mediante el uso de caracterizaciones experimentales y el modelado numérico con Fluidos Dinámicos Computacionales (CFD) utilizando el software OpenFOAM. Se pretende analizar el comportamiento del flujo de partículas y la ocurrencia de bloqueos, primero a través de una geometría simplificada y posteriormente utilizando la geometría de las boquillas coaxiales del proceso LMD. A la fecha, se ha estudiado experimentalmente la morfología de partículas de diferentes polvos metálicos mediante microscopía para evaluar su morfología, fluidez y posible formación de aglomeraciones. Este trabajo es relevante, ya que con un mayor entendimiento de los mecanismos que bloquean el flujo de polvo metálico, se sentarán las bases para implementar mejoras en los métodos de alimentación actuales, para una mayor confiabilidad y repetibilidad en procesos aditivos de LMD.

Palabras clave: Laser Metal Deposition, Bloqueo, Polvo.

Introducción

El proceso Laser Metal Deposition (LMD) es una clase de la manufactura aditiva perteneciente a los procesos conocidos como Depósitos de Energía Dirigida (DED). Este proceso utiliza un láser como fuente de energía para fusionar partículas de polvo metálico que son depositadas por capas sobre una pieza base llamada sustrato. Estas partículas son suministradas por un alimentador de polvos, el cual con ayuda de un gas de arrastre (Argón), y a través de mangueras, las dirige hacia cabezal, cuya geometría y vías de alimentación hacen incidir el flujo de polvo en el punto focal del haz láser. Mediante la continua fusión de partículas de polvo, y el movimiento relativo entra la pieza base y el cabezal, se logra la impresión de formas. De esta manera se pueden fabricar geometrías capa por capa [1].

En la investigación de López Martínez, Aldo Augusto (2023), se realiza una comparación del flujo de partículas de polvo metálico en dos tipos diferentes de boquillas del proceso LMD. El autor logra identificar la inhibición del flujo de partículas (bloques) conforme la velocidad del gas de arrastre y el ángulo de inclinación de la boquilla aumenta (Figura 1). Esta disminución del flujo ocasiona que no se forme correctamente el cono de polvo, el cual debe incidir sobre el punto focal del haz láser, provocando problemas de calidad en los depósitos generados [2].

L. Arregui (2018) realiza un estudio de defectos y limitaciones geométricas en el cual intenta cuantificar e identificar los defectos más comunes asociados al proceso de LMD, utilizando como base la fabricación de paredes inclinadas. Manteniendo fija la potencia del láser, la velocidad del gas de arrastre y el caudal de polvo metálico se observó que, a partir de una inclinación de 45° en la boquilla, comienza a perderse la geometría

deseada debido a una disminución del flujo de polvo (mecanismo de bloqueo) y aumentando la deformación de la pared inclinada conforme el ángulo de inclinación aumenta (Figura 2). Además, parte del polvo no alcanza a solidificarse sobre la capa anterior, sino que cae y se deposita sobre el sustrato [3].

A pesar de que existen múltiples trabajos de investigación en los que se han identificado mecanismos de bloqueo en la alimentación de polvos del proceso LMD, a la fecha ninguno profundiza en el estudio y análisis de los mecanismos que dan origen a estos bloqueos, ni en los factores o fenómenos que favorecen su ocurrencia. Aquí es donde radica la importancia del presente trabajo de investigación.

Hipótesis

Con el desarrollo de un modelo CFD para representar el flujo y comportamiento de partículas metálicas micrométricas de morfología esférica en las vías de alimentación del proceso LMD se podrán identificar y comprender los fenómenos y parámetros de proceso que llevan a la generación de bloqueos o atenuación en la alimentación de polvo y transformar este conocimiento en pautas/recomendaciones que permitan prevenir o minimizar su ocurrencia.

Objetivo general

Identificar, analizar, y modelar los fenómenos que ocasionan que se presenten mecanismos de bloqueo en la alimentación de polvo del proceso LMD mediante el desarrollo de un modelo numérico CFD en el software openFOAM.

Objetivos específicos

1. Identificar y analizar de forma teórica y experimental los mecanismos de bloqueo que se presentan en la alimentación de polvos del proceso LMD.



Figura 1. Geometría del cono de polvo con una inclinación de boquilla de 45° y, a) velocidad de polvo 78.19 g/min, b) velocidad de polvo 90.69 g/min y c) ángulo de 90° y velocidad de polvo 102.02 g/min.



Figura 2. Paredes inclinadas a 70°,50°,45° y 40° con cuatro cordones por capa y el cabezal perpendicular al material basel.

2. Desarrollar un modelo numérico CFD para la alimentación de polvos en el proceso LMD en OpenFOAM, que implemente los modelos gobernantes de los mecanismos de bloqueo que se presentan en las boquillas coaxiales.

3. Analizar el efecto de características clave de alimentación de polvo en la ocurrencia y comportamiento de los mecanismos de bloqueo.

4. Validar el modelo CFD generado comparando los resultados obtenidos en la simulación con los obtenidos experimentalmente.

Marco teórico

Los materiales granulares, compuestos de partículas microscópicas, exhiben un comportamiento fascinante y complejo, debido a que dicho comportamiento no corresponde ni al de los sólidos, ni al de los líquidos, ni al de los gases, sino a una combinación de todos ellos, lo que hace difícil describirlo y, por tanto, predecirlo. Desde polvos y granos hasta arenas y suelos, los materiales granulares están presentes en la naturaleza y en la industria, por lo que comprender su dinámica es crucial [4].

En el estudio del flujo de polvos, un fenómeno identificado es la obstrucción, en el que se interrumpe el movimiento continuo de las partículas a través de un espacio confinado, lo que lleva a la formación de bloqueos. Los mecanismos detrás de la obstrucción implican interacciones físico químicas complejas entre las propiedades de las partículas, las condiciones ambientales y la geometría del conducto por el que se desplazan [5].

Es relevante hacer mención que no existe literatura

sobre mecanismos de bloqueo en manufactura aditiva LMD, por lo que se ha realizado una revisión del estado del arte en otras áreas del conocimiento, para establecer una base teórica que permita abordar el problema ocuriente en LMD.

Considerando lo anterior, de acuerdo a la literatura existen tres mecanismos bien identificados que pueden provocar obstrucciones:

1. Agregación de partículas: ocurre cuando las partículas se desplazan y bloquean continuamente un canal. Las partículas que están muy próximas se atraen entre sí, lo que da como resultado la formación de grumos (Figura 3a). Estos obstruyen la entrada del canal, lo que provoca su bloqueo [6].

2. Tamizado (sieving): ocurre cuando el tamaño de las partículas es significativamente mayor que el ancho del canal (Figura 3b). En este caso, las propias partículas actúan como una barrera física, impidiendo el flujo y provocando obstrucciones [7].

3. Formación de puentes (Bridging): ocurre cuando el tamaño de las partículas es menor que las dimensiones del canal (Figura 3c). A diferencia de la agregación, la formación de puentes implica la formación de una obstrucción con un número menor de partículas [8].

En el caso de la agregación de partículas y el bridging, las características del flujo pueden influir en el proceso de obstrucción [10].

En el estado del arte actual se han identificado algunas fuerzas que interactúan entre sí al momento de presentarse un mecanismo de obstrucción. Estas fuerzas son: la Fuerza fluido-partícula (FH), la Fuerza partícula-partícula (Fpp) y la

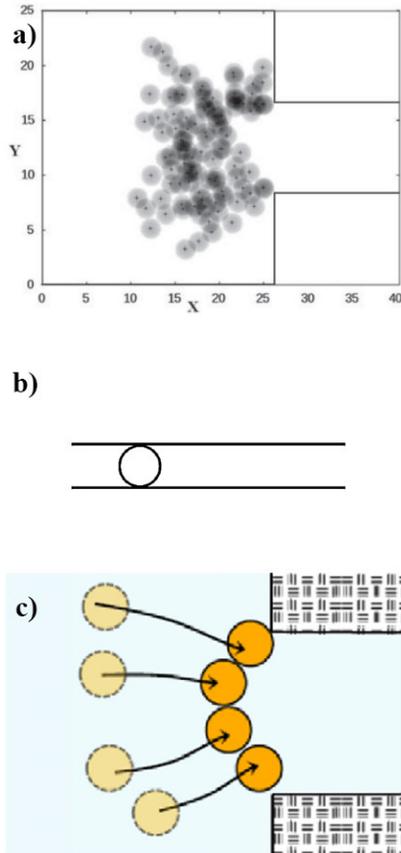


Figura 3a): Aglomeración de 100 partículas en ausencia de fuerzas de repulsión [9], Figura 3b): Bloqueo de canal debido a una partícula de mayor diámetro que el diámetro del canal [7], Figura 3c): Bridging hidrodinámico debido a un transporte coloidal [10].

Fuerza partícula-pared (F_{pw}). Si la Fuerza fluido-partícula es lo suficientemente fuerte para superar a las otras dos fuerzas, la obstrucción puede ser evitada. Sin embargo, si la fuerza del flujo no es capaz de romper la unión entre partículas y/o entre partículas y paredes entonces se empieza a presentar un mecanismo de obstrucción [11].

Es importante reconocer que en un mecanismo de obstrucción se puede presentar una combinación de depósito, resuspensión y agrupación de partículas. El depósito de partículas ocurre cuando la Fuerza fluido-partícula mueve una partícula cerca de una pared, lo que ocasiona la unión de la partícula con la pared. Si la unión de las partículas a la pared no es lo suficientemente fuerte para resistir la fuerza del flujo, se produce una resuspensión. Entre estos mecanismos, se ha

identificado la agrupación de partículas como la causa principal de obstrucciones. Investigaciones anteriores han demostrado que el depósito de una sola partícula puede dar origen a múltiples grumos, lo que conlleva a la obstrucción y a un posible bloqueo [11].

Aunque se pueden realizar estudios experimentales para identificar el comportamiento de las micro partículas, su flujo y sus interacciones, esto puede resultar muy desafiante y costoso. Las simulaciones numéricas proporcionan una alternativa eficaz y relativamente económica para estudiar los mecanismos de bloqueo. Se ha identificado que en múltiples investigaciones se consideran las fuerzas fisicoquímicas para realizar sus simulaciones. El principal fenómeno fisicoquímico que se considera es la teoría de Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek (DLVO), que incluye fuerzas atractivas de Van Der Waals y fuerzas repulsivas electrostáticas de doble capa para partículas menores a 100 micras [12].

Las ecuaciones gobernantes que permiten describir el movimiento de partículas por medio del Método de Elemento Discreto (DEM) han sido identificadas en la literatura. El DEM permite simular el movimiento de partículas individuales y las fuerzas que actúan entre ellas. En este método, cada partícula en el dominio computacional puede experimentar un movimiento de traslación y/o rotación. El DEM calcula el intercambio de momento y energía entre partículas durante las colisiones. Además, también se consideran las fuerzas sin contacto, que no implican un contacto directo entre partículas. Después de calcular las fuerzas entre partículas en cada paso de tiempo, el DEM determina el movimiento de cada partícula aplicando las leyes de movimiento de Newton para calcular sus trayectorias [13].

A continuación, se muestran las ecuaciones de movimiento para las interacciones entre partículas y entre partículas y paredes. Estas ecuaciones rigen el comportamiento de las partículas y su respuesta a fuerzas externas.

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = f_i^{p-p} + f_i^{f-p} + f_i^g \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_j T_{ij} + T^{f-p} \quad (2)$$

En donde la ecuación (1) muestra el movimiento transicional de la partícula i con una masa m_i y una velocidad transicional v_i . Además, las interacciones partícula-partícula y/o pared de la partícula sobre la partícula i se definen como (f_i^{p-p}). El efecto de la existencia del fluido y la gravedad también se consideran en la fuerza fluido-partícula (f_i^{f-p}) y la fuerza gravitacional (f_i^g), respectivamente. En la ecuación (2), se presenta el movimiento rotacional de la partícula i cuando tiene una colisión con la partícula j , donde, I_i y ω_i son la inercia rotacional y la velocidad, respectivamente. T_{ij} es el torque que actúa sobre la partícula i debido a su colisión con las paredes y/o la partícula j , y T^{f-p} es el torque que es causado por el fluido.

Metodología

Este trabajo está dividido en 3 etapas de desarrollo. En la primera etapa está considerada la investigación del estado del arte y del marco teórico que dan sustento al trabajo. También se llevará a cabo el análisis y la identificación teórica y experimental de los mecanismos de bloqueos que se presentan en el proceso LMD. Esta es la etapa actual del trabajo. En la segunda etapa se considera el desarrollo de un primer modelo CFD, mediante el uso de una geometría simplificada, que permita modelar y simular los mecanismos de bloqueo identificados en la primera etapa. Por último, en la tercera etapa se pretende desarrollar un modelo y simulación CFD utilizando la geometría de la boquilla que se utiliza en la celda LMD del laboratorio de manufactura aditiva. Esto permitirá realizar un análisis del efecto que tienen las características y parámetros clave del proceso de alimentación de polvos en la ocurrencia y comportamiento de los mecanismos de bloqueo.

De acuerdo al estado del arte, las fuerzas interpartículas debidas al fenómeno DLVO, en especial las fuerzas de Van Der Waals juegan un rol

muy importante en los mecanismos de obstrucción y bloqueo en partículas menores a 100 micras.

Debido a esto es necesario conocer la morfología de las partículas de diferentes polvos metálicos utilizados en el proceso LMD, así como su tamaño o diámetro, para saber si se encuentran dentro del rango en el que teóricamente las fuerzas de Van Der Waals tienen influencia o si pueden ser ignoradas en el desarrollo del modelo.

Para la caracterización de polvos metálicos se utilizó un microscopio digital confocal modelo DSX-510 de la marca Olympus con zoom óptico de 13x y el software Olympus DSX 3.1.10. Además, se utilizaron lentes objetivo MPLFLN-BD 5x, 10x y 20x.

Los polvos a los que se les realizó este estudio son el acero inoxidable 316L (Figura 4a), acero inoxidable 420 (Figura 4b), aluminio 1000 (Figura 4c), aleación WOKA-3702 (Figura 5a), acero Maraging (Figura 5b), aluminio 5083 (Figura 5c).

Para la microscopía y toma de mediciones se colocó una pequeña cantidad de polvo metálico sobre una cinta adhesiva, la cual ayudó a man-

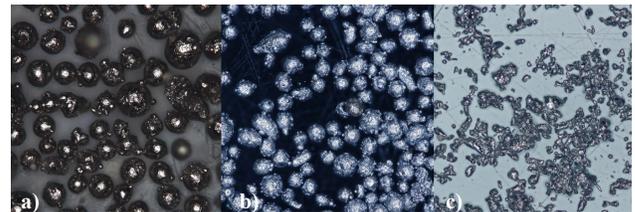


Figura 4a): Partículas de acero inoxidable 316L con lente objetivo 20x y zoom óptico 13x, Figura 4b): Partículas de acero inoxidable 420 con lente objetivo 5x y zoom óptico 13x, Figura 4c): Partículas de aluminio 1000 con lente objetivo 10x y zoom óptico 13x.

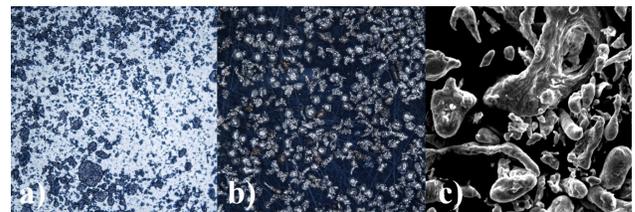


Figura 5a): Partículas de aleación WOKA-3702 con lente objetivo 10x y zoom óptico 13x, Figura 5b): Partículas de acero Maraging con lente objetivo 20x y zoom óptico 13x, Figura 4c): Partículas de aluminio 5083 con microscopio electrónico de barrido.

tener el polvo fijo y así evitar movimientos o desplazamientos involuntarios de las partículas. Dicha cinta se colocó sobre una placa de Petri y se realizaron diversos enfoques y aplicación de filtros para obtener imágenes con la mayor nitidez posible. Los filtros aplicados se seleccionaron de manera que permitieran mantener el color real de las partículas y se buscaron enfoques que permitieran observar detalles en la superficie de las mismas. Los datos obtenidos se encuentran en la Tabla 1.

Posteriormente se realizó un análisis de fluidez de algunos polvos metálicos, utilizando un caudalímetro de embudo Hall (Hall Flowmeter Funnel), el cual se muestra en la Figura 6. Estas mediciones se realizaron bajo el “método estático de flujo” de acuerdo con el procedimiento establecido por la norma ASTM B213-17.

De acuerdo a la Norma ASTM B213-17, el cálculo de la fluidez de polvos (FRH, Flow Rate Hall) se realiza considerando el factor de corrección que se localiza en el embudo utilizado. En este caso dicho factor tiene un valor de $F = 0.835$. Por lo tanto, la determinación de FRH se obtiene multiplicando el factor (F) por el tiempo de medición (t) y se reporta como $FRH = t \text{ s}/50 \text{ g}$. Este valor indica el tiempo que tarda una masa estándar de 50 g de polvo a través del dispositivo cónico estandarizado. Se realizaron 5 mediciones de fluidez cronometrando la caída de cada polvo y se reporta el índice obtenido en la Tabla 2.

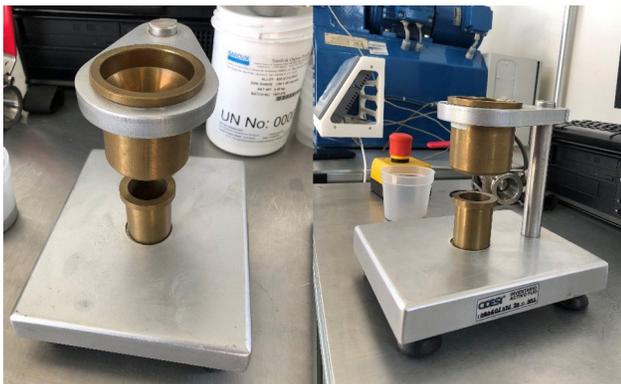


Figura 6. Caudalímetro de embudo Hall utilizado en las mediciones de fluidez.

Resultados y discusión

En la Tabla 1 se muestran las mediciones tomadas en la microscopía de partículas y los índices de fluidez en la Tabla 2.

De acuerdo a los datos obtenidos en la microscopía de polvos (Tabla 1) se considera que para la fase de simulación se deberá utilizar un modelo matemático que permita trabajar con morfología de partículas tanto esférica como no esférica. Esto para poder comprobar si la morfología tiene alguna influencia en la presencia de mecanismos de bloqueo.

Material	Datos del fabricante		Datos experimentales	
	Morfología	Tamaño (µm)	Morfología	Tamaño (µm)
SS 316L	Esférica	40 -90	Semi esférica	47 - 147
SS 420	Esférica	45 -150	Semi esférica	38 - 153
Aluminio 1000	No indicado	No indicado	No esférica	3.2 - 271
WOKA-3702	No indicado	15 - 45	No esférica	2 - 205
Maraging	Esférica	40 - 90	Semi esférica	70 - 162

Tabla 1 Comparación de datos experimentales obtenidos mediante microscopia vs datos del fabricante.

Polvo	t (s) promedio	Desv. Est.	FR _H (s/50 g)
Diamalloy 1008 316L	18.68	0.17	18.51
Metco 450NS	22.56	0.13	22.35
Stainless 18	35.17	0.23	34.85
SS 420	21.38	0.25	17.85
Aluminio 1000	22.34	0.14	18.65
Aluminio 5083	No fluye		

Tabla 2 Mediciones de fluidez de polvos metálicos.

Del mismo modo se pudo observar que entre los diferentes polvos utilizados existen partículas menores a 100 µm. Además, el tamaño de las partículas más grandes observadas se encuentra muy por debajo del diámetro más pequeño de las vías de transporte [14].

Al realizar las mediciones de fluidez de los diferentes polvos se pudo observar que posiblemente la morfología de las partículas si tiene influencia en el rango de flujo del material. También se pudo apreciar que la densidad aparente del material y la compactación del polvo pueden afectar dicho rango. En el caso de la compactación de polvos

también se pudo observar de manera experimental que favorece la presencia de mecanismos de bloqueo (Figura 7a).

También se observó durante esta prueba la acumulación de partículas en estado estático del polvo, antes de colocarlo sobre el embudo del caudalímetro (Figura 7b).

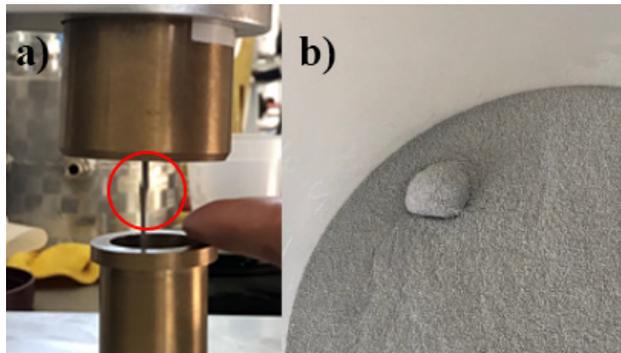


Figura 7a): Observación experimental de interrupción del flujo de polvo por compactación de polvo de SS 316L, Figura 7b): Acumulación de partículas (grumo) de aluminio 5083 observada durante la medición de fluidez del material.

Conclusiones

Este trabajo se enfoca en el análisis de los mecanismos que generan bloqueos u obstrucciones en el flujo de polvo en procesos LMD.

Los bloqueos de flujo de polvo en LMD, pueden llevar a defectos notorios en los depósitos generados por este proceso, lo cual afecta de manera negativa la calidad de las piezas fabricadas.

Para este trabajo de investigación el mecanismo de bloqueo de Tamizado puede ser descartado debido a que el tamaño de las partículas de los polvos analizados es de un orden mucho menor al ancho de los canales por donde son transportadas. Por lo que el siguiente paso será identificar mediante experimentación si los mecanismos de agregación de partículas y puenteo ocurren durante el proceso de alimentación de polvo.

De acuerdo a los diámetros y longitudes obtenidas en la medición de partículas se puede observar que existe presencia de partículas por debajo de las 100 micras, por lo que es necesario estudiar si las fuerzas de Van Der Waals tienen

alguna influencia en los mecanismos de bloqueo del proceso LMD.

Por último, se ha logrado identificar que los polvos de morfología esférica o semi esférica fluyen mejor que los polvos de morfología no esférica de acuerdo al análisis de fluidez mostrado en la tabla 2. También se observó que la densidad aparente del material (mientras sea mayor) y la compactación de polvos favorecen la presencia de mecanismos de bloqueo.

Este trabajo es relevante debido a que, a la fecha, no existe ningún trabajo de investigación que profundice en el estudio y análisis de los mecanismos, fenómenos y parámetros de proceso que favorecen la ocurrencia de bloqueo en la alimentación de polvos del proceso LMD. Por lo que a través de este trabajo de investigación se pretende sentar las bases para la implementación de mejoras en la alimentación de polvos del proceso LMD, como por ejemplo la identificación de los parámetros de proceso más adecuados para evitar o disminuir la presencia de mecanismos de bloqueo o también podría derivar en la propuesta de mejoras en el diseño y fabricación de las boquillas del proceso LMD.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Agradecimientos

Agradecemos al Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial por brindar el acceso a los laboratorios y proporcionar el material necesario para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Referencias

- [1] Mahamood, R. M. (2017). *Laser Metal Deposition Process of Metals, Alloys, and Composite Materials*. Springer. pp. 4-5.
- [2] López-Martínez, A., Ibarra-Medina, J., García-Moreno, A., Piedra, S., Del Llano Vizcaya, L., Martínez-Franco, E., & Megahed, M. (2023). Modeling and comparison of the powder flow

dynamics for tilted annular and discrete-outlet nozzles in laser directed energy deposition. *Journal Of Manufacturing Processes*, 99, 687-704. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.05.039>

[3] Cundall, P.A., Strack, O.D.L.L., 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique* 29, 47–65. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>.

[4] Tahmasebi, P. (2019). An optimization-based approach for modeling of complex particles. *Powder Technology*, 356, 342-352. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.08.027>

[5] Hosseini, M. A., & Tahmasebi, P. (2024). Particle deposition and clogging as an Obstacle and Opportunity for sustainable energy. *Journal Of Cleaner Production*, 446, 141312. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141312>

[6] Giglia, S., & Straeffler, G. (2012). Combined mechanism fouling model and method for optimization of series microfiltration performance. *Journal Of Membrane Science*, 417-418, 144-153. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.06.026>

[7] Berthet, H., Fermigier, M., & Lindner, A. (2014). Single fiber transport in a confined channel: Microfluidic experiments and numerical study. *Physics Of Fluids*, 25(10). <https://doi.org/10.1063/1.4823728>

[8] Sharp, K. V., & Adrian, R. J. (2005). On flow-blocking particle structures in microtubes. *Microfluidics and Nanofluidics*, 1(4), 376-380. <https://doi.org/10.1007/s10404-005-0043-x>

[9] Divoux, T., Lapeyre, V., Ravaine, V., & Manneville, S. (2015). Wall slip across the jamming transition of soft thermoresponsive particles. *Physical Review. E, Statistical, Nonlinear And Soft Matter Physics*, 92(6). <https://doi.org/10.1103/physreve.92.060301>

[10] Agbangla, G. C., Bacchin, P., & Climent, E. (2014). Collective dynamics of flowing colloids during pore clogging. *Soft Matter*, 10(33), 6303-6315. <https://doi.org/10.1039/c4sm00869c>

[11] Jeong, H. Y., Jun, S., Cheon, J., & Park, M. (2018). A review on clogging mechanisms and managements in aquifer storage and recovery (ASR) applications. *Geosciences Journal*, 22(4), 667-679. <https://doi.org/10.1007/s12303-017-0073-x>

[12] Henry, C., Minier, J., & Lefèvre, G. (2014). Towards a description of particulate fouling: From single particle deposition to clogging. *Advances In Colloid And Interface Science*, 185-186, 34-76. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2012.10.001>

[13] Dressaire, E., & Sauret, A. (2017). Clogging of microfluidic systems. *Soft Matter*, 13(1), 37-48. <https://doi.org/10.1039/c6sm01879c>

[14] Mondal, S., Wu, C.H., Sharma, M.M., 2016. Coupled CFD-DEM simulation of hydrodynamic bridging at constrictions. *Int. J. Multiphas. Flow* 84, 245–263. <https://doi.org/10.1016/J.IJMULTIPHASEFLOW.2016.05.001>.

