

**Fondo Sectorial de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación en Actividades Espaciales**

**Clave del Proyecto:** 275781

**Título:** MANUFACTURA ADITIVA DE ALEACIONES BASE HIERRO, TITANIO, ALUMINIO Y NÍQUEL PARA APLICACIONES AEROESPACIALES: COMPONENTES DE COHETES DE DESPEGUE VERTICAL



**Responsable Técnico:** Juan Manuel Alvarado Orozco

**Línea de Investigación:** Ciencia de materiales para manufactura aditiva

**Institución:** Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)

**Instituciones Participantes: (si aplica)** Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)  
Centro de Tecnología Avanzada (CIATEQ)  
Centro de Investigación y Estudios Avanzados (CINVESTAV), unidad

**Entidad Federativa:** Querétaro

**Tiempo de Ejecución:** 2.5 años

**Hallazgos importantes no contemplados en la propuesta original**

La propuesta original contemplaba principalmente el desarrollo de metodologías de fabricación de diversos materiales por manufactura aditiva, en particular los siguientes:

1. Para el material Inconel 718 (aleación de base níquel) contemplaba el uso de las técnicas Cold Spray (CS), Direct Metal Laser Sintering (DMLS) y Laser Cladding (LC) con polvo
2. Para el material Acero Maraging (aleación de base hierro) contemplaba el uso de técnicas DMLS y LC con polvo
3. Para el material Ti6Al4V (aleación de base titanio) contemplaba el uso de las técnicas DMLS y LC
4. Para el material Al5083 (aleación base aluminio) contemplaba el uso de la técnica LC

Sin embargo, durante el transcurso del proyecto y derivado de su progreso, se realizaron nuevos hallazgos relevantes en cuanto a la factibilidad de utilizar técnicas adicionales de fabricación que inicialmente no se habían considerado como viables, así como desarrollos tecnológicos adicionales. Estos hallazgos/desarrollos no contemplados se resumen como sigue:

A. Se desarrolló el proceso de fabricación del acero maraging por la técnica DMLS, adicionalmente a lo contemplado originalmente que era solamente la técnica LC. Se desarrollaron parámetros de proceso óptimo, se caracterizaron defectos y se realizaron ensayos mecánicos diversos para medir el desempeño de piezas muestra fabricadas con la nueva técnica.

B. Se logró el desarrollo de procesos de fabricación del titanio Ti6Al4V por dos técnicas alternativas a la contemplada originalmente, que era LC. Una técnica alternativa fue el desarrollo de proceso para Ti6Al4V por LC, pero con el uso de alambre en lugar de polvo. Adicionalmente, se realizó el desarrollo de proceso de fabricación por la técnica de arco eléctrico WAAM. En ambos casos de técnicas alternativas, se lograron desarrollar parámetros adecuados para la fabricación y se llevaron a cabo también diversos análisis microestructurales y mecánicos.

C. Se llevó a cabo el desarrollo de un algoritmo de monitoreo y control de temperatura del charco líquido para la técnica LC, mediante el uso de pirómetros y una cámara infraroja, lo que permitió comprender la distribución de calor y las altas tasas de enfriamiento

D. Se desarrolló un algoritmo matemático para procesar imágenes digitales de piezas preparadas metalográficamente. El algoritmo se desarrolló para realizar una rápida y acertada identificación, medición y clasificación de poros en piezas fabricadas por LC

## Logros

Se alcanzaron diversos logros que pueden agruparse ya sea como logros de investigación científica, de formación de recursos humanos o bien productos técnicos

### **Logros en Investigación científica:**

Este proyecto llevó a cabo una multitud de análisis científicos para analizar materiales, parámetros de proceso, técnicas de postproceso, análisis metalográficos y ensayos mecánicos, así como simulaciones numéricas para el análisis de fenómenos físicos. Derivado de ellos, se produjeron los siguientes artículos de investigación y divulgación:

4 artículos científicos en revistas indizadas, de los cuales se encuentran publicados y 2 en revisión

31 presentaciones en congreso, de las cuales 8 fueron presentaciones orales y 23 fueron presentaciones en póster

### **Logros en en formación de recursos humanos:**

Un nutrido grupo de estudiantes tuvo participación en este proyecto, algunos de los cuales ya han sido graduados y otros continúan en las etapas finales de sus estudios. Todos sus trabajos han sido derivados de las investigaciones de este proyecto. Se contó también con la participación de un investigador de nivel posdoctoral.

El detalle de los estudiantes involucrados se muestra a continuación:

1 Asistente de investigación nivel posdoctorado.

4 Estudiantes de doctorado

6 estudiantes de maestría

7 estudiantes de licenciatura

### **Productos técnicos:**

Se desarrolló una base de datos con información de los cuatro materiales de materia empleados y de las piezas fabricadas con los cuatro procesos de manufactura aditiva seleccionados para el proyecto, incluyendo la caracterización de polvo metálico y alambre de Ti6Al4V impresión. Por otro lado, se creó un repositorio de propiedades físicas, químicas y mecánicas entre diferentes proveedores, lo cual resulta muy útil para los procesos de modelación y simulación. Se desarrolló la metodología de fabricación con el proceso de manufactura aditiva CS, utilizando la aleación base níquel In718, incluyendo también tratamientos térmicos y ensayos mecánicos

Se desarrolló la metodología de fabricación con el proceso de manufactura aditiva DMLS, utilizando la aleación base níquel In718, incluyendo también tratamientos térmicos y ensayos mecánicos

Se desarrolló la metodología de fabricación con el proceso de manufactura aditiva LC, utilizando la aleación base níquel In718, incluyendo también tratamientos térmicos y ensayos mecánicos

Se desarrolló la metodología de fabricación con el proceso de manufactura aditiva DMLS, utilizando la aleación base hierro Maraging C300, incluyendo también tratamientos térmicos y ensayos mecánicos

Se desarrolló la metodología de fabricación con el proceso de manufactura aditiva LC, utilizando la aleación base hierro Maraging C300, incluyendo también tratamientos térmicos y ensayos mecánicos

Se probó la metodología de fabricación con el proceso de manufactura aditiva LC utilizando la aleación base aluminio Al5083, concluyendo la no factibilidad de manufactura con este material y técnica derivado de resultados obtenidos en pruebas mecánicas

Se desarrolló la metodología de fabricación con el proceso de manufactura aditiva WAAM, utilizando la aleación base titanio Ti6Al4V, incluyendo también tratamientos térmicos y ensayos mecánicos

Se desarrollaron 4 modelos termodinámicos para analizar el comportamiento micro-estructural en ciclos de calentamiento y enfriamiento de aleaciones In718 y Ti6Al4V

Se desarrolló un modelo de transferencia de calor utilizando técnicas de CFD. Se desarrolló una base de datos con las propiedades termofísicas de los substratos y polvos utilizado en los procesos CS, DMLS, LC y WAAM

## **Impacto que han tenido los resultados o que se considera que tendrán**

Este proyecto representa uno de los primeros y más exhaustivos en México en la temática disruptiva de manufactura aditiva de metales aplicada al sector espacial y aeronáutico, por lo que sus resultados representan desarrollo de conocimiento de frontera en manufactura aditiva en México.

A la fecha se han tenido ya impactos inmediatos en la generación de conocimiento en el procesamiento de materiales de alto desempeño (acero maraging, titanio Ti6Al4V, Inconel 718, aluminio Al5083) con técnicas de manufactura aditiva (DMLS, LC, CS), que se reflejan en la publicación de dos artículos científicos en revistas indexadas y dos más en proceso de revisión. El conocimiento está a disposición de la sociedad mexicana.

Adicionalmente, se ha contribuido a la sociedad con la formación de recursos humanos altamente especializados en manufactura aditiva, que incluyen 7 ingenieros titulados, 4 maestros en ciencias titulados y dos más en proceso, así como 4 candidatos a doctor en proceso.

Por otro lado, se espera que este proyecto tenga un impacto importante en el mediano y largo plazo en la industria espacial y aeronáutica de México. Esto debido a que el proyecto se enfocó en la comprensión de materiales y su fabricación por manufactura aditiva con la finalidad de demostrar la viabilidad de estas técnicas de manufactura disruptivas para la fabricación de componentes de aeronaves o cohetes de despegue vertical. Se espera que las empresas puedan asimilar estos conocimientos y desarrollar con ellos la capacidad de fabricar, por manufactura aditiva, componentes para los que México no cuenta actualmente con una base de proveedores debido al alto costo de las líneas de producción por medio de procesos de manufactura convencional. Se espera que la manufactura aditiva sea un instrumento para que México pueda desarrollar proveedores de alto valor por medio de la técnica alternativa de manufactura aditiva y con ello reducir la dependencia de la proveeduría extranjera de componentes de muy alto valor.

## **Sitios WEB o Repositorio**

En el alcance del proyecto no se generó un sitio WEB o repositorio público, sin embargo todos los productos se declararon a nivel procedimiento y se encuentran disponibles dentro de un Repositorio interno CIDESI para el Sistema de Gestión de Calidad.

## **Proyectos en los que participa o participado (Financiados o no por CONACyT)**

Proyecto de colaboración con General Electric Infrastructure Querétaro para la fabricación y caracterización de probetas de acero maraging fabricadas por DMLS, para analizar viabilidad de uso en componentes de esa compañía.

Proyecto de colaboración con ESI Group, para el desarrollo de modelos numéricos por CFD que permitan estudiar y analizar los fenómenos multi-físicos que ocurren en procesos de manufactura aditiva.

**ANEXO**  
**Fondo Sectorial de Investigación, Desarrollo Tecnológico e  
Innovación en Actividades Espaciales**

**Clave del Proyecto:**

275781

**Título:**

MANUFACTURA ADITIVA DE ALEACIONES BASE HIERRO, TITANIO, ALUMINIO Y NÍQUEL PARA APLICACIONES AEROESPACIALES: COMPONENTES DE COHETES DE DESPEGUE VERTICAL

**Equipo de trabajo**

<b>Nombre</b>	<b>Institución</b>	<b>Correo</b>
Juan Manuel Alvarado Orozco	Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)	<a href="mailto:juan.alvarado@cidesi.edu.mx">juan.alvarado@cidesi.edu.mx</a>
Jesús González Hernández	Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)	<a href="mailto:jesus.gonzalez@cidesi.edu.mx">jesus.gonzalez@cidesi.edu.mx</a>
Diego Germán Espinosa Arbeláez	Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)	<a href="mailto:diego.espinosa@cidesi.edu.mx">diego.espinosa@cidesi.edu.mx</a>
Guillermo César Mondragón Rodríguez	Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)	<a href="mailto:guillermo.mondragon@cidesi.edu.mx">guillermo.mondragon@cidesi.edu.mx</a>
Enrique Martínez Franco	Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)	<a href="mailto:enrique.martinez@cidesi.edu.mx">enrique.martinez@cidesi.edu.mx</a>
Juansethi Ibarra Medina	Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)	<a href="mailto:juansethi.ibarra@cidesi.edu.mx">juansethi.ibarra@cidesi.edu.mx</a>
Ángel Iván García Moreno	Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)	<a href="mailto:angel.garcia@cidesi.edu.mx">angel.garcia@cidesi.edu.mx</a>
Erasmo Correa Gómez	Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)	<a href="mailto:erasmocorreagomez@gmail.com">erasmocorreagomez@gmail.com</a>
Alejandra Bejarano Rincón	Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)	<a href="mailto:a.bejarano@posgrado.cidesi.edu.mx">a.bejarano@posgrado.cidesi.edu.mx</a>
Christian Félix Martínez	Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)	<a href="mailto:christian.felix@cidesi.edu.mx">christian.felix@cidesi.edu.mx</a>
Salomón Miguel Ángel Jiménez Zapata	Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)	<a href="mailto:salomon.jimenez@cidesi.edu.mx">salomon.jimenez@cidesi.edu.mx</a>
James Pérez Barrera	Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)	<a href="mailto:james.perez@cidesi.edu.mx">james.perez@cidesi.edu.mx</a>
Arturo Gómez Ortega	Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)	<a href="mailto:arturo.gomez@cidesi.edu.mx">arturo.gomez@cidesi.edu.mx</a>
Horacio Canales Siller	Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)	<a href="mailto:horacio.canales@cidesi.edu.mx">horacio.canales@cidesi.edu.mx</a>
Luis Gerardo Trápaga Martínez	Centro de Tecnología Avanzada (CIATEQ)	<a href="mailto:gerardo.trapaga@ciateq.mx">gerardo.trapaga@ciateq.mx</a>
Carlos Poblano Salas	Centro de Tecnología Avanzada (CIATEQ)	<a href="mailto:carlos.poblano@ciateq.mx">carlos.poblano@ciateq.mx</a>
Jorge Corona Castuera	Centro de Tecnología Avanzada (CIATEQ)	<a href="mailto:jcorona@ciateq.mx">jcorona@ciateq.mx</a>
Julián Pinilla	Centro de Tecnología Avanzada (CIATEQ)	<a href="mailto:juapinillabe@unal.edu.co">juapinillabe@unal.edu.co</a>
Luis Alberto Cáceres Díaz	Centro de Tecnología Avanzada (CIATEQ)	<a href="mailto:luis.caceres@ciateq.mx">luis.caceres@ciateq.mx</a>
Juan Muñoz Saldaña	Centro de Investigación y Estudios Avanzados, unidad Querétaro (CINVESTAV)	<a href="mailto:jmunoz@cinvestav.mx">jmunoz@cinvestav.mx</a>
Astrid Lorena Giraldo Betancur	Centro de Investigación y Estudios Avanzados, unidad Querétaro (CINVESTAV)	<a href="mailto:agiraldo@cinvestav.mx">agiraldo@cinvestav.mx</a>
Bárbara Moreno Murguía	Centro de Investigación y Estudios Avanzados, unidad Querétaro (CINVESTAV)	<a href="mailto:barbara.moreno@cidesi.edu.mx">barbara.moreno@cidesi.edu.mx</a>
Lorena Ivonne Pérez Andrade	Centro de Investigación y Estudios Avanzados, unidad Querétaro (CINVESTAV)	<a href="mailto:lorena.perez@cinvestav.mx">lorena.perez@cinvestav.mx</a>
Grace Vanessa de León Nope	Centro de Investigación y Estudios Avanzados, unidad Querétaro (CINVESTAV)	<a href="mailto:gvden@unal.edu.co">gvden@unal.edu.co</a>
Daniela Garcés López	Centro de Investigación y Estudios Avanzados, unidad Querétaro (CINVESTAV)	<a href="mailto:dgarcesl@unal.edu.co">dgarcesl@unal.edu.co</a>

Luis Ladinos Pizano	Centro de Investigación y Estudios Avanzados, unidad Querétaro (CINVESTAV)	<a href="mailto:luis.ladinos@cinvestav.mx">luis.ladinos@cinvestav.mx</a>
Haidée Ruiz Luna	Universidad Autónoma de Zacatecas	<a href="mailto:ruluhaid@gmail.com">ruluhaid@gmail.com</a>
Pedro Márquez Martínez	Universidad Autónoma de Zacatecas	<a href="mailto:peter_marquez_92@hotmail.com">peter_marquez_92@hotmail.com</a>
Óscar Jesús Zapata Hernández	Universidad Autónoma de Nuevo León	<a href="mailto:oscar2582@yahoo.com.mx">oscar2582@yahoo.com.mx</a>
Mario Alberto Bello Gómez	Universidad Autónoma de Nuevo León	
Nelson Federico Garza Montes de Oca	Universidad Autónoma de Nuevo León	<a href="mailto:nelson.garza@gmail.com">nelson.garza@gmail.com</a>
Francisco Aurelio Pérez González	Universidad Autónoma de Nuevo León	<a href="mailto:fco.aurelio.gzz@gmail.com">fco.aurelio.gzz@gmail.com</a>
Jennifer Treviño	Universidad Autónoma de Nuevo León	<a href="mailto:jenny_trevy17@hotmail.com">jenny_trevy17@hotmail.com</a>
Ricardo Morales Estrella	Universidad Michoana de San Nicolás de Hidalgo	<a href="mailto:rmorales@umich.mx">rmorales@umich.mx</a>
Emanuel Reyes Gordillo	Universidad Michoana de San Nicolás de Hidalgo	<a href="mailto:lemmanuel.reyesg@gmail.com">lemmanuel.reyesg@gmail.com</a>
Rafael Campillo	Universidad Aeronáutica de Querétaro	<a href="mailto:rcampilog94@gmail.com">rcampilog94@gmail.com</a>
Andrea Michaca Pérez	Universidad Aeronáutica de Querétaro	
Alberto Peñaloza Hernández	Universidad Aeronáutica de Querétaro	<a href="mailto:alberto.penaloz@cidesi.edu.mx">alberto.penaloz@cidesi.edu.mx</a>
Alejandro Amantes Cosme	Instituto Tecnológico de Orizaba	<a href="mailto:aleacosme@gmail.com">aleacosme@gmail.com</a>
Ángel Cámara	Instituto Tecnológico de Orizaba	<a href="mailto:angelcamara95@hotmail.com">angelcamara95@hotmail.com</a>
Jesús Bartolo	Instituto Tecnológico de Orizaba	<a href="mailto:JESUSBARTOLO28@gmail.com">JESUSBARTOLO28@gmail.com</a>
Edith Ramos	Universidad Juárez de Durango	<a href="mailto:edith_ramos11@hotmail.com">edith_ramos11@hotmail.com</a>

### Formación de Recursos Humanos

Nombre	Institución	Grado obtenido
Erasmus Correa Gómez	Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)	Posdoctorado
Lorena Pérez	Centro de Investigación y Estudios Avanzados, unidad Querétaro (CINVESTAV)	Doctorado. En proceso
Alejandra Bejarano	Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)	Doctorado. En proceso
Christian Félix	Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)	Doctorado. En proceso
Emmanuel Reyes	Universidad Michoana de San Nicolás de Hidalgo	Doctorado. En proceso
Grace Vanessa de León Nope	Centro de Investigación y Estudios Avanzados, unidad Querétaro (CINVESTAV)	Maestría
Daniela Garcés López	Centro de Investigación y Estudios Avanzados, unidad Querétaro (CINVESTAV)	Maestría. En proceso
Luis Ladinos Pizano	Centro de Investigación y Estudios Avanzados, unidad Querétaro (CINVESTAV)	Maestría. En proceso
Julián Pinilla	Centro de Tecnología Avanzada (CIATEQ)	Maestría. En proceso
Pedro Márquez Martínez	Universidad Autónoma de Zacatecas	Maestría
Jennifer Treviño	Universidad Autónoma de Nuevo León	Maestría
Rafael Campillo	Universidad Aeronáutica de Querétaro	Licenciatura
Andrea Michaca Pérez	Universidad Aeronáutica de Querétaro	Licenciatura
Alberto Peñaloza Hernández	Universidad Aeronáutica de Querétaro	Licenciatura
Alejandro Amantes Cosme	Instituto Tecnológico de Orizaba	Licenciatura
Ángel Cámara	Instituto Tecnológico de Orizaba	Licenciatura
Jesús Bartolo	Instituto Tecnológico de Orizaba	Licenciatura
Edith Ramos	Universidad Juárez de Durango	Licenciatura

### Infraestructura Adquirida

#### Detalle

WORKSTATION DELL MODELO T7910

Equipo de procesamiento: dos Servidores de Procesamiento XL190r Gen10.

Equipo generador de nitrógeno Marca Kaeser