

# Avances en el estudio de la aleación NCF 3015 procesada mediante manufactura aditiva

## Advances in the study of the alloy NCF 3015 processed by additive manufacturing

Presentación: 05/10/2022

Doctorando:

**Pedro Martín Lerman**MAHLE Argentina S.A., Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.  
pedro.lerman@mahle.com

Director:

**Mirco Daniel Chapetti**

Codirector:

**Roberto Oscar Lucci**

### Resumen

El presente trabajo resume los últimos avances registrados en el desarrollo de la aleación NCF 3015 para ser procesada mediante manufactura aditiva. Partiendo de una base preseleccionada de 5 sets de parámetros de impresión, se trazó como objetivo el refinamiento de los hallazgos previamente registrados. A tal fin, se profundizó el estudio de las micro fisuras resultantes del proceso de construcción como así también se dieron los primeros pasos en la caracterización mecánica mediante ensayos de tracción. Ambas actividades incluyeron cuerpos de prueba obtenidos tanto en la dirección de construcción como perpendicular a la misma, planos XZ / YZ y XY respectivamente. Además, la totalidad de las experiencias fueron sometidas a distintos ciclos de tratamiento térmico que abarcaron desde simples alivios de tensiones a procesos de solubilizado parcial y envejecido.

En líneas generales, los resultados revelan que la aleación NCF 3015 presentaría un buen comportamiento mecánico al ser procesada mediante manufactura aditiva. Sin embargo, la presencia de micro fisuras se manifiesta como una característica asociable al de las superaleaciones base níquel conocidas lo cual podría limitar considerablemente, si no se resolviera, su potencial de aplicación principalmente en condiciones de carga dinámica.

Palabras clave: NCF 3015, 30% níquel, manufactura aditiva, fusión selectiva por láser, micro fisuras.

### Abstract

The present work summarizes the advances achieved in the development of the alloy NCF 3015 to be processed by additive manufacturing. Based on previous results from five preselected printing parameters, focus was placed in the refinement of those findings. In that sense, in-deep research towards the understanding of process-related micro cracks as well as the first steps into the mechanical characterization by tensile tests were done. Specimens for such purposes

were produced in both, building and perpendicular directions, XZ / YZ and XY respectively. Additionally, the resultant combinations were subjected to different thermal treatments which ranged from simple stress relieving cycles to partial solution treatment and aging.

Results have shown promising mechanical properties of the alloy NCF 3015 after being processed by additive manufacturing. However, as same as traditional Nickel base superalloys, this material presents microcracks what would considerably limit its potential application range, unless resolved, especially in working conditions involving dynamic loading.

Keywords: NCF 3015, 30% Nickel, additive manufacturing, selective laser melting, micro cracks.

## Introducción

El desarrollo de nuevas materias primas que reduzcan los costos y faciliten el proceso de impresión es uno de los diversos pilares que apuntalan el crecimiento constante de las diversas técnicas de manufactura aditiva (Sames W. J., List F. A., Pannala S., Dehoff R. R. y Babu S. S., 2016). La amplia experiencia desarrollada en la industria automotriz presenta a la aleación NCF 3015 (Katsuaki Sato, Tsutomu Saka, Takehiro Ohno, Kagehiro Kageyama, Koji Sato, Toshiharu Noda y Michio Okabe, 1998) (Carpenter Technology Corporation, 1987) como un potencial candidato para tal fin. Con un contenido en níquel del 30%, sus excelentes propiedades termomecánicas la convierten en el material de referencia para el reemplazo, en la medida en que sea posible, de las superaleaciones base níquel tradicionales. Sin embargo, la extrapolación directa de aleaciones reconocidas en la industria de los productos forjados no asegura su éxito dentro del campo aditivo. Tal podría ser el caso del material aquí propuesto, un híbrido entre los aceros inoxidable de alta resistencia y las aleaciones base níquel con características que lo asocian a uno u el otro dependiendo de la propiedad considerada. Abarcar esta encrucijada demanda plantearse algunos interrogantes entre los cuales destaca el fenómeno de la microfisuración inherente a los materiales de alto níquel al ser consolidados por fusión selectiva por láser o de haz de electrones. Éste y otros puntos forman parte del presente trabajo.

## Desarrollo

El presente estudio tomó como punto de partida la preselección de 5 sets de parámetros de impresión sobre una base inicial de 25 experimentos. Sus condiciones de manufactura se basaron en velocidades y potencias de haz como únicas variables del proceso mientras que el resto de los parámetros de interés permanecieron constantes respecto a la licencia EOS 316L para equipamientos 290M en espesores de capa de 20  $\mu\text{m}$ . La plataforma de ensayos comprendió un rango energético entre 67 a 150 J/mm<sup>3</sup> generado a partir de valores de velocidad y potencia de 866 a 1300 mm/s y 156 a 234 W respectivamente. En lo que respecta a la elección de las mejores condiciones de impresión, se tuvieron en cuenta aspectos superficiales como nivel de cobertura, presencia de defectos, partículas atrapadas y grado de deformación como así también su caracterización microscópica en la condición de construcción abarcando características microestructurales, nivel de densificación y defectos típicos. La figura 1 muestra la matriz de experimentos generada y los resultados de esta preselección. La figura 2 presenta resultados de la caracterización microestructural mediante microscopía electrónica de barrido. Se detalla la presencia de microfisuras orientadas en el eje de construcción y segregación química en los espacios interdendríticos.

Sobre la base presentada, se fabricaron cuerpos de prueba cuyas direcciones de impresión fueron orientadas preferencialmente paralela y perpendicular al eje de construcción. La figura 3 presenta las probetas obtenidas a partir de dos ciclos de impresión.

P-20 V+20	P-10 V+20	P V+20	P+10 V+20	P+20 V+20
P-20 V+10	P-10 V+10	P V+10	P+10 V+10	P+20 V+10
P-20 V	P-10 V	<b>P V</b>	<b>P+10 V</b>	P+20 V
P-20 V-10	P-10 V-10	P V-10	P+10 V-10	P+20 V-10
P-20 V-20	P-10 V-20	P V-20	P+10 V-20	P+20 V-20

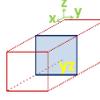


Figura 1: Selección de los 5 mejores parámetros de impresión con base en receta EOS 290 M - 316L – 20  $\mu\text{m}$ . Variables principales asociadas: potencia y velocidad del haz.

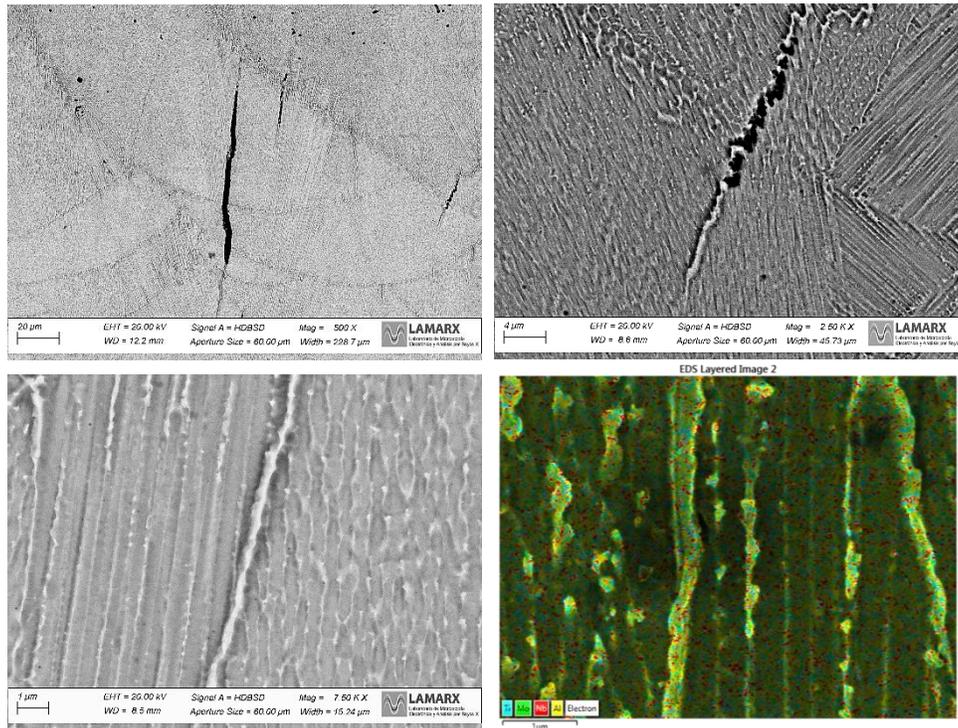


Figura 2: Caracterización microestructural mediante microscopía electrónica de barrido. Detalles de la evolución dendrítica en el eje de construcción, generación de micro fisuras de forma dominante en el choque de colonias dendríticas y presencia de segregaciones químicas en estas mismas regiones.

Los elementos aquí construidos fueron empleados para caracterización metalúrgica mediante microscopía óptica y electrónica y mecánica mediante ensayos de tracción; detalle de esto se describe en la tabla 1. A fin de mitigar la presencia de microfisuras, se decidió desacoplar los efectos tensionales generados por la placa base mediante un incremento en su temperatura de precalentamiento de 80°C a 200°C, aumentando su espesor y empleando ciclos térmicos prolongados de alivio de tensiones previo al seccionamiento y separación de las probetas.

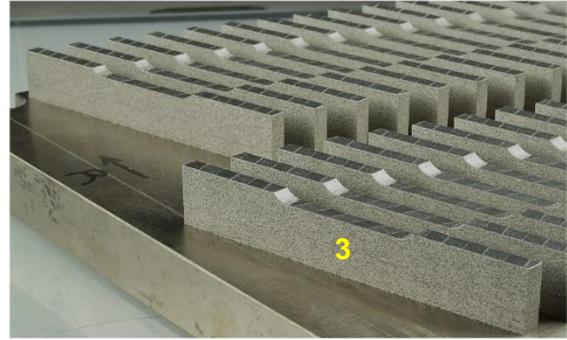
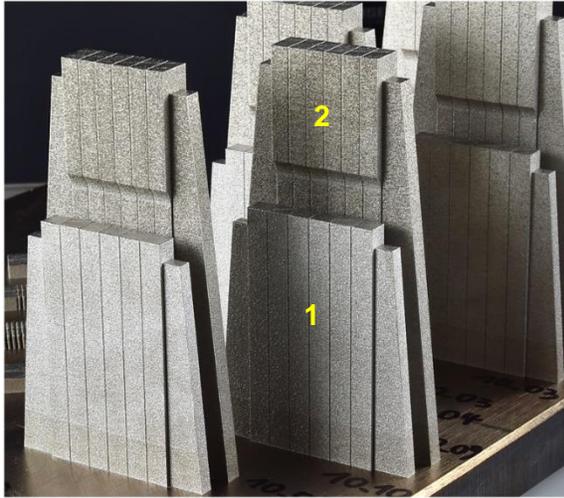


Figura 3: Cuerpos de prueba para caracterización mecánica y metalúrgica. 1. Probetas para estudios metalográficos y de respuesta a los tratamientos térmicos. 2. Probetas de tracción solidarias al eje de construcción. 3. Probetas de tracción perpendiculares al eje de construcción.

Experiencia N°	Tratamiento 1	Tratamiento 2	Tratamiento 3	Caracterización 1	Caracterización 2
1 (Z / XY)	550°C x 2 h + 630°C x 2 h, enfriamiento en horno.			Análisis metalográfico, control de dureza, caracterización de defectos.	Tensión de rotura, límite elástico, alargamiento y estricción.
2 (Z / XY)		+ 760°C x 4 h, enfriamiento al aire			
3 (Z / XY)		+ 1060°C x 1 h, enfriamiento en polímero.			
4 (Z / XY)		+ 1060°C x 1 h, enfriamiento en polímero.	+ 760°C x 4 h, enfriamiento al aire		

Tabla 1: Detalle de las experiencias realizadas durante la segunda etapa del desarrollo.

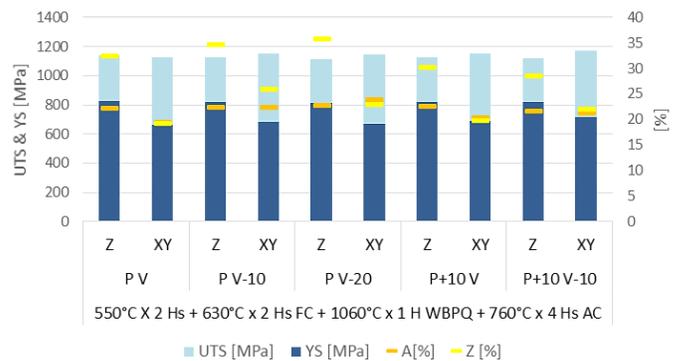
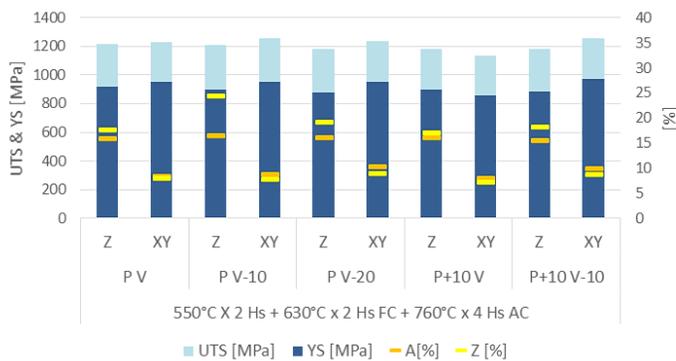


Figura 4: Caracterización mecánica, ensayos de tracción. Determinación de tensión de rotura (UTS), límite elástico (YS), alargamiento (A%) y estricción (Z) para los 5 parámetros de impresión preseleccionados, en sus dos direcciones principales de construcción (Z, X/Y) y dos combinaciones de tratamiento térmico.

En análisis microestructural evidenció la presencia de microfisuras las cuales resultaron ser independientes de las nuevas condiciones de impresión preseleccionadas. Las mismas tienen una orientación preferencialmente alineada al eje de construcción y localización dominante en la interfase generada por el choque de colonias interdendríticas con presencia de segregación de elementos de aleación. La figura 4 compila los resultados de la caracterización mecánica incluyendo tensión de rotura, límite elástico, alargamiento y estricción para los cuerpos de prueba producidos tanto en el eje vertical como horizontal en sus distintas condiciones de impresión y 2 de las secuencias de tratamiento estudiadas. Finalmente, la figura 5 ejemplifica las superficies de fractura resultantes denotando características dúctiles independientemente del eje de construcción y cualquier otra variable empleada.

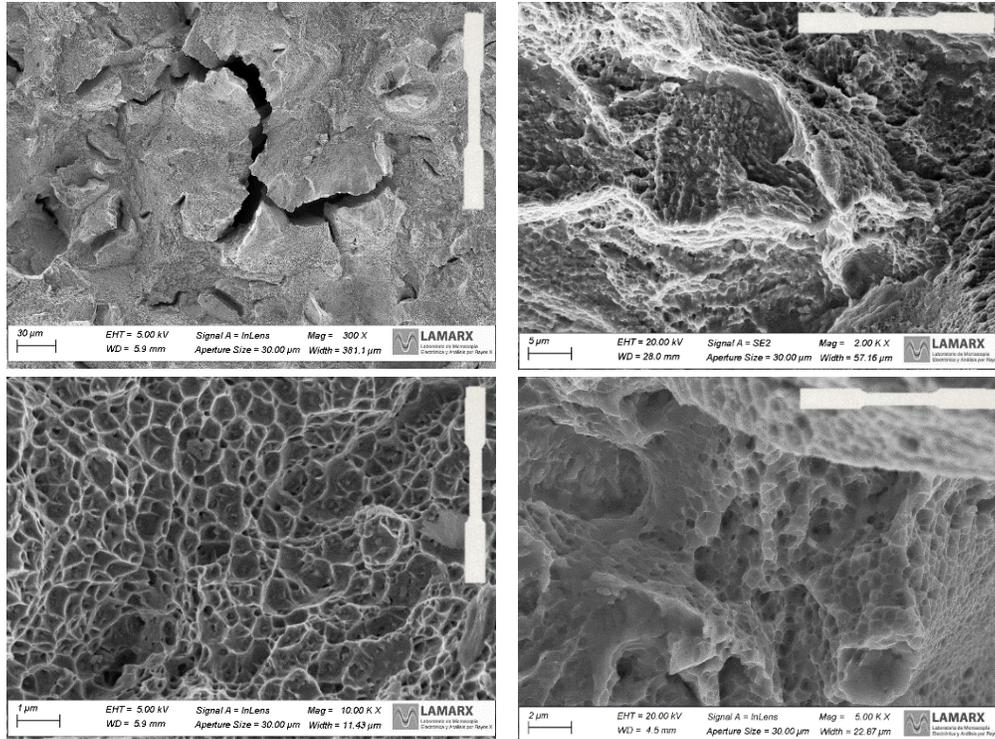


Figura 5: Fotografías representativas de las superficies de fractura generadas durante el ensayo de tracción. Se observa predominancia de mecanismos dúctiles de propagación.

## Resultados

Los avances registrados en esta etapa de la investigación destacan los siguientes resultados:

1. Independientemente de las acciones de contención aplicadas para la mitigación del fenómeno de microfisuración, la totalidad de los parámetros de impresión estudiados presentaron microfisuras preferentemente alineadas al eje de construcción "Z". El incremento en la temperatura y el espesor de la placa y la aplicación de ciclos térmicos de destensado no impactaron de manera significativa respecto a los resultados obtenidos en experiencias previas. Las fisuras avanzan a través de la interfaz generada en el choque de colonias dendríticas. Parte de esas colonias manifiestan crecimiento epitaxial abarcando algunas de ellas varios cordones fundidos. Estas regiones destacan contraste químico (segregaciones) lo cual podría estar asociado a mecanismos típicos de daño para este tipo de materiales.

2. Respecto a las propiedades mecánicas, las mismas se manifiestan estables y con aparente independencia de los parámetros de impresión empleados. Se observa buena respuesta a los ciclos de envejecimiento, especialmente bajo condiciones previas de solubilizado.
3. Sin tratamiento térmico de homogeneización, se destaca la anisotropía entre los planos vertical y horizontal en la cámara de impresión. Se observan valores de ductilidad inferiores en el plano XY (horizontal). Sin embargo, aún no pudo concluirse si este efecto se encuentra relacionado a las fisuras preexistentes en el eje Z, perpendiculares a la aplicación de la carga.

## Conclusiones

Las aleaciones de contenido intermedio en níquel como la NCF 3015 se presentan como una alternativa superadora cuando su relación costo – beneficio es analizada; costo de producción inclinado hacia los aceros de alta resistencia y propiedades termomecánicas más cercanas a las superaleaciones base níquel. El diseño de su formulación química y principios de fortalecimiento siguen la base de estas últimas y, consecuentemente, algunas particularidades adversas como lo es el daño por microfisuración también son extrapoladas hacia nuestro material de interés. El fenómeno de microfisuración en el eje de construcción Z de las aleaciones base níquel es conocido, se encuentra en continuo estudio y aún no posee acuerdo en la comunidad científica. Existen 4 mecanismos dominantes, fisuración por solidificación, fisuración por licuación, fisuración por envejecimiento y fisuración por caída de ductilidad (Froes Francis y Boyer Rodney, 2019). Nuestro caso de estudio se encuentra relacionado principalmente a los dos primeros.

Las ventajas esperadas en el empleo de aleaciones de tenor intermedio en níquel podrían resultar seriamente afectadas en caso de no lograr mitigar o al menos contener el daño por microfisuración. Este es el caso de componentes de alta performance sujetos a cargas dinámicas. Tal contención implicaría ajustes en la composición química y optimizaciones del proceso de construcción, ambas tareas fuera del alcance de esta investigación. Por el contrario, una correcta caracterización del material mediante ensayos axiales de fatiga en condiciones de temperatura ambiente y hasta 750°C por 10e7 ciclos permitiría cuantificar el impacto de estos defectos delimitando así las condiciones de contorno que definirían su campo seguro de aplicación. En esta dirección proseguirán las actividades en curso.

## Referencias

- Sames W. J., List F. A., Pannala S., Dehoff R. R. y Babu S. S. (2016). The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. <http://dx.doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649>.
- Katsuaki Sato, Tsutomu Saka, Takehiro Ohno, Kagehiro Kageyama, Koji Sato, Toshiharu Noda y Michio Okabe (1998). Development of Low-Nickel Superalloys for exhaust valves.
- Carpenter technology Corporation (1987). NCF 3015 technical data Sheet.
- Froes Francis y Boyer Rodney (2019). Additive Manufacturing for the Aerospace industry. ISBN: 978-0-12-814062-8.