

CARACTERIZACIÓN DE COMPONENTES DE ALEACIONES DE ALUMINIO OBTENIDAS POR MANUFACTURA ADITIVA MEDIANTE FUSIÓN DE CAMA DE POLVO POR LÁSER (L-PBF)

Hernán Svoboda ^{1,3}, Alejandro Miranda ¹, Adrián Dunky ², Guillermo Rubino ²

¹ GTSyCM3 – INTECIN, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Paseo Colón 850 (C1063ACV) CABA, Argentina – amiranda@fi.uba.ar.

² Instituto Nacional de Tecnología Industrial – Centro Regional Litoral Sede Rafaela, Rafaela, Argentina -

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET, Godoy Cruz 2290, Ciudad de Buenos Aires, Argentina- hsvobod@fi.uba.ar

RESUMEN

La manufactura aditiva en metales (MAM) por fusión de cama de polvo por láser (L-PBF) es una novedosa tecnología que permite la generación de componentes estructurales de geometría compleja, con buen acabado superficial y adecuado ajuste dimensional, en comparación con otras técnicas de MAM. Las propiedades mecánicas quedarán definidas por el nivel de defectos, la evolución microestructural y eventualmente otras características como las tensiones residuales. La homogeneidad e isotropía de las mismas son aspectos que suelen cuestionarse en estos productos. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el nivel de defectos, la evolución microestructural y las propiedades mecánicas en componentes de aleación de Al-Si-Mg obtenidos mediante L-PBF. A este fin se obtuvieron probetas de 80x60x5 mm empleando un equipo EOS M 290. A una de las muestras impresas se le realizó un tratamiento térmico de solubilizado y envejecido (SE). Se midió la rugosidad superficial y se extrajeron cortes transversales para caracterización macro y microestructural y determinación de perfiles de microdureza Vickers. Asimismo, se extrajeron probetas para ensayos de tracción de diferentes zonas y orientaciones. La rugosidad superficial Ra fue de 15,7 micrones. No se detectaron defectos superficiales ni internos macroscópicos. Se observó la presencia de microporosidad y otros defectos asociados a falta de fusión del polvo de escala microscópica (20-60 micrones). Cada capa presenta un ancho de unos 500 micrones y una penetración de unos 250 micrones. En la condición como impresa (AP) se analizó la estructura de solidificación y las fases presentes. La microdureza se mantuvo uniforme en la altura (93-108 HV). Los valores obtenidos de los ensayos de tracción fueron similares para las distintas posiciones y orientaciones, lo que indicaría una buena homogeneidad e isotropía en relación a estas propiedades. Para la condición SE, se eliminó la estructura de solidificación observándose una estructura uniforme. La resistencia disminuyó levemente, alcanzando una mayor ductilidad.

Palabras Clave: *Manufactura Aditiva de Metales (MAM), Aleaciones de Aluminio, Propiedades Mecánicas*

1. INTRODUCCIÓN

La manufactura aditiva (MA), en los últimos años, ha impactado fuertemente en los procesos de fabricación de componentes de diversos materiales. Para el caso de componentes metálicos es una tecnología que se encuentra en pleno desarrollo, siendo en la actualidad un tópico de gran actividad, tanto científico-tecnológica como industrial. Sin embargo, existen aún numerosos desafíos por resolver y en nuestra región es aún incipiente su aplicación. Los componentes metálicos obtenidos por manufactura aditiva (MAM) deben presentar características al menos similares a los obtenidos mediante otras técnicas de fabricación. En ciertas aplicaciones se cuestiona el desempeño de este tipo de componentes. En este sentido, a fin de consolidar el desarrollo de estas tecnologías es relevante aportar información en relación al desempeño de los componentes impresos. El nivel de defectos, las tensiones residuales, la estructura de solidificación, entre otros aspectos pueden afectar el mismo [1].

Dentro de las tecnologías disponibles para aleaciones metálicas se presentan la de Fusión de Cama de Polvo (PBF) como la más consolidada. El proceso conocido como Fusión Selectiva por Laser (SLM) es el más ampliamente utilizado habiendo mostrado excelentes resultados en relación a la complejidad geométrica que puede alcanzarse en las partes impresas, así como la calidad superficial y las tolerancias dimensionales, entre las distintas tecnologías disponibles para MAM [1].

Las aleaciones de aluminio son una familia de materiales metálicos ampliamente utilizada en MAM, siendo la aleación Al-Si-Mg la más habitual. Las condiciones de impresión pueden afectar la generación de defectos, las tensiones residuales y aspectos microestructurales y consecuentemente las propiedades mecánicas finales [2]. La aleación de Al con 10% de Si y 0,3% Mg presenta una resistencia en condición "como impresa" (AP) de alrededor de entre 350-450 MPa. En este sentido, se reporta cierto efecto de la orientación de la probeta sobre las propiedades resultantes [3,4]. Asimismo, en general puede llevar un tratamiento térmico post-impresión a fin de ajustar las propiedades mecánicas [2]. Sin embargo, son escasos los estudios sistemáticos disponibles en la literatura que aborden estos aspectos.

El objetivo del presente trabajo es analizar el nivel de defectos, las características microestructurales y las propiedades mecánicas en distintas direcciones de muestras impresas mediante el proceso SLM en aleación de Al-10Si-0,3Mg, así como evaluar el efecto del tratamiento térmico post-impresión.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

A fin de alcanzar los objetivos planteados se imprimieron muestras de aleación de Al-Si-Mg de 80x60x5 mm mediante el proceso SLM empleando un equipo EOS E290. De acuerdo a lo indicado por el fabricante la composición química del polvo es la mostrada en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química del polvo (wt%) [3].

Polvo	Si	Mg	Fe	Ti	Mn	Zn	Al
Al-10Si-Mg	9-11	0,25-0,45	0,55	0,15	0,45	0,10	Bal.

Las condiciones de impresión incluyen, entre otros aspectos, diámetros de spot 70-80 μm , espesor de capa de construcción 30 μm , ángulo de rotación de capa 67° y un ancho de recorrido "Stripe Width" de 5mm, todo en atmósfera de argón. Se utilizó el procedimiento EOS Parameter set AISi10Mg_200C [3]. Sin embargo, en el último tiempo el fabricante generó un nuevo procedimiento de impresión AISi10Mg_FlexM291 2.01 [4].

Sobre una de las muestras impresas (AP) se realizó un tratamiento térmico de solubilizado a 530°C durante 30 min seguido de un enfriamiento en agua. Luego se realizó un envejecido a 165 °C, durante 6 hs (SE) [4].

Sobre la muestra en condición AP se midió rugosidad superficial en diferentes direcciones.

De las muestras impresas en ambas condiciones AP y SE, se extrajeron cortes transversales que se prepararon metalográficamente para la caracterización macro y microestructural y medición de perfiles de microdureza. Adicionalmente, se mecanizaron probetas de tracción en diferentes posiciones (arriba, centro y abajo) y orientaciones (vertical y horizontal), para ambas condiciones AP y SE. En la Figura 1 se observa un esquema de la extracción de las muestras mencionadas.

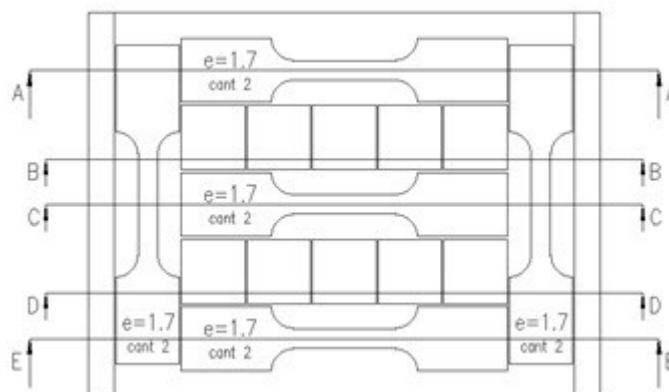


Figura 1: Esquema de extracción de muestras de probetas impresas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Rugosidad

En la Figura 2 se muestra la condición superficial de las muestras impresas. En la Tabla 2 se presentan los resultados de la medición de rugosidad (R_a) en ambas direcciones (longitudinal y transversal) junto con la dispersión determinada.

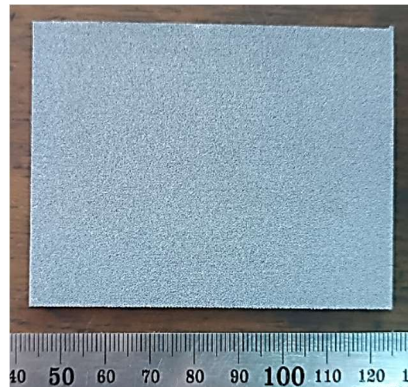


Figura 2: Condición superficial de probetas impresas.

Tabla 2. Rugosidad (R_a) en ambas direcciones medidas

R_a (μm)	
Longitudinal	Transversal
15,25 (2,10)	16,58 (1,30)

La rugosidad (R_a) presenta valores bajos para procesos de MA, aunque superiores a lo obtenido por mecanizado, siendo semejantes a lo obtenido por forjado o colado. Asimismo, los valores obtenidos son mayores a lo reportado para esta aleación [3,4]. No se observan variaciones significativas en función de la dirección, si bien es algo superior en la dirección transversal.

3.2 Defectos y Macroestructura

En la Figura 3 se muestra una macrografía del corte transversal de la probeta AP, junto con un detalle de la zona superior de la probeta.

Se puede observar la estabilidad dimensional a lo largo de toda la altura de la muestra, así como la ausencia de defectos macroscópicos (Fig. 3a). A su vez, puede verse la secuencia de cordones en la parte superior de la probeta (Fig. 3b). Debe tenerse en cuenta que durante la impresión la

trayectoria del láser se rota 60° entre las distintas capas, esto produce en un corte transversal como el mostrado, que los cordones se observen con diferentes dimensiones en cada capa. En la última capa se ve cada uno de los cordones asociados a la fusión del polvo por el láser que genera una pileta líquida que funde parte de la capa anterior, y al solidificar presenta la geometría observada. Las dimensiones de cada uno de los cordones son de 0,5 mm de ancho y 0,25 mm de penetración, aproximadamente.

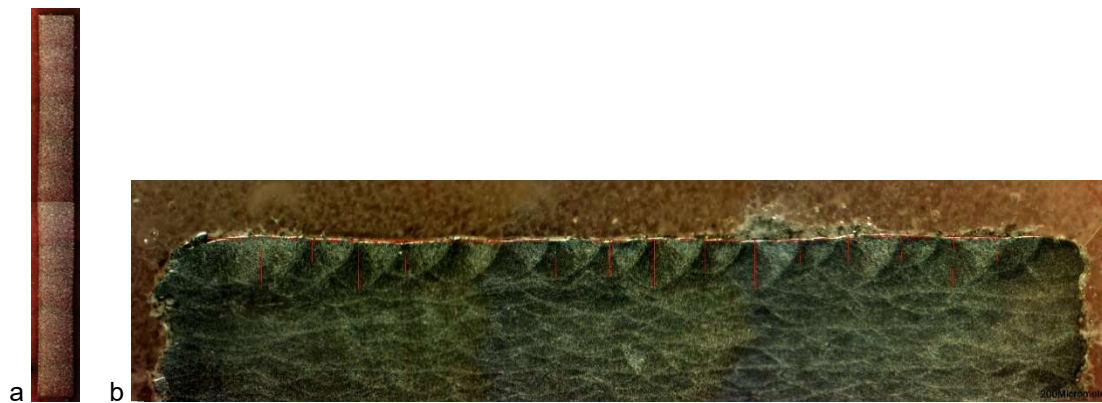


Figura 3: Macrografía: a- corte transversal de la probeta AP; b- zona superior de la probeta AP

En la Figura 4 se muestran imágenes de las superficies laterales de la probeta AP, así como de defectos en el interior de la misma.

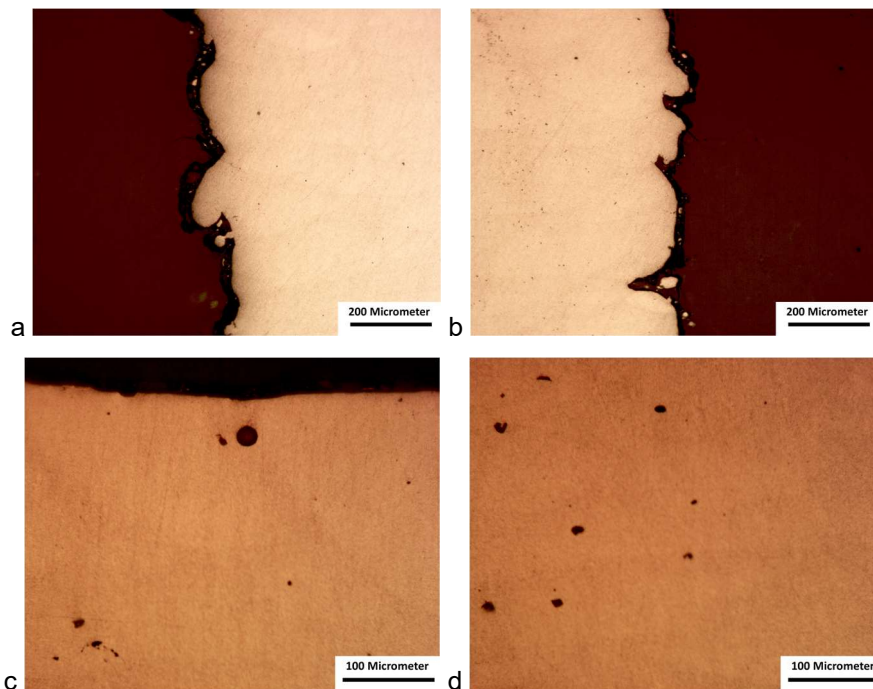


Figura 4: Imágenes de las superficies laterales (a y b) y defectos en el interior de la probeta AP (c y d)

Sobre las superficies laterales (Fig. 4 a y b) se observan los efectos de borde asociados a polvo sin fundir, flujo de líquido, etc., que definen la rugosidad final de la superficie y podrían considerarse defectos para condiciones de carga cíclica. La rugosidad en la superficie superior es menor que la observada sobre las superficies laterales. Asimismo, se observa la presencia de ciertos microdefectos (de hasta 20 micrones aprox.) asociados a porosidad o faltas de fusión entre cordones.

Para el caso de la muestra en condición SE la estructura se observa uniforme sin identificarse aspectos macroestructurales significativos.

3.3 Microestructura y Perfiles de microdureza

En la Figura 5 se muestran micrografías de la microestructura correspondientes a distintas alturas de la probeta AP.

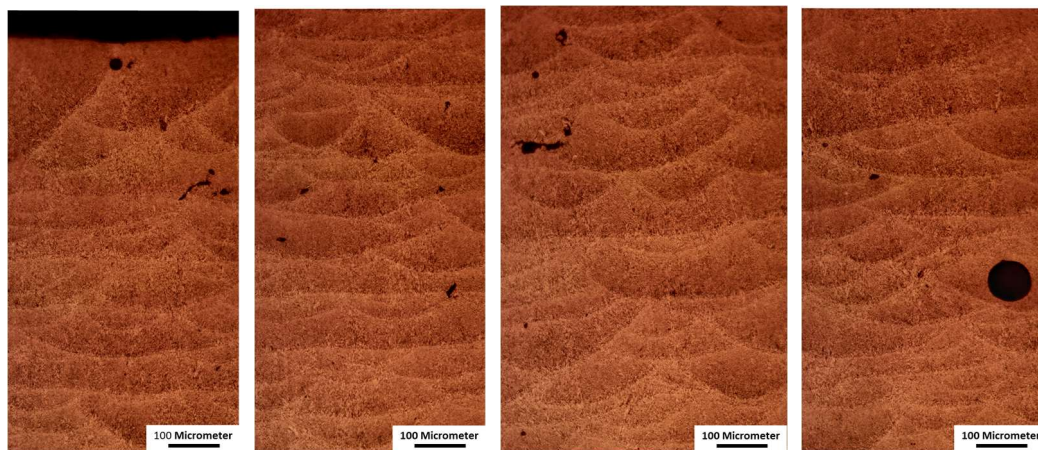


Figura 5: Microestructura de la probeta AP correspondientes a distintas posiciones en altura: a- Zona superior ($z=60$ mm), b- 2/3 de la altura ($z=40$ mm); c-1/3 de la altura ($z=20$ mm) y d- zona inferior ($z=0$ mm)

Puede verse la sucesión de cordones mencionada anteriormente, así como la uniformidad de la misma a lo largo de toda la probeta. Asimismo, se observan algunos microdefectos como se mencionó anteriormente.

En la Figura 6 se muestran micrografías correspondientes a la zona superior derecha de ambas condiciones (AP y SE) con la misma magnificación. La imagen de la condición SE fue atacada con un reactivo más agresivo a fin de revelar aspectos microestructurales. Con el reactivo empleado en la muestra AP (Keller) no se logró revelar la microestructura debido a su mayor homogeneidad, de acuerdo a lo reportado [4].

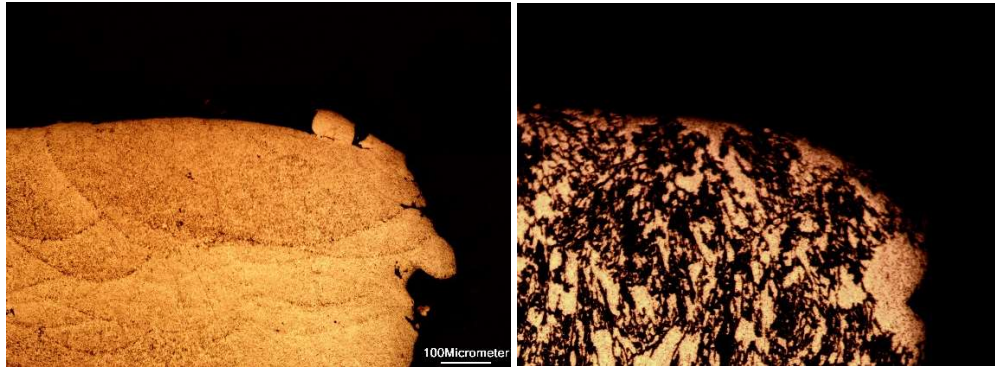


Figura 6: Microestructura de las probetas AP y SE correspondientes a la zona superior derecha de la probeta

En la Figura 7 se muestra una micrografía de la zona central de la probeta SE. Pueden observarse aspectos asociados a la morfología de los cordones originales.

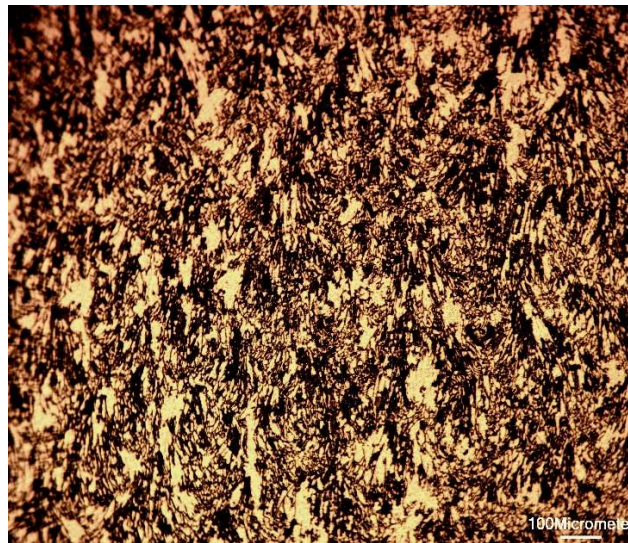


Figura 7: Microestructura de la probeta SE en la zona central

En la Figura 8 se muestran los perfiles de microdureza medidos a lo largo de la línea central de espesor de las probetas, en la dirección de la altura (Z).

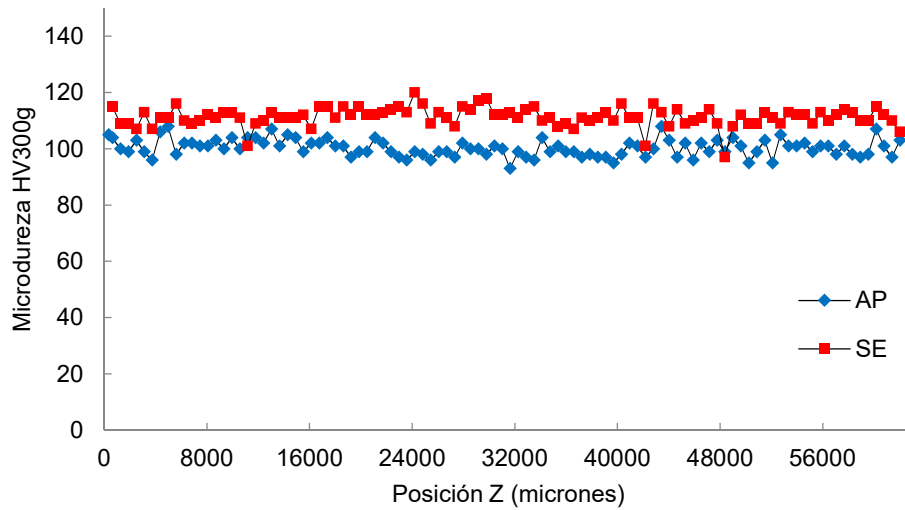


Figura 8: Perfiles de microdureza en la dirección de la altura (Z) de las probetas AP y SE

Puede verse que la dureza se mantiene sensiblemente uniforme a lo largo de toda la altura de ambas probetas. Asimismo, la probeta SE presenta una dureza levemente superior (HVprom=111) que la AP (HVprom=100), lo cual se asocia al tratamiento térmico aplicado.

3.3 Ensayos de tracción

En la Tabla 3 se muestran los resultados de los ensayos de tracción obtenidos para las diferentes posiciones y orientaciones en las probetas AP y SE.

Tabla 3. Resultados de ensayos de tracción

Probeta	AP		SE	
	σ_{UTS} (MPa)	ϵ_{rot}	σ_{UTS} (MPa)	ϵ_{rot}
1TV1	344	0,092	322	0,083
1TV2	317	0,050	312	0,083
1TH3	307	0,067	325	0,083
1TH4	309	0,075	319	0,075
1TH5	311	0,067	325	0,083
Prom	317	7,0	321	8,1

La probeta AP presenta una resistencia mecánica de entre 307 y 344 MPa y una deformación a rotura en el rango de 5 a 9 %. No se detectan diferencias significativas en el comportamiento en tracción en función de la posición (H3, H4, H5). En cuanto a la orientación, la resistencia en la dirección vertical (HVv=330) fue algo superior a la medida en la dirección horizontal (HVh=309), consistentemente con lo reportado [3,4].

En cuanto a la muestra SE se midieron valores de resistencia similares a los obtenidos para la probeta AW, con un incremento marginal. Se observó una menor dispersión en los resultados obtenidos, probablemente asociada a menor inhomogeneidad microestructural. Asimismo, se midió una deformación a fractura levemente superior a la determinada para la condición AP, consistentemente con lo reportado [3,4]. Estos valores también presentaron una menor dispersión. En general, no se detectó efecto de la orientación o de la posición.

Al comparar estos valores con los informados por el fabricante para este material (Tabla 4), respecto de la condición de impresión empleada, los valores de resistencia obtenidos son algo inferiores. En comparación con la última versión del procedimiento desarrollado, la diferencia en la condición AP es más significativa.

Para el caso de la condición SE, los valores de resistencia mecánica no difieren significativamente de los reportado por el fabricante [4], lo cual puede deberse a que el tratamiento térmico aplicado minimiza el efecto de las condiciones de impresión, dada la homogeneización que genera sobre la microestructura original.

Tabla 4. Resultados de ensayos de tracción informados para este material [3,4].

Procedimiento	Probeta	AP		SE	
		σ_{UTS} (MPa)	ϵ_{rot}	σ_{UTS} (MPa)	ϵ_{rot}
AlSi10Mg_200C	Vertical	390	0,08	-	-
	Horizontal	360	0,06	-	-
AlSi10Mg_Flex	Vertical	460	0,063	310	0,110
	Horizontal	450	0,102	320	0,110

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se analizaron la estructura, nivel de defectos y las propiedades mecánicas de una aleación de Aluminio-Silicio-Magnesio obtenida por el proceso de manufactura aditiva SLM en dos condiciones de post-procesamiento.

La rugosidad superficial de las caras laterales de las probetas impresas es de alrededor de 16 micrones, detectándose la presencia de ciertos defectos superficiales. Asimismo, se detectó un bajo nivel de microdefectos (<20 micrones) en la sección del material.

En la muestra “como impresa” (AP) se observa la estructura de cordones, los que presentaron dimensiones de alrededor de 0,5 mm de ancho y 0,25 mm de penetración. Para la muestra con solubilizado y envejecido (SE) esa estructura de solidificación fue eliminada, observándose una estructura homogénea.

La microdureza fue uniforme en la altura de la probeta en ambos casos, siendo levemente superior (10% aprox.) para el caso de la probeta SE (111 HV).

Las propiedades mecánicas no mostraron variaciones significativas en función de la posición, detectándose un leve incremento de la resistencia para las probetas ensayadas en la dirección de crecimiento de la probeta. La probeta SE mostró una resistencia mecánica y deformación a rotura levementes superiores a la AP, consistentemente con lo determinado en las mediciones de microdureza.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer al Tec. Fabián Stilo por su colaboración en la preparación de las muestras para metalografía y ensayos mecánicos.

REFERENCIAS

- [1] T. DebRoy, H. L. Wei, J. S. Zuback, T. Mukherjee, J. W. Elmer, J. O. Milewski, A. M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De, W. Zhang. *Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties*. Progress in Materials Science 92 (2018) 112–224.
- [2] Mohsen A. *The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing*. Business Horizons (2017) 60, 677-688.
- [3] EOS Aluminium AlSi10Mg_200C. Material Data Sheet. EOS. 2013.
- [4] EOS Aluminium AlSi10Mg. Material Data Sheet. EOS. 2021.