

Influencia de Parámetros Térmicos dentro del Proceso de Fabricación sobre Las Propiedades Mecánicas de la Aleación Al 7075

Influência dos Parâmetros Térmicos dentro do Processo de Fabricação nas Propriedades Mecânicas da Liga Al 7075

Parameters Thermal Influence of within the Manufacturing Process on the Mechanical Properties of Al 7075 Alloy

88

Edwin Gilberto Medina Bejarano^a
Mirian Motta Melo^b
Yina Faizully Quintero Gamboa^c

^a Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Brasil.
E-mail: edwinmedinabejarano@unifei.edu.br

^b Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Brasil. E-mail: mirianmottamelo@unifei.edu.br

^c IMECI, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Santo Tomás seccional Tunja, Colombia. Email: yina.quintero@usantoto.edu.co

Resumen— Entre las aleaciones de aluminio endurecidas por precipitación, las aleaciones de Al-Zn-Mg han sido objeto de mucha investigación por ser de las aleaciones con las mayores resistencias mecánicas. Las propiedades mecánicas deseables de esta clase de aleaciones se deben a heterogeneidades estructurales a escala nanométrica, que se forman en una etapa intermedia en la evolución de la solución sólida sobresaturada hacia una estructura en equilibrio, donde el exceso de soluto se secreta en forma de precipitados incoherentes o mecanismo de Orowan [1]. Este trabajo tuvo como objetivo evaluar la influencia de los procesos de fabricación: solidificación, homogeneización / solubilización y envejecimiento en la aleación Al 7075 mediante técnicas de caracterización de bajo costo, como medidas de dureza y microdureza. Para las condiciones estudiadas en este trabajo, se puede concluir que los resultados de dureza y microdureza tienen una influencia sustancial debido a las diferentes condiciones: solidificación cruda, solubilizado / templado en agua y envejecido, confirmando que pueden servir como control durante los pasos de procesamiento. También fue posible pronosticar el límite de rendimiento a partir de los resultados de microdureza de Vickers para las diferentes condiciones de procesamiento de la aleación Al 7075, con un error del 5% para la condición recibida (T6 51).

Palabras clave— Dureza Brinell, aleación 7075-T651, Microestructuras, Microdureza Vickers, solidificación, homogeneización; solubilización, envejecimiento, Tasa de enfriamiento, Tratamiento térmico.

Abstract— Among precipitation-hardenable aluminum alloys, Al-Zn-Mg alloys have been the subject of much research because they are the alloys with the highest mechanical strength. The desirable mechanical properties of this class of alloys are due to structural heterogeneities on a nanoscale, which are formed at an intermediate stage in the evolution of the supersaturated solid solution towards an equilibrium structure, where excessive solute is secreted in the form of incoherent precipitates or Orowan's mechanism [1]. This work aimed to evaluate the influence of the manufacturing processes: solidification, homogenization / solubilization and aging in the Al 7075 alloy using low cost characterization techniques, such as hardness and microhardness measures. For the conditions studied in this work, it can be concluded that the results of hardness and microhardness have substantial influence depending on the different conditions: crude solidification, solubilized / tempered in water and aged and as received (T6 51), confirming that they can serve as controls during the processing steps. It was also possible to predict the performance limit from the Vickers microhardness results for the different Al 7075 alloy processing conditions, with an error of 5% for the received condition (T6 51).

Keywords— Brinell hardness, 7075-T651 alloy, microstructures, Vickers microhardness, solidification, homogenization / solubilization, aging, cooling rate, heat treatment.

Resumo — Entre as ligas de alumínio endurecíveis por precipitação, as ligas Al-Zn-Mg tem sido objeto de muitas pesquisas por conta de serem as ligas com as mais altas resistências mecânicas. As propriedades mecânicas desejáveis desta classe de ligas devem-se as heterogeneidades estruturais em escala nanométrica, que são formados em um estágio intermediário na evolução da solução sólida supersaturada em direção a uma estrutura de equilíbrio [1]. O objetivo deste trabalho foi estimar a influência dos processos de fabricação: solidificação, homogeneização / solubilização e envelhecimento para a liga Al 7075 através de técnicas de caracterização de baixo custo, tais como medições de dureza e microdureza. Para as condições analisadas neste trabalho pode-se concluir que os resultados de dureza e microdureza têm uma influência substancial devido às diferentes condições: solidificação bruta, solubilização/temperatura da água e envelhecimento, corroborando que podem ser utilizadas durante as etapas de processamento. Além disso foi possível prever o limite de escoamento a partir dos valores de microdureza Vickers para as diferentes condições de processamento da liga Al 7075, com um erro de 5% para a condição conforme recebida (T6 51).

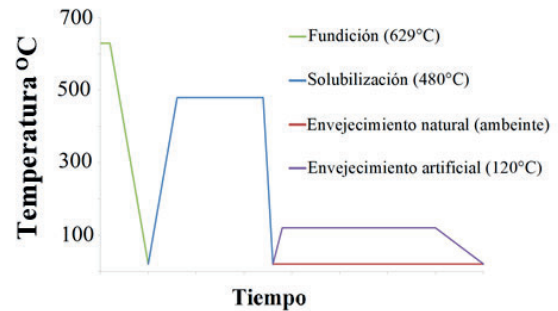
Palavras chave— Dureza Brinell, Liga 7075-T651, Microestruturas, Microdureza Vickers, solidificação, homogeneização/ solubilização, envelhecimento Taxa resfriamento, Tratamento térmico.

I. INTRODUCCION

En la industria generalmente se combina el aluminio con otros metales de ingeniería, tales como el cobre, zinc y magnesio, para de esta manera generar las aleaciones. De acuerdo con los elementos asociados, estas aleaciones poseen una serie de ventajas sobre el aluminio puro, como es una mayor resistencia mecánica, mejor resistencia a la corrosión, mejor fluidez a la hora de vaciar en moldes, entre otros [2]. Una de las principales aleaciones de aluminio de la actualidad es la Al 7075. Los tratamientos térmicos son realizados en estas aleaciones con el ánimo de modificar la microestructura en consecuencia modificar las propiedades mecánicas, químicas o aliviar las tensiones residuales [3]. Algunas de estas aleaciones de aluminio, dentro de la cual se destaca la 7075, cumplen estas condiciones y pueden ser beneficiadas por los tratamientos térmicos, aumentando su límite de resistencia a la tracción y la dureza, entre otras propiedades.

Estas características en la aleación nos dan una excelente maquinabilidad, buena estabilidad, baja densidad, así mismo una elevada dureza y resistencia, elementos necesarios para ser utilizados en variedad de aplicaciones [4]. Comercialmente, el endurecimiento estructural de la aleación y sus características mecánicas dependen mucho de los diferentes ciclos de tratamientos térmicos: solubilización, temple y envejecimiento (natural o artificial) representados en la Fig. 1. [5]

Fig. 1 Representación de la secuencia de los procesos de fabricación detallando las temperaturas y tiempos utilizados



Fuente: Autores

El propósito de estudiar los procesos de fabricación con el análisis microestructural es la posibilidad de contribuir para prever el comportamiento mecánico de las aleaciones de aluminio. En este tipo de aleaciones se tiene una evolución endureciendo la microestructura después del proceso de fundición, generalmente consiste en la suma combinada de los mecanismos de endurecimiento como la disolución sólida, el engrosamiento y re-precipitado de los precipitados endurecedores. Dando como resultado un aumento de la resistencia y el endurecimiento en la aleación como suma de las diferentes contribuciones. Del endurecimiento en sólidos cristalinos resulta la restricción de movimiento en las discordancias. Esta contribución surge a partir de las interacciones entre las características de la microestructura y las discordancias que acompañan las deformaciones [6]. En general, el acompañamiento de las propiedades mecánicas y la caracterización microestructural son realizados por ensayos y técnicas

convencionales como lo son las de microdureza, tracción, Rayos X, microscopia óptica y electrónica de barrido (MEV) y hasta electrónica de transmisión (MET). Entretanto, estas últimas técnicas son de naturaleza destructiva, de alto costo económico y consumen gran cantidad de tiempo durante el procesamiento. Para la producción de aleaciones de aluminio tratables térmicamente, donde la necesidad en el control de las propiedades durante el procesamiento, requiere del uso de técnicas más viables económicamente y de más fácil y rápido uso en su preparación.

Bajo este contexto el uso de técnicas de menor costo como, por ejemplo, las mediciones de microdureza, dureza o resistividad eléctrica por corrientes parásitas, acompañadas de técnicas de microscopia óptica y electrónica de barrido serán necesarias para el control de las cantidades de fracciones de fase de precipitados. Esto es fundamental para verificar si los mecanismos de disolución de los precipitados originados en la solidificación (homogenización y solubilización) y posterior formación de los precipitados en el endurecimiento (precipitación) está siendo efectivos. Además de esto, se pretende realizar la previsión del límite de fluencia para diferentes condiciones del proceso.

El objetivo es validar la influencia de los procesos de fabricación: solidificación, homogenización/solubilización y envejecimiento de la aleación Al 7075

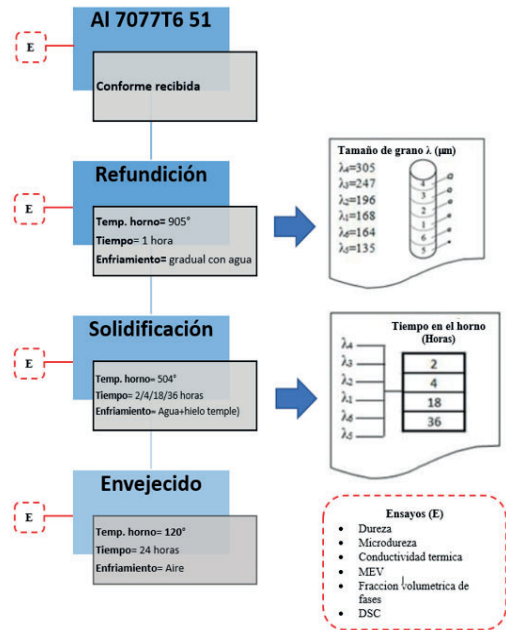
usando técnicas de caracterización de costo reducido con la previsión del límite de fluencia.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de la parte experimental fueron conducidos varios experimentos envolviendo los procesos de fabricación más utilizados para las aleaciones de aluminio: fundición/Re fundición, solidificación, homogenización/solubilización, temple y envejecimiento artificial. Para validar las modificaciones microestructurales y las propiedades mecánicas y eléctricas de las muestras, fueron caracterizadas en cada una de las etapas, conforme la secuencia descrita en la Fig.2. El material inicial utilizado fue la aleación Al 7075 T651 en forma de placa laminada en caliente en la condición: solubilizada y envejecida artificialmente, producida por ALCOA – Francia.

La composición química nominal, según la empresa proveedora se muestra en la Tabla 1. Fue realizado el análisis químico en un espectrómetro da marca Spectro, modelo Spectro Maxx disponible en las instalaciones de IMBEL - Fábrica de Armas Itajubá/MG (Brasil). Los resultados están dentro de lo especificado.

Fig. 2. Flujograma de procedimiento experimental utilizado



Fuente: Autores

A. Proceso de producción de la aleación 7075 T6 51

La aleación de aluminio 7075 en la condición T651 es una solución sólida tratada térmicamente para el alivio de tensiones y envejecida artificialmente (precipitada por tratamiento térmico).

Tabla 1 Composición química aleación de aluminio 7075 T651 (% peso)

% Peso	Temp. Líquido= 635°C						Temp. Sólido= 476°C				Densidad=2,79 g/cm³	
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otro Cada	Otro Total	Al	
Min	-	-	1.2	-	2.1	.18	5.1	-	-	-		
Max	.4	.4	2.0	.3	2.9	.28	6.1	.2	.05	.15	Resto	

Coefficiente medio de expansión térmica [20° a 100° C]=23,6 µm/m K

Fuente: IMBEL

B. Aluminio Comercialmente Puro

Fue utilizado aluminio comercialmente puro suministrado por la empresa Inbra Metais/Itaquaquecetuba-SP (Brasil), en forma de lingote fundido. La composición química nominal, según la empresa que suministra se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2 Composición química Aluminio puro (% peso)

Elemento	Si	Zn	Mg	Cu	Fe
Concentración (%)	0.101	0.018	<0.005	0.013	0.174

Fuente: Inbra Metais

Fue realizado un análisis químico en un espectrómetro de marca Spectro, modelo SpectroMaxx disponible en las instalaciones de IMBEL - Fábrica de Itajubá/MG (Brasil). Los resultados obtenidos que fueron suministrados se encuentran dentro de lo especificado.

C. Preparación de las muestras de la aleación Al 7075

Refundición de la aleación

La aleación comercial 7075 T651 en forma de placas con 250 mm de espesor fue cortada en segmentos de aproximadamente 3 cm x 3 cm y colocados en un crisol de carburo de silicio de la marca Salamander Sic, tipo triángulo azul-S6. El crisol con los segmentos de aleación fue calentado hasta 905°C en un horno eléctrico da marca Brasimet de tipo cámara, modelo K-250 con potencia de 7,68 kW del Laboratorio de Metalurgia y Materiales (LMM) de la UNIFEI.

Solidificación de la aleación

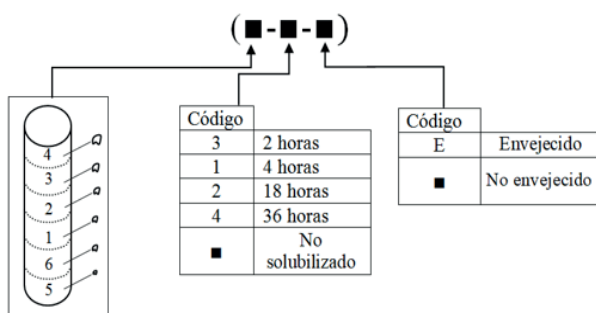
Buscando obtener diferentes tamaños de granos fueron realizados experimentos con solidificación direccional, esto fue, con tasas de extracción de calor variando en cada posición del cuerpo de prueba. La aleación después de

refundida fue vaciada con una temperatura de 850°C en un molde cerámico con base de zirconita con 40 mm de diámetro y 300 mm de altura. Este molde cerámico fue calentado a 900°C con un dispositivo desarrollado para calentar con resistencia tipo Kantal. Manteniendo caliente dentro del dispositivo durante todo el proceso de solidificación. El enfriamiento de la muestra fue hecho por medio de una coquilla de cobre refrigerada por agua. El procedimiento relatado sigue la metodología descrita por Rodríguez y Mello [7].

Corte y codificación de las muestras

Después de la solidificación direccional la muestra fue cortada en sentidos longitudinal y transversal. En el sentido de extracción de calor (corte longitudinal) para una verificación de la dirección del proceso de solidificación y en el sentido perpendicular a la extracción de calor (transversal), a diferentes alturas en función de la distancia de la coquilla para ser evaluado el tamaño de granó conforme lo mostrado en la Fig.3.

Fig. 3 Esquema con la codificación de las muestras.



Fuente: autores

Después de la solidificación de la aleación Al 7075 fueron seleccionadas las muestras en función de los tamaños de grano, es decir, en función de la tasa de enfriamiento, obtenidos en el proceso de solidificación.

Solubilización

El tratamiento de solubilización que busca homogenizar la aleación después de la solidificación, fue realizado a una temperatura de 504°C para cuatro (04) intervalos de tiempo de calentamiento diferentes: 2, 4, 8 y 36 horas. Para los tratamientos de solubilización fue utilizado un horno resistivo Mufla Digital Micro procesado marca CIENLAB modelo CE-800 con potencia de 3,9 kW del Laboratorio de Metalurgia y Materiales (LMM) da UNIFEI. Fueron tratadas 4 muestras de cada segmento de tamaño de grano para cada tiempo de calentamiento. Para evitar la precipitación durante el enfriamiento después de la solubilización, las muestras pasaron por enfriamiento brusco (templado en agua). Para esto, fue utilizada una solución a base de agua, alcohol y cloruro de sodio con temperatura entorno de -5°C.

Inmediatamente después del temple, las muestras de cada grupo fueron caracterizadas con los ensayos de dureza y microdureza. En seguida las muestras fueron preservadas en un congelador de la marca METALFRIO, modelo DA550 a temperatura inferior a -10°C. en esta condición, los efectos de la precipitación son despreciables por semanas.

Envejecimiento

El envejecimiento fue realizado con temperatura y tiempo recomendados por la literatura para tratamientos tipo T6 en la aleación Al 7075: 120°C por 24 horas [3]. Para la realización del tratamiento térmico de envejecimiento fue utilizado un horno Mufla Digital Micro procesado marca CIENLAB modelo CE-800 con una potencia de 3,9 kW, instalado en el Laboratorio de Metalurgia de Materiales (LMM) de la UNIFEI.

D. Técnicas de caracterización

Para acompañar los cambios microestructurales y las propiedades mecánicas y eléctricas de la aleación Al 7075 las muestras en diferentes etapas del procesamiento fueron preparadas y caracterizadas como se describe a continuación.

Preparación de las muestras

Para poder realizar la caracterización de las muestras fue necesario realizar una preparación de las mismas, la cual incluye:

- Lijado y pulido: se realiza con lijas de #220, #400, #600, #800, #1000 y #1200, seguido de pulido utilizando pasta de diamante con tamaño de 3 micras, y continuado de pulido con sílica coloidal (OPU).
- Ataque químico: Las muestras fueron atacadas con reactivo Keller, por aproximadamente 2 segundos. Posteriormente fueron lavadas con

agua y alcohol etílico hidratado 92,2%, finalmente secadas con un flujo de aire con el fin de detener el ataque del reactivo.

Microscopia óptica (MO)

Buscando caracterizar las microestructuras en las diferentes etapas de procesamiento fue utilizado un microscopio óptico OLIMPUS BX41M-LED del Laboratorio de Metalurgia y Materiales de la UNIFEI. Las imágenes obtenidas a través de la técnica de microscopia óptica (MO) fueron usadas para determinar el espaciamiento dendrítico primario (λ_1) y el tamaño de grano. El espaciamiento dendrítico primario (λ_1) fue determinado por el método del triángulo, que consiste en la unión de centros dendríticos vecinos, formando un triángulo, donde los lados del triángulo corresponden a los espaciamientos dendríticos primarios (λ_1) [8]. Fueron ejecutadas como mínimo 50 medidas para cada posición seleccionada, siendo que, al final, se obtuvo la medida de los valores. El tamaño de grano fue determinado por el método planimétrico según la norma ASTM E211-13 [9].

Microscopia electrónica de barrido (MEV)

Para caracterizar la microestructura de las diferentes etapas de procesamiento fue utilizado un microscopio electrónico de barrido marca Carl Zeiss modelo EVO MA15 como espectrómetro de energía dispersa (EDS) marca Bruker, modelo X

Flash 6|10. Se utilizó la técnica de microscopia electrónica de barrido (MEB) para obtener la composición química de las fases. El mapeo de los elementos de la aleación fue utilizado a fin de acompañar la disolución de los mismos en algunas etapas del tratamiento y para determinar la fracción volumétrica de las fases presentes en las diferentes condiciones (conforme recibida, refundida, solubilizada y envejecida). La fracción volumétrica fue determinada para acompañar tanto la disolución de la fase eutéctica en la etapa de solubilización, como la precipitación en la etapa de envejecimiento y el tamaño de grano. La cuantificación de la fracción de precipitados es muy relevante, pues esta será utilizada para validar los resultados de los procesos posteriores de los tratamientos térmicos (solubilización y envejecido). Por lo tanto, este fue determinada por dos métodos:

- a) Norma ASTM 562 -02
- b) Fracción de área.

Dureza y Microdureza

Para acompañar los cambios en las propiedades mecánicas en función de las etapas de procesamiento fueron realizados ensayos de dureza en la escala Brinell (HB). Fue utilizado un durómetro marca Durograf modelo RSB N° 80, del Laboratorio de Metalurgia y Materiales de la UNIFEI. Fue utilizada una carga de 62,5 Kg por 15 segundos, y realizadas por lo menos seis medidas en cada muestra. También fueron realizados ensayos de dureza en la escala microdureza Vickers

(HV). Fue utilizado un micro durómetro marca Time modelo TH 712 del Laboratorio de Metalurgia y Materiales de la UNIFEI. Fue utilizada una carga de 1 Kg por un tiempo de 15 segundos, realizándose por lo menos 12 medidas en cada muestra.

Ensayo de Tensión

El ensayo de tensión fue basado en la ASTM E8M-01b 10 , realizado con una velocidad de 5 mm/minuto, a temperatura ambiente, se utilizó una máquina universal de ensayos EMIC DL 3000 del Laboratorio de Ensayos Destructivos y No-Destructivos de la UNIFEI. Para las condiciones de la aleación Al 7075 T6 51 - conforme recibida.

Conductividad eléctrica

Para acompañar los cambios en las propiedades eléctricas en función de las etapas de procesamiento fueron realizadas medidas de conductividad eléctrica en conformidad con la norma ASTM E1004 - 09 utilizando un conductímetro digital de contacto de la marca Zappi modelo DC-11M. El equipo que fue calibrado con un patrón de aluminio de 34,6 % IACS, para proporcionar los valores de conductividad a 20°C. Fueron realizadas cinco medidas para cada muestra, suministrando al final el promedio de los valores.

E. Consideraciones finales

Para la realización de los ensayos de caracterización de las muestras y con el

objetivo de garantizar la confiabilidad en los datos registrados se consideró el estado y la calibración de los diferentes equipos utilizados en el estudio, el proceso de operación y la normativa de las técnicas para la manipulación y adecuado funcionamiento de los diversos equipos. También se garantizó la baja temperatura de las muestras después del proceso de solubilización en los procedimientos intermedios de preparación y caracterización, con el objetivo de garantizar que las muestras no sufrieran precipitaciones prematuras antes de realizar la toma de datos.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Con la idea de validar las alteraciones microestructurales, en las propiedades mecánicas y eléctricas en función de las etapas de procesamiento las muestras de la aleación Al 7075 fueron caracterizadas en diferentes condiciones: (1) conforme recibida; (2) bruta de solidificación; (3) solubilizada y templada en agua y (4) envejecida y enfriada en aire. Además, inicialmente las muestras de aluminio comercialmente puro en estado bruta de solidificación fueron caracterizadas para fines comparativos.

A. Microscopia óptica (MO)

Aluminio Comercialmente Puro

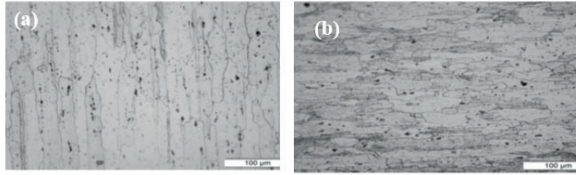
Muestras de aluminio comercialmente puro en la condición bruta de solidifica-

ción fueron retiradas de diferentes posiciones y direcciones del lingote. Del ensayo se notan granos equiaxiales con contornos definidos y la presencia de pequeños precipitados arredondados dispersos bien distribuidos a lo largo de la matriz de aluminio. Se pudo observar también la presencia de algunos poros provenientes del proceso de fundición.

Aleación Al 7075 estado T6 51: (Conforme recibida)

La muestra de aleación comercial de aluminio Al 7075 T651 como recibida: placa laminada en caliente, solubilizada y envejecida artificialmente fue estudiada. La Fig. 4 (a) presenta la microestructura de la aleación Al 7075 T651 conforme recibida con corte en el sentido longitudinal a la dirección de la laminación. Se notan granos con contornos definidos y alargados en el sentido de la laminación (textura de laminación). Con pequeños precipitados arredondados dispersos (puntos oscuros y grisáceos) a lo largo de la matriz de aluminio. La Fig. 4 (b) presenta una microestructura de la aleación Al 7075 T651 conforme recibida con corte transversal en la dirección de la laminación. Se notan granos con contornos definidos con pequeños precipitados arredondados dispersos (puntos oscuros) a lo largo de la matriz de aluminio.

Fig. 4 Microestructura de la aleación Al 7075 T651 conforme recibida con: (a) Corte longitudinal, (b) con corte transversal. Ataque con Keller por 10s.

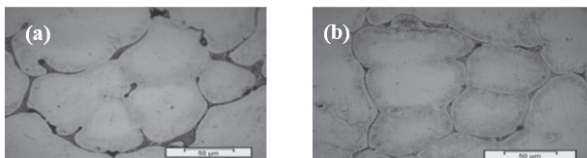


Fuente: Autores

Aleación Al 7075 estado bruta de solidificación

La Fig. 5 (a) y Fig. 5 (b) presentan la microestructura de la aleación Al 7075 refundida, con corte en el sentido longitudinal y corte en el sentido transversal a la dirección de extracción de calor, respectivamente. Se puede notar que una matriz de aluminio con contornos de granos bien definidos de fase eutéctica (láminas). En los contornos de grano son observados microporosidades típicas de esta estructura obtenida por solidificación. También se puede observar el “coring”, esto es, en el centro de los granos, compuesto de una fase primaria rica en aluminio (parte clara), y a medida que se aproxima a los contornos ocurre un sombríamente indicando enriquecimiento de soluto (parte gris).

Fig. 5 Microestructura de la aleación Al 7075 T651 bruta de solidificación: (a) Corte longitudinal, (b) con corte transversal. Ataque con Keller por 10s.



Fuente: Autores

La Tabla 3 presenta los resultados de tamaño de grano determinados de acuerdo con la norma ASTM E112 y presenta los tamaños de los espaciamientos interdendrítico primarios (λ).

Tabla 3 Resultados de tamaño de grano y espaciamiento interdendrítico primario de la aleación Al 7075 bruta de solidificación.

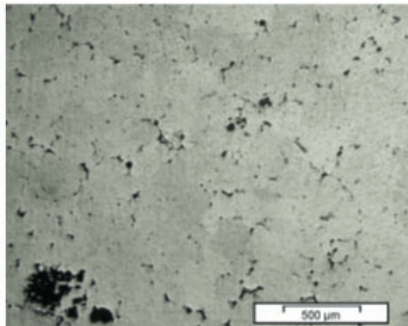
Tasa de enfriamiento (K/s)	Método ASTM		Método del triángulo	
	Nº de tamaño de grano ASTM	Diámetro medio del grano	espaciamientos interdendrítico λ (μm)	Desvío(%)
2.7	2.5	151	131±15	+11
1.9	2.0	179	164±21	+13
1.8	2.0	179	168±18	+10
1.4	1.5	213	196±25	+12
0.9	1.0	254	247±27	+11
0.6	0.5	302	305±37	+12

Fuente: Autores

Aleación Al 7075 envejecida artificialmente

Prosiguiendo con la metodología de acompañar las alteraciones de la microestructura en las propiedades de la aleación Al 7075 las muestras fueron envejecidas artificialmente a 120°C por 24 horas. En esta etapa el propósito es validar la influencia del tiempo de calentamiento durante la solubilización en la etapa de envejecimiento. La Fig. 7 presenta a la microestructura encontrada para la aleación Al 7075 con espaciamiento interdendrítico de $247 \pm 27 \mu\text{m}$, solubilizada a 504°C por 36 horas, templada en agua y envejecida a 120°C por 24 horas.

Figura 7 Microestructura típica de la aleación Al 7075, envejecida a 120°C por 24 horas. Ataque Keller por 3 s



Fuente: Autores

Se observa una matriz de aluminio con contornos de grano menos definidos que en la condición bruta de solidificación. Se puede notar que las microestructuras de las muestras solubilizadas y envejecidas son muy parecidas. No es posible percibir, a través del MO, los cambios microestructurales sufridos por la aleación después del envejecimiento. Los precipitados son nanométricos.

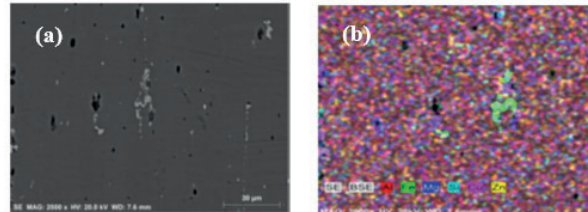
B. Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Aleación Al 7075 estado T6 51: (Conforme recibida).

La Fig. 8 (a) presenta la microestructura de la aleación Al 7075 T651 conforme recibida y en Fig. 8 (b) mapeo, realizado por la técnica de espectrometría de energía dispersiva (EDS), los principales elementos de aleación, donde se observa con más detalles los puntos claros y oscuros. Los resultados del mapeo indican que los puntos claros son fases ricas en hierro (color verde). Por otro lado, los puntos oscuros son depresiones generadas por arrancamiento de precipitados, posible-

mente en el proceso de pulido.

Fig. 8 (a) Microestructura de la aleación Al 7075 T651 conforme recibida con corte longitudinal en dirección de la laminación. Sin ataque. (b) Mapeo de los principales elementos de aleación (Zn, Mg, Cu, Si y Fe).



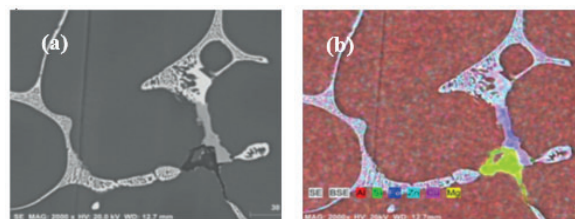
Fuente: autores

Se nota que los elementos: zinc, magnesio y silicio están distribuidos de manera homogénea. Por otro lado, los elementos cobre y principalmente el hierro se encuentran aglomerados. Las fases presentes en las muestras conforme recibida fueron identificadas a través del análisis por MEV con auxilio de microanálisis por EDS.

Aleación Al 7075 estado bruta de solidificación

Las Fig. 9 (a) y Fig. 9 (b) presentan la microestructura y la distribución de los elementos Al, Zn, Cu, Mg, Fe y Si en la estructura bruta de solidificación de la muestra refundida.

Fig. 9 (a) Microestructura de la aleación Al 7075 bruta de solidificación. Sin ataque. (b) Mapeo de los principales elementos de aleación (Zn, Mg, Cu, Si y Fe).



Fuente: autores

Puede ser observado que la región eutéctica (región laminar) es rica en zinc, cobre y magnesio. También puede ser observado que la región gris claro es rica en hierro y en la región gris oscura es rica en magnesio. También puede ser observado que la microestructura consiste en dendritas primarias de una solución sólida rica en aluminio con rede interdendrítica formada de fases eutécticas y partículas intermetálicas.

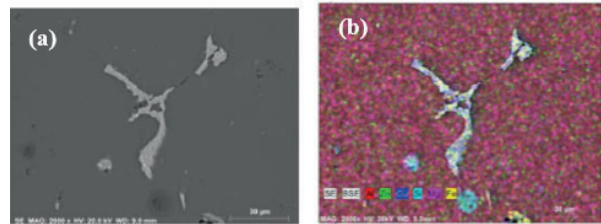
De los resultados del análisis de EDS de las fases indicadas en la fase gris fueron encontrado los elementos Cu y Fe, indicando, de acuerdo con Cong et al [11], que se trata de una fase Al_7Cu_2Fe . También fueron encontrados los elementos Al, Zn, Mg y Cu indicando, de acuerdo con Chandan y Mukhopadhyay [12], que esa es la fase S (Al_2CuMg) con Zn disuelto. Finalmente, también fueron encontrados los elementos Al, Zn, Mg y Cu, con diferentes porcentajes en peso, sugiriendo, de acuerdo con Chandan y Mukhopadhyay [12], que esta es la fase T ($Al_2Mg_3Zn_3$) con Cu disuelto.

Aleación Al 7075 solubilizada/templada en agua

Las Fig. 10 (a) y Fig. 10 (b) presenta micrografías típicas de la aleación Al 7075 solubilizada a 504°C por 2 horas, y templada en agua. Se puede observar una matriz de aluminio (gris) donde los límites de granos no son claramente bien distinguidos como en el estado bruto de solidificación. Se nota, también que parte de los precipitados existentes en estado bruto de solidificación fue disuelta, en

especial la fase eutéctica (laminar), los compactos claros, oscuros e grisáceos permanecen, sugiriendo que estos son más difíciles de disolver en la matriz de aluminio.

Fig. 10 (a) Microestructura de la aleación Al 7075 solubilizada a 504°C por 2 horas. Sin ataque. (b) Mapeo de los principales elementos de aleación (Zn, Mg, Cu, Si y Fe) por EDS/MEV



Fuente: Autores

También presentan la microestructura y la distribución de los elementos Al, Zn, Cu, Mg, Fe y Si, observado que la región eutéctica (región laminar) es rica en zinc y magnesio fue disuelta en la matriz de aluminio. También puede observarse que la región gris claro, que es rica en hierro y cobre, no fue disuelta en la matriz hasta 36 horas.

Aleación Al 7075 envejecida artificialmente

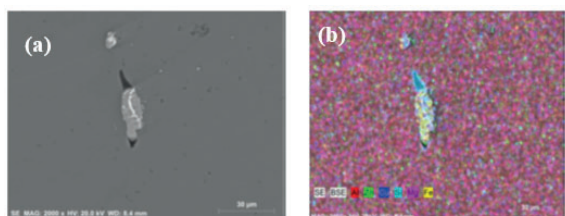
La Fig. 11 (a) presenta las microestructuras de la aleación 7075 con espaciamiento interdendrítico de $247 \pm 27 \mu m$, solubilizada a 504°C por 36 horas, templada en agua y envejecida a 120°C por 24 horas. La Fig. 11 (b) presenta el mapeo por EDS/MEV de los elementos Al, Zn, Cu, Mg, Fe y Si. Del mismo modo que con la muestra solubilizada, se observa que los elementos zinc y magnesio están disueltos en la matriz y que los elementos Cu y Fe no están disueltos, concentrándose en una única fase.

C. Dureza y Microdureza de la aleación Al 7075

Aleación Al 7075 estado T6 51: (Conforme recibida).

La aleación Al 7075 conforme recibida fue seccionada en el sentido longitudinal y transversal de la laminación. Las medidas de dureza e microdureza fueron hechas en el sentido transversal de la laminación, como se muestra en la Fig. 12. Los resultados del ensayo de dureza Brinell y microdureza Vickers a lo largo de la muestra son presentados en la Tabla 4 y en la Tabla 5.

Fig. 11 (a) Microestructura de la aleación Al 7075 con espaciamento interdendrítico de $247 \pm 27 \mu\text{m}$, solubilizada a 504°C por 36 horas, templada en agua y envejecida a 120°C por 24 horas. Sin ataque. (b) Mapeo de los principales elementos de aleación (Zn, Mg, Cu)



Fuente: Autores

Tabla 4 Resultados del ensayo de dureza Brinell de la aleación Al 7075 T6 51 conforme recibida

Tamaño de grano (μm)		Dureza Brinell (HB)						
Media	Desvío (%)	Posición	1	2	3	4	Media	Desvío (%)
64±5	8	A	159	164	150	151	156±7	4
		B	159	165	160	169	163±5	3
		C	166	175	166	175	171±5	2
		D	162	155	157	166	160±5	3

Fuente: Autores

Tabla 5 Resultados del ensayo de microdureza Vickers de la aleación Al 7075 T6 51 conforme recibida.

Tamaño de grano (μm)		Dureza Vickers (HV)						
Media	Desvío (%)	Posición	1	2	3	4	Media	Desvío (%)
64±5	8	A	180.9	183.4	166.4	161.4	173.0±9.3	5
		B	177.4	174.0	168.4	179.2	174.8±4.1	2
		C	182.7	175.7	181.4	176.4	179.1±3.0	1
		D	180.5	178.4	175.6	172.3	176.7±3.1	1

Fuente: Autores

Comparación de los resultados de dureza y microdureza en las diferentes condiciones de estudio

Las Fig. 13(a) y Fig. 13 (b) presentan las durezas y las microdureza, respectivamente, para todas las condiciones.

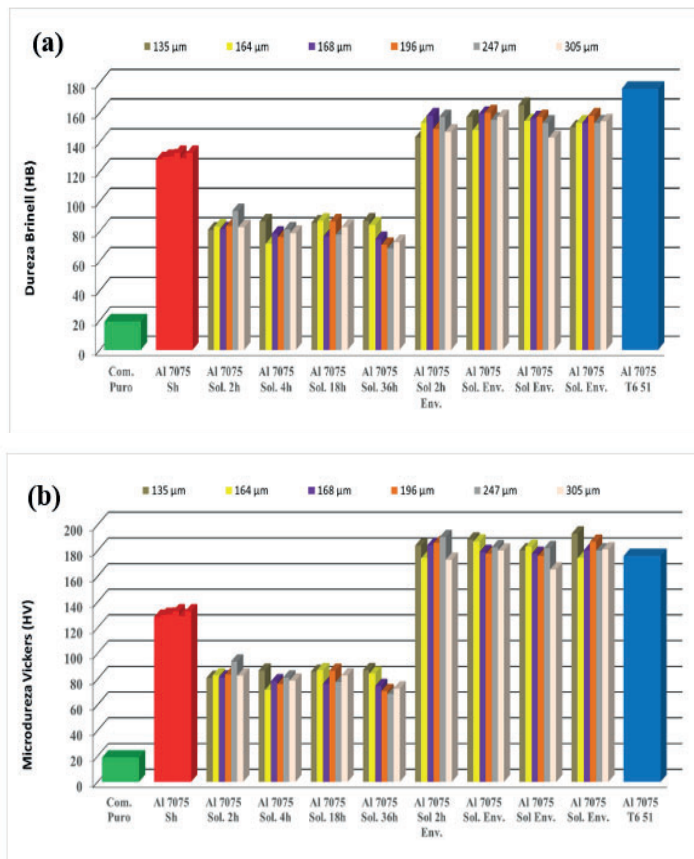
Al analizar la dureza y la microdureza del Al comercialmente puro y de la aleación Al 7075 se nota que la dureza y la microdureza de la aleación Al 7075 son mayores, debido a la presencia de los elementos de la aleación, que provocan distorsiones en la red cristalina del material e impiden el movimiento de las discordancias, aumentando así la resistencia mecánica de la aleación.

Los valores dureza y microdureza de la aleación Al 7075 solubilizada son menores cuando comparados con la aleación Al 7075 en estado bruta de solidificación, pues cuando la aleación es solubilizada, los elementos de aleación son completamente disueltos en la matriz y el material se comporta como un material de fase única presentando baja resistencia

mecánica. Después del envejecimiento de la aleación de Al 7075, se nota un aumento tanto de la dureza como de la microdureza. Ese aumento puede ser atribuido a los precipitados nanométricos, coherentes con la matriz que son formados durante el envejecimiento, pues estos precipitados impiden el movimiento de las discordancias aumentando así la resistencia mecánica de la aleación. Se nota también que ni el tamaño del espaciamiento interdendrítico ni el tiempo de solubilización presentan influencia significativa en los valores de dureza y de microdureza de la aleación después

del envejecimiento. Es de aclarar que para la condición conforme recibida (T6 51) se tiene laminación en caliente. Esta etapa de conformación mecánica, posiblemente, se tiene restricción, recristalización dinámica y reducción del tamaño de grano promoviendo una estructura más homogénea. Finalmente, cuanto a los resultados de dureza y microdureza de las diferentes condiciones: bruta de solidificación, solubilizada/templada en agua y envejecida y conforme recibida (T6 51) son distintos para cada condición.

Fig. 13 Comparación (a) Dureza HB, (b) Microdureza Vickers. (1) La adición de soluto: Aluminio comercialmente puro (AL CP) versus aleación comercial Al 7075. (2) las condiciones de procesamiento: Bruta de solidificación (BS) para diferentes tasas de solidificación (espaciamientos interdendríticos).



Fuente: Autores

D. Conductividad eléctrica

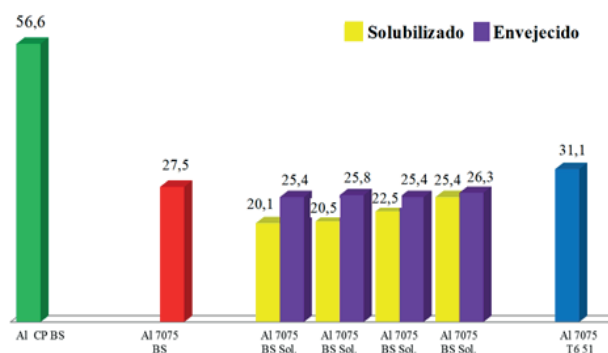
En esta etapa el propósito fue validar las alteraciones en la conductividad eléctrica para el aluminio comercialmente puro y

para la aleación Al 7075 en las siguientes condiciones: Bruta de solidificación, solubilizada en diferentes tiempos/temple

en agua, envejecida artificialmente para el espaciado interdendrítico de $131 \pm 15 \mu\text{m}$ y conforme recibida (T651).

La Fig. 14 presenta los resultados de las medidas de conductividad eléctrica, para el espaciado interdendrítico de $135 \mu\text{m}$.

Fig. 14 Conductividad eléctrica del aluminio (% IACS) comercialmente puro y de la aleación Al 7075 en las siguientes condiciones: Bruta de solidificación, solubilizada en diferentes tiempos/temple en agua, envejecida artificialmente para el espaciado interdendrítico de $131 \pm 15 \mu\text{m}$



Fuente: Autores

Finalmente, en cuanto a los resultados de conductividad eléctrica las diferentes condiciones: bruta de solidificación, solubilizada/templada en agua, envejecido y conforme recibida (T6 51) son distintos para cada condición, ahora con una franja mucho más restringida. O sea, con ensayos más detallados, pudieran servir de control eficiente y rápido durante las etapas del procesamiento.

E. Previsión del límite de fluencia en función de la microdureza

Usando la relación entre dureza Vickers y límite de fluencia dada por la Ecuación (1) para las aleaciones de aluminio de la serie 7XXX [13].

$$\sigma_Y = \beta_1 H_V + \beta_0 \quad (1)$$

Según el parámetro β_1 , la Ecuación (1) tiene un valor de 0,383 y es constante, independientemente del tratamiento térmico y/o proceso al cual la aleación fue sometida. Ya el valor de β_0 varía de acuerdo con el tratamiento y/o procesamiento de la aleación.

Tabla 6 Valores de esfuerzo de fluencia calculados para la aleación Al 7075 en las condiciones: bruta de solidificación, solubilizada, envejecida y como recibida (T651)

Condición	Límite de fluencia (MPa)
Bruta de solidificación	330,3
Solubilizada a 504°C por 18 horas	184,0
Solubilizada a 504°C por 18 horas y envejecida a 120°C por 24 horas	418,6
Como recibida (T651)	506,4

Fuente: Autores

Tabla 7 aleación Al 7075 - Valores de esfuerzo de fluencia experimental para la aleación Al 7075 T651 como recibida

Condición	Límite de fluencia (MPa)
Cuerpo de prueba 1	488,2
Cuerpo de prueba 2	477,6
Cuerpo de prueba 3	481,0
Media	482,4±5,3

Fuente: Autores

Al comparar el resultado previsto para la condición T6 51 (Tabla 6) y los resultados experimentales para la misma condición presentados en la Tabla 7, se puede concluir que presentan una diferencia en torno del 5%.

IV. CONSIDERACIONES Y CONCLUSIONES FINALES

Para las condiciones estudiadas en este trabajo, se pueden sacar las siguientes conclusiones para la aleación Al 7075:

Respecto a la etapa de solidificación:

- 1) Cuando la velocidad de enfriamiento disminuye, el espaciamiento interdendrítico aumenta y los contornos de grano se vuelven más heterogéneos. Sin embargo, la cantidad de fase eutéctica disminuye debido al efecto coring.
- 2) En la condición bruta de solidificación, es posible confirmar la existencia de precipitados de la fase eutéctica formados en los límites de grano bien definidos ricos en elementos Zn, Mg Cu y Fe, formando posibles fases de $Al_2Mg_3Zn_3$ (forma laminar), Al_7Cu_2Fe (gris claro) y Al_2CuMg (gris oscuro), también se puede observar el fenómeno de "coring", en el centro de los granos con regiones cada vez más ricas en soluto, el contorno del grano. La dureza tiene una leve tendencia de queda con un aumento en el espaciamiento interdendrítico. El mismo no sucede con la microdureza.
- 3) En comparación con el aluminio comercialmente puro: la dureza y la microdureza tuvo un aumento del 80% en la dureza y la microdureza en función de la cantidad de elementos introducidos, tales como: elementos de aleación y / o impurezas y la formación de límites de grano ricos en precipitados descartados durante la solidificación.

- 4) En comparación con el aluminio comercialmente puro, la conductividad eléctrica disminuyó en un 49% para la condición bruta de solidificación.

En cuanto a la etapa de homogenización / solubilización

- 1) Para una temperatura de 504 ° C (7% por encima de los 480 ° C típicos), el tamaño de los espacios interdendríticos no influyó en el tiempo de disolución de la fase eutéctica.
- 2) La mayoría de los precipitados existentes en estado bruta de solidificación en se disolvieron en la matriz de aluminio, especialmente la fase eutéctica laminar ($Al_2Mg_3Zn_3$) en un tiempo de 2 horas, región gris claro de la Figura 4.39 (Al_2CuMg) en un tiempo de 36 horas. Pero los precipitados oscuros (Al_7Cu_2Fe) ricos en hierro no se disuelven.
- 3) El tiempo requerido para la disolución de la fase eutéctica fue mucho más corto de lo que se predijo teóricamente. Durante dos horas sólo quedaron Cu y Fe, durante 36 horas el Cu se disolvió y el Fe permaneció en forma de precipitados.

- 4) A medida que aumenta el tiempo de calentamiento, se reduce la fracción de precipitados.
- 5) Contrariamente a lo previsto en teoría, la fracción de precipitados aumenta con el aumento de la velocidad de enfriamiento en solidificación, es decir, con la reducción del espaciado interdendrítico. Esta divergencia se puede explicar por la menor cantidad de fracción de precipitado a velocidades más altas. En comparación con la bruta condición de solidificación: hubo una reducción en la dureza y microdureza después de la solubilización independientemente del tiempo de remojo. Los contornos del grano, resultado del rechazo del soluto durante la solidificación, y que actuaba como barrera dificultando la deformación de las identaciones, se disolvieron durante la solubilización.
- 6) La etapa de homogenización / solubilización en comparación con la condición bruta de solidificación hubo una caída en la conductividad eléctrica.

Respecto a la etapa de envejecimiento

- 1) Con las técnicas de caracterización utilizadas, no fue posible notar diferencias en la microestructura.
- 2) En comparación con la condición solubilizado / templado en agua, hubo un aumento tanto en la dureza como en la microdureza, atribuido a los precipitados nanométricos, consistente

con la matriz que se forma durante el envejecimiento, ya que estos precipitados bloquean el movimiento de las dislocaciones aumentando así el Resistencia mecánica de la aleación.

- 5) El tamaño del espaciado interdendrítico y el tiempo de solubilización no tuvieron una influencia significativa sobre los valores de dureza y microdureza de la aleación después del envejecimiento.
- 4) En comparación con la condición de templado / solubilizado en agua, hubo un pequeño aumento en la conductividad eléctrica.

En cuanto a la evaluación de la influencia de los procesos de fabricación: solidificación, homogenización / solubilización y envejecimiento en la aleación Al 7075 mediante técnicas de caracterización de bajo costo, para las condiciones estudiadas en este trabajo se puede concluir que:

- 1) En cuanto a los resultados de dureza y microdureza: hubo una influencia sustancial debido a las diferentes condiciones: bruta de solidificación, solubilizado / templado en agua y envejecido y recibido (T6 51), confirmando que pueden servir como controles durante las etapas de procesamiento.
- 2) Respecto a los resultados de la conductividad eléctrica: hubo diferencias entre los pasos de procesamiento, aunque con la matriz

que se forma durante el envejecimiento, ya que estos precipitados bloquean el movimiento de las discrepancias aumentando así la Resistencia mecánica de la aleación.

- 3) El tamaño del espaciado interdendrítico y el tiempo de solubilización no tuvieron una influencia significativa sobre los valores de dureza y microdureza de la aleación después del envejecimiento.
- 4) En comparación con la condición de templado / solubilizado en agua, hubo un pequeño aumento en la conductividad eléctrica.

En cuanto a la evaluación de la influencia de los procesos de fabricación: solidificación, homogenización / solubilización y envejecimiento en la aleación Al 7075 mediante técnicas de caracterización de bajo costo, para las condiciones estudiadas en este trabajo se puede concluir que:

- 1) En cuanto a los resultados de dureza y microdureza: hubo una influencia sustancial debido a las diferentes condiciones: bruta de solidificación, solubilizado / templado en agua y envejecido y recibido (T6 51), confirmando que pueden servir como controles durante las etapas de procesamiento.
- 2) Respecto a los resultados de la conductividad eléctrica: hubo diferencias entre los pasos de procesamiento, aunque con un rango más restringido, principalmente entre las condiciones: solubilizado y envejecido.

- 3) Con respecto a la predicción del límite de flujo para las diferentes condiciones de procesamiento de la aleación Al 7075: la comparación con los resultados experimentales para la condición recibida (T6 51) confirman que fue posible pronosticar el límite de flujo a partir de los resultados de Microdureza Vickers.

V. REFERENCIAS

- [1] Padilha, A. F.. Materiais de engenharia. Hemus, 1997
- [2] Abal -. Fundamentos e Aplicações do Alumínio. Editado por ABAL. São Paulo: Associação Brasileira do Alumínio, 2015.
- [3] Asm international. ASM Handbook. Heat Treating. EUA: ASM International 4, 1991b. ASM INTERNATIONAL, 1991.
- [4] Alcoa. Alcoa. 2015. www.alcoa.com/brasil/pt/resources/pdf/industria/catalogo_ligas_temperas_2010.pdf (último acceso: 2015 de 5 de 5).
- [5] ASM Aerospace Specification Metals Inc. «Aluminum 7050-T7651.» The Aluminum Association, In, 2001.
- [6] Hutchinson, E. «Desenvolvimento e Caracterização de Revestimentos do tipo Super-rede de Dureza.» 2005.

- [7] Rodrigues, JR Pereira; Mello, M. De Lourdes Noronha Motta; Dos Santos, R. Gomes. Analysis of permeability of interdendritic channels during solidification of aluminum magnesium alloys , journa of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 2008
- [8] Gunduz M, Çardili E. «Directional solidification of aluminium-copper alloys.» Materials Science and Engineering A. , 2002: 167-185.
- [9] ASTM. «ASTM E23 - 07 ae1 Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.» 2007. E112-13. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. 2013.
- [10] ASTM B917/B917M-2001 ASTM B917 / B917M. (s.d.). 09 Standard Practice for Heat Treatment of Aluminum-Alloy Castings from All Processes.
- [11] Cong, Fu-Guan & Zhao, Gang & Jiang, Feng & Tian, Ni & Li, Rui-Feng. Effect of homogenization treatment on microstructure and mechanical properties of DC cast 7X50 aluminum alloy. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 25. 10.1016/S1003-6326(15)63694-9. 2015
- [12] Mondal Chandan, Mukhopadhyay A K. On the nature of T(Al₂Mg₃Zn₃) and S(Al₂CuMg) phase present in as-cast and annealed 7055 aluminum alloy [J]. Mate Sci Eng A, 2005, A391: 367–376
- [13] Tiryakioglu, Murat, Jeremy S Robinson, Manuel A Salazarguapuriche, Y Paul D Eason. «Hardness-Strength Relationships in the Aluminum Alloy 7010.» Materials Science & Engineering A 631 (04 2015): 196-200.