

METALURGIA BÁSICA DE ALGUNAS ALEACIONES DE ALUMINIO EXTRUIDAS O LAMINADAS

Alejandro Echavarría V¹. y Gustavo Adriano Orrego P.²

¹ CIDEMAT, Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia, Investigador, SIU, Medellín, Antioquia, Teléfono 57-4-2195540.

² Alucast de Colombia S.A.S, Ingeniero de Planta, Av. 15 A No. 51- 34, Bello, Antioquia, Teléfono 57-4- 460 12 73.

RESUMEN

Se presenta una comparación metalúrgica entre varios tipos de aluminios que se utilizan para la producción de láminas delgadas producidas por extrusión y posterior laminación, según las especificaciones: AA2024, AA3003, AA8011, AA6082 y AA8006. En el presente informe se expone la metalurgia básica de las cuatro aleaciones en estudio, utilizando los diagramas de fase pseudobinarios apropiados, para entender la secuencia de solidificación y los precipitados encontrados en la matriz de aluminio. También se realiza una comparación del comportamiento a la deformación plástica de dichos materiales y tener elementos de decisión para su posible uso industrial.

Palabras Claves: *Aleaciones de aluminio extrudadas o laminadas, diagramas de fase pseudobinarios de aleaciones de aluminio, metalurgia básica*

ABSTRACT

This article outlines a metallurgical comparison between various types of aluminum metals alloys used for foils extruded and rolled: AA2024, AA3003, AA8011, AA6082 and AA8006. The basic metallurgy of these alloys, using the appropriate pseudobinary phase diagrams, allows understanding the solidification sequence of the materials explaining the phases precipitated in the aluminum matrix. A comparison of the plastic deformation of the alloys allows appreciate the possible use for industrial purposes..

Key Words: *Wrought aluminum alloys, pseudobinary aluminum phase diagrams, basic metallurgy*

1. DESCRIPCIÓN METALÚRGICA DE LAS ALEACIONES AA2024, AA3003, AA8011, AA6082, AA8006 y AA6061

1.1 Composición química de las aleaciones [1]

Las aleaciones tratadas en este estudio se rigen por las normas AA (*Aluminum Association*), UNS (*Unified Numbering System*) o ISO (*International Standards Organization*) entre otras. Las composiciones se reportan en la Tabla 1.

Tabla 1. Rangos de composición química de las aleaciones tratadas en este estudio [1]

Grado			Contenido en %							
Aluminum Association	UNS No.	ISO No. R209	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
AA2024	A9AA2024	AlCu4Mg1	0,5 max	0,5 max	3,8- 4,0	0,3- 0,9	0,9- 1,2	0,10 max	0,25 max	
AA3003	A9AA3003	AlMn1Cu	0,6 max	0,7 max	0,05 - 0,20	1,0- 1,5			0,10 max	
AA6082	...	AlSi1Mg Mn	0,7- 1,3	0,5 max	0,10 max	0,4- 0,6	0,6- 1,2	0,25 max	0,20 max	0,10 max
AA8006	A9AA8006	...	0,4 max	1,2- 2,0	0,30 max	0,3- 1,0	0,10 max		0,10 max	
AA8011	A9AA8011	...	0,5- 0,9	0,6- 1,0	0,10 max	0,20 max	0,05 max	0,05 max	0,10 max	0,08 max
AA 6061	A9AA6061		0,4 – 0,8	0,7	0,15 - 0,40		0,8- 1,2			

Los elementos principales de las aleaciones en estudio son, en promedio, 4,0% Cu y 1,0% Mg para el AA2024; 1,2% Mn y 0,13% Cu para el AA3003, 1% Si, 1% Mg y 0,5% Mn para el AA6082; 1,6% Fe y 0,7% Mn para el AA8006; 0,7% Si y 0,8% Fe para el AA8011 y 0,6% Si, 0,3% Cu, 0,7% Fe y 1,0% Mg.

La influencia de los elementos de aleación en el aluminio son los siguientes:

Cobre: Aumenta de manera notable la resistencia a la tracción y la dureza, tanto en condiciones de extrusión como tratado térmicamente. Las aleaciones que contienen de 4 a 6% Cu tienen una respuesta más efectiva al tratamiento térmico. Por lo general, al cobre reduce la resistencia a la corrosión y, en ambientes muy específicos en ciertos tipos de aleaciones, induce a la corrosión bajo tensión. Las adiciones de cobre reducen la resistencia al agrietamiento en caliente y disminuye la colabilidad en piezas fundidas.

Hierro: Es altamente soluble en estado líquido pero virtualmente insoluble (0,04% Fe) a temperatura ambiente. Por ello aparece como compuestos intermetálicos insolubles, siendo los más comunes Al_3Fe , Al_6FeMn y $\alpha-AlFeSi$. Mejora la resistencia al agrietamiento en caliente, las resistencia a la fluencia a

altas temperaturas y disminuye la tendencia a la adhesión en fundición a presión. El hierro refina el grano en los lingotes de fundición. Un incremento en el contenido de hierro aumenta la resistencia mecánica pero disminuye notablemente la ductilidad, por la presencia de las segundas fases. En presencia de altos contenidos de hierro, dichas fases afectan adversamente la colabilidad y las características de alimentación de las piezas fundidas. Junto con el manganeso y el cromo, el hierro ayuda a formación de fases que pueden retirarse por escorificación de la colada.

Magnesio: Mejora notablemente la resistencia y la dureza en las aleaciones Al-Si tratadas térmicamente normales ó en aquellas más complejas que tienen elementos como el Cu, Ni y otros elementos. La fase endurecible responsable de la mejora de la dureza es el Mg_2Si y exhibe una alta solubilidad hasta un máximo de 0,7% Mg. Por encima de esta concentración no ocurre endurecimiento posterior, por efecto del ablandamiento de la matriz de aluminio. Las composiciones recomendadas para aluminios de alta calidad ("*premium*") varían en el rango de 0,40 a 0,70%. Las aleaciones binarias Al-Mg se utilizan ampliamente cuando se requiera un acabado superficial brillante, buena resistencia a la corrosión y una excelente combinación entre resistencia y ductilidad. Las composiciones entre 4 a 10% Mg, así como aquellas que contienen más de 7% Mg son tratables térmicamente, cuya desventaja principal es la inestabilidad en las características de envejecimiento a temperatura ambiente. Las aleaciones Al-4Cu-1Mg se caracterizan por precipitar el compuesto Al_2CuMg , responsable del endurecimiento por precipitación de dichas aleaciones.

Manganeso: Incrementa la resistencia mecánica sea por solución sólida o por finos precipitados intermetálicos. No altera la resistencia a la corrosión. Se usa en la fundición para corregir la forma acicular de los precipitados aciculares ricos en hierro y disminuir su efecto fragilizante, aunque promueve una estructura fibrosa en los lingotes. En forma de precipitados finos previene el crecimiento del grano en la recristalización. Se encuentra que el manganeso incrementa la sensibilidad al agrietamiento de las aleaciones tratables térmicamente. Hasta 1,25% Mn es el principal aleante en las aleaciones del tipo 3xxx. Con grandes deformaciones plástica, estos materiales exhiben una aceptable embutibilidad. En presencia de Fe, Cr ó Ni, debe cuidarse que no sobrepasen los límites de composición para evitar la formación de cristales primarios intermetálicos.

Níquel: Se emplea conjuntamente con el cobre para mejorar las propiedades a altas temperaturas. También reduce el coeficiente de expansión térmica.

Silicio: El efecto más notable del silicio en el aluminio es mejorar las características del colado, mejorando la fluidez, la resistencia al agrietamiento en caliente y las características de la alimentación de las piezas fundidas. Las aleaciones comerciales Al-Si varían desde composiciones hipoeutécticas hasta cerca del 25% Si. Para procesos de colado con velocidades lentas de solidificación se prefieren los rangos de 5 a 7 % Si, para moldes permanentes se recomienda 7 a 9 % Si y para fundición a presión, que inducen altas velocidades de enfriamiento, 8 a 12% Si. Se recomienda mayores cantidades de eutéctico para propósitos de alimentación de la pieza a medida que aumenta la velocidad de enfriamiento. Las adiciones de silicio disminuyen la densidad y el coeficiente de expansión térmica.

Estaño: Mejora las características antifricción y la maquinabilidad. Debido a esto, se utiliza en aleaciones destinadas a cojinetes. El estaño puede influenciar la respuesta al endurecimiento de ciertas aleaciones de aluminio.

Titanio: Refina la estructura del grano del aluminio, usualmente adicionado como boruro de titanio, TiB_2 , preferiblemente en concentraciones mayores que la estequiométrica. Reduce la tendencia al agrietamiento.

Zinc: No se reportan beneficios por la adición del zinc al aluminio. Sin embargo, en aleaciones que contienen Cu y/o Mg, mejora la respuesta al endurecimiento por tratamiento térmico o natural.

2.1 Aleación AA 2024

Contiene como elementos principales el Cu con un contenido entre 3,8 – 4,0% Cu, 0,9 – 1,2 % Mg y 0,3 – 0,9 % Mn. El manganeso se agrega a las aleaciones AA 2024 con el fin de mejorar la elongación con una notable mejora de las propiedades de resistencia a la tensión y a la cedencia, como se muestra en la Figura 1.

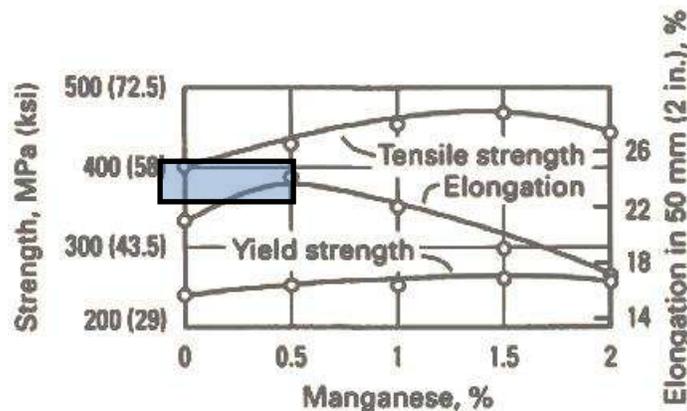


Figura 1. Influencia del manganeso en las propiedades mecánicas de las aleaciones Al-4%Cu-0.5%Mg, tratado térmicamente a 525 °C. Se indica el rango de la aleación AA2024, aunque ésta contiene como mínimo 0,8% Mg. [1].

En este tipo de aleaciones, se puede presentar un mayor incremento en la resistencia a la tensión y particularmente en la resistencia a la cedencia en la deformación plástica luego del tratamiento térmico. Los rangos de composición de manganeso y magnesio no deben ser superiores a 0,9 y 1,2 % respectivamente, porque la pérdida de ductilidad en las aleaciones aluminio-cobre. Las adiciones de Co, Cr o Mo, a la aleación extruída Al-4%Cu-0,5%Mg incrementan las propiedades a la tensión en el tratamiento térmico, pero ninguno ofrece una ventaja superior a la del manganeso.

Su metalurgia básica se refiere al diagrama Al-Cu, pero en vez de precipitar la fase $CuAl_2$ precipita la fase S: Al_2CuMg , como se observa en la Figura 2.

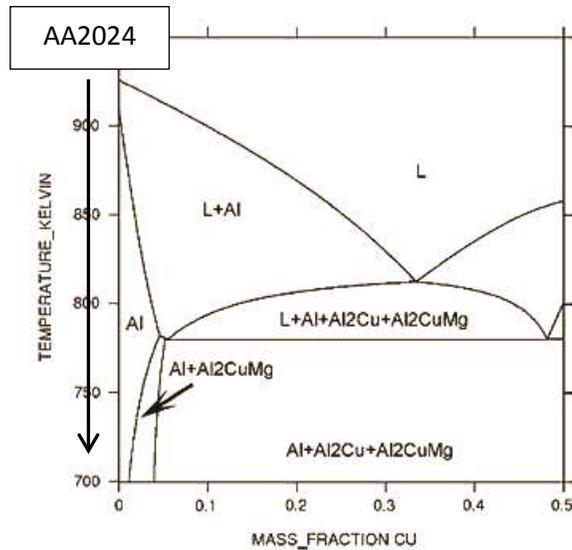


Figura 2. Sección vertical del diagrama de fases ternario Al-Cu-1,5Mg, calculado por THERMOCALC. La aleación AA2024 contiene hasta 1,2% Mg. [2].

El eutéctico funde a 420 °C para la aleación con 1,0 % Mg y 33% en peso de cobre. A esta temperatura, la solubilidad máxima del cobre en la fase α es cerca de 4 % [3-5]

La Figura 3 ilustra el diagrama de fases Al-Cu-Mg a 190 °C. En ella se encuentra que a dicha temperatura se coprecipitan las fases Al_2CuMg y en menor cantidad, el Al_2Cu .

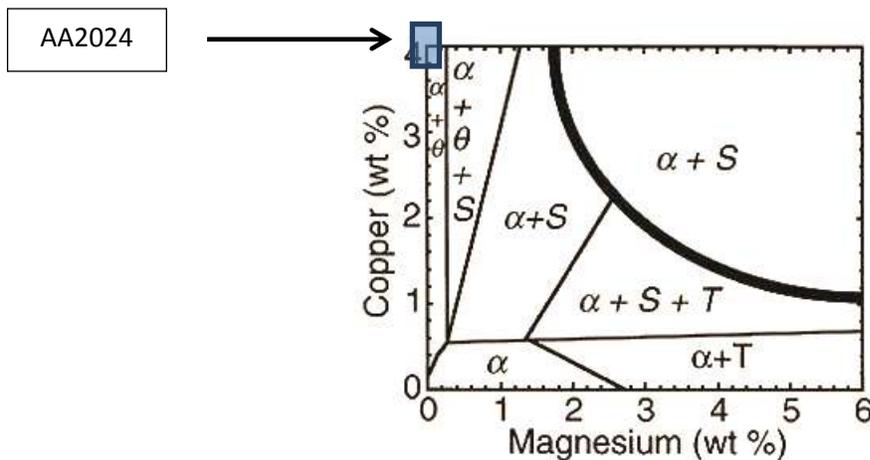


Figura 3. Diagrama de fases del sistema Al-Cu-Mg mostrando los límites de los diagramas de fases a 190 °C. La línea gruesa define el límite $\alpha/\alpha+S$ a 500 °C. [6]

El endurecimiento de la aleación AA2024 puede ser natural (maduración) ó artificial. En caso de la maduración, a las 10 h puede obtenerse el 95 % de la resistencia a la tracción (Figura 4), siendo más representativo el valor de 30 horas (Figura 5) cuando se deja libremente a la temperatura ambiente.

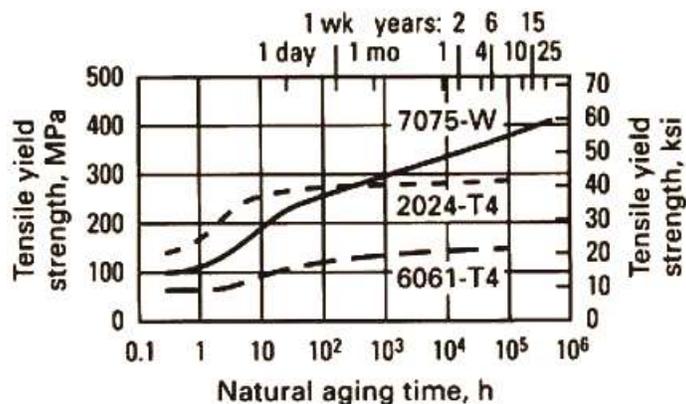


Figura 4. Curvas de envejecimiento natural de la aleación AA2024 en comparación con las del tipo AA7075 y AA6061. [1].

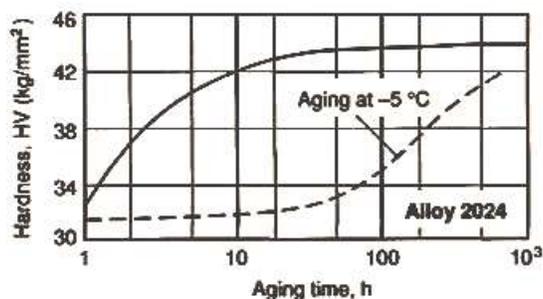


Figura 5. Envejecimiento natural (22 °C) de la aleación AA2024 o criogénico (-5 °C)[1]

El diagrama TTT del envejecimiento de la aleación AA2024 se muestra en la Figura 6. El tratamiento correspondiente al estado T8 corresponde a 493 °C/16 h a 191 °C. En A el temple es directo en el baño de sales. En B, la inmersión en el baño de sales se da luego de su enfriamiento a temperatura ambiente. Se aprecia claramente que el envejecimiento en baño de sales después de temple de solución, aumenta la cinética del envejecimiento, necesiéndose menores tiempos para obtener el 90% del esfuerzo de fluencia nominal (415 MN.m²).

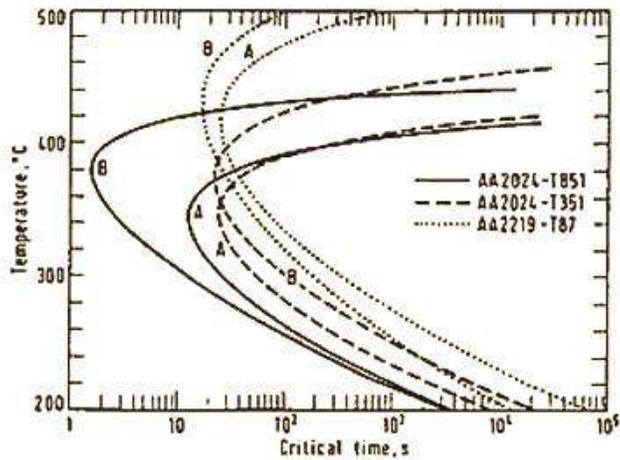
2024 Alloy

Treatment:

Sequence A = Specimens were quenched directly into a salt bath at 250-475°C (482-886°F)

Sequence B = Specimens were first quenched to room temperature, then heated in the salt bath

All specimens were quenched in cold water to complete the sequences after hold times of 2 s to 1 h, stretched to 5% plastic strain, and then aged for 16 h at 172°C (342°F)



Time-temperature-property diagram

Comparison of yield strength (0.2% offset) C-curves for sequence A and B treatments of AA 2024-T851, AA 2024-T351, and AA 2219-T87

Corresponding yield strengths are 90% of values obtained from direct quench

415 MN m⁻² for AA 2024-T851

345 MN m⁻² for AA 2024-T351

345 MN m⁻² for AA 2219-T-87

Figura 6. Envejecimiento artificial de la aleación AA2024. [5]

Se recomienda el tratamiento de solución de 495 °C, seguido de envejecimiento a 170 – 190 °C de 8 a 16 horas (Véase la Figura 6).

La secuencia de precipitación en la aleación AA2024 es: Solución sólida supersaturada → arreglos desordenados de átomos de Cu y Mg → zonas GP en forma de barras → fase S' (Al₂CuMg) en forma de tiras → fase S (Al₂CuMg)

La fase S' se nuclea en las dislocaciones en ciertas direcciones cristalográficas. Los precipitados típicos de la AA2024 son: Al₁₂Si[Mn,Fe]₃, Mg₂Si y en algunos casos Al₃[Fe,Mn] o Al₆[Mn,Fe]. Durante el tratamiento térmico los precipitados de hierro se transforman a Al₇Cu₂Fe y de manganeso a Al₂₀Cu₂Mn₃. La Figura 7 muestra los precipitados típicos de la aleación envejecida del AA2024.

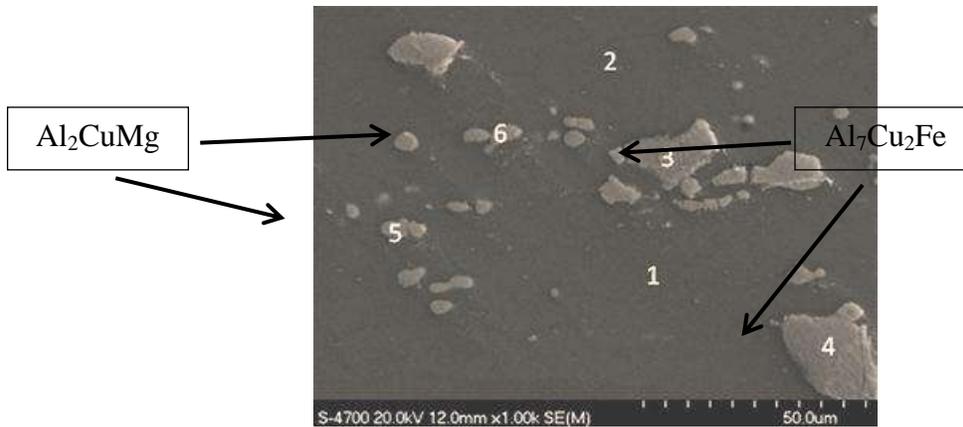


Figura 7. Microscopía SEM de una aleación AA2024 extruida [4].

Al comienzo del envejecimiento natural (maduración) natural, aparecen en la solución sólida gérmenes de una segunda fase rica en cobre, bajo la forma de plaquetas paralelas a los planos base de la red cúbica de caras centradas de la matriz. Cuando la temperatura de maduración es mayor que 100 °C, las plaquetas llegan a ser muy importantes y de mayor grosor, conservando, sin embargo, la misma orientación con relación a la red de la matriz. Entonces se designan como GP2 (Guinier-Preston de segunda especie).

En la práctica la obtención de estas aleaciones es difícil de conseguir por los métodos tradicionales de vaciado, lográndose el mejor producto a través de colada continua, teniendo cuidados especiales por ser una aleación susceptible de sufrir agrietamiento interno si no se controlan las velocidades de descenso y la temperatura de vaciado.

Las aplicaciones más importantes de esta aleación denominada “Duraluminio” se encuentran en la industria aeroespacial, en la fabricación de moldes para soplado de PET, en la fabricación de tornillos y remaches especiales, en la industria militar como los soportes de culata de algunos fusiles y en general para la fabricación de piezas de maquinaria por su excelente maquinabilidad.

2.2. Aleación AA3003

Esta aleación contiene nominalmente 1,3 % Mn y 0,13 Cu. El Si se limita a un máximo de 0,6%. Se recomienda en aplicaciones que impliquen buena conformabilidad, resistencia a la corrosión, soldabilidad y resistencia mecánica. Es común su uso en utensilios de cocina. En la aleación AA3003 debe tenerse cuidado que la suma total del Fe+Mn sea inferior a 2,0%, para prevenir la formación del Al₆(Fe,Mn) desde la colada. El efecto del manganeso en esta aleación se hace evidente en la Figura 8, y se agrega para endurecer la matriz de aluminio aumentando la resistencia a la tracción, la resistencia a la fluencia y la elongación.

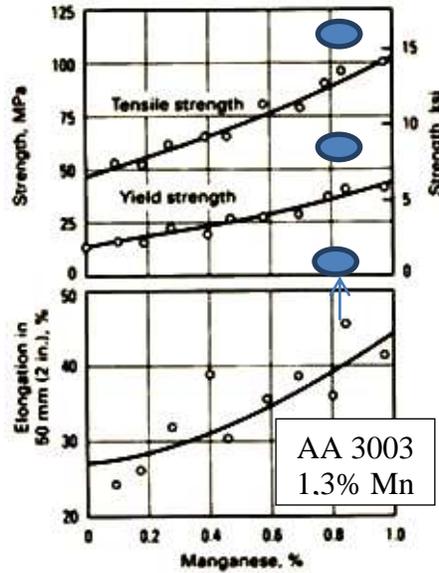


Figura 8. Efecto del manganeso sobre las aleaciones de Al-Mn [1]

La Figura 9 ilustra la secuencia de solidificación y transformaciones en el estado sólido de la aleación 3003: $L \rightarrow L+(Al) \rightarrow (Al)+Al_6Mn \rightarrow (Al)+\alpha$, con $\alpha = Al_{15}Mn_3Si_2$.

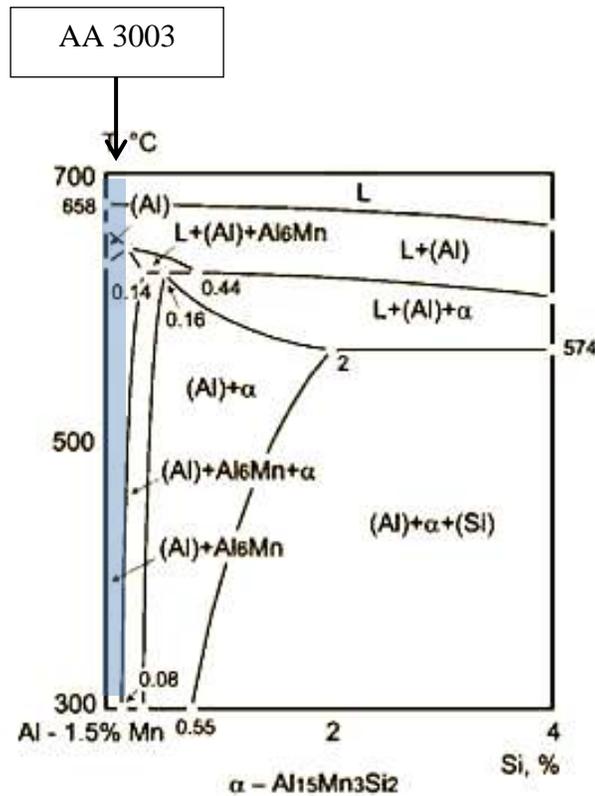


Figura 9. Diagrama de fases pseudobinario de las aleaciones Al-Mn-Si para 1,5% Mn. El precipitado a temperatura ambiente es $\alpha-Al_{15}Mn_3Si_2$. [6]

De la figura anterior, se deduce que las fases de la aleación AA3003 a temperatura ambiente son (Al) primario y $\text{Al}_{15}\text{Mn}_3\text{Si}_2$, como se muestra en la Figura 10.

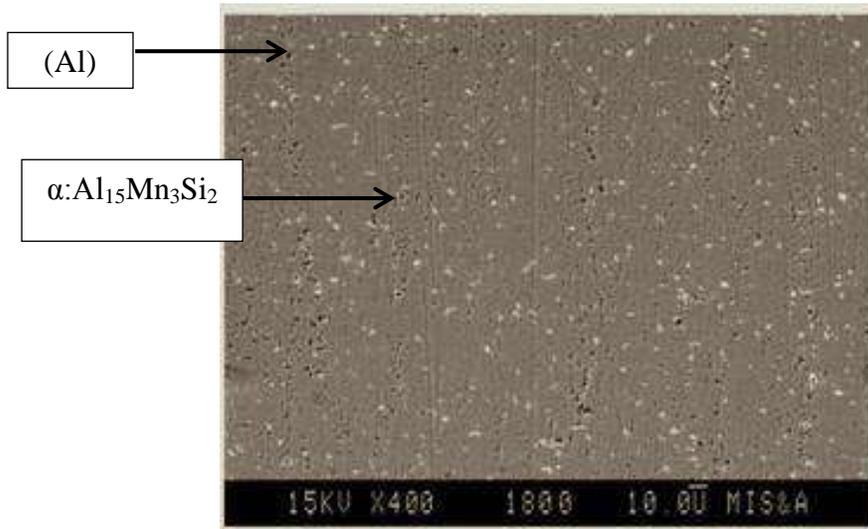


Figura 10. Microestructura de la aleación AA3003. La fase continua es aluminio primario (Al) y el precipitado blanco es $\text{Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$ [6]

2.3. Aleación AA8006.

Esta aleación contiene nominalmente 1,6% Fe y 0,6% Mn. El silicio se limita a un máximo de 0,4%. Se recomienda esta aleación en aplicaciones que requieran alta resistencia y ductilidad. La composición de esta aleación es cercana a la del eutéctico ternario Al-Fe-Mn y presenta una combinación adecuada de resistencia y ductilidad a temperatura ambiente y retiene su resistencia a alta temperatura, debidas a la presencia de finos precipitados ricos en hierro.

Las Figuras 11a y 11b muestran los diagramas de fase de aleaciones Al-Fe-Mn. Para el caso de la aleación AA8086, la secuencia de la solidificación de esta aleación pasa sucesivamente por los siguientes estados: $L \rightarrow L + (\text{Al}) + \text{Al}_3\text{Fe} + \text{Al}_6\text{Mn} \rightarrow (\text{Al}) + \text{Al}_6\text{Mn} + \text{Al}_3\text{Fe}$ (hasta 500 °C).

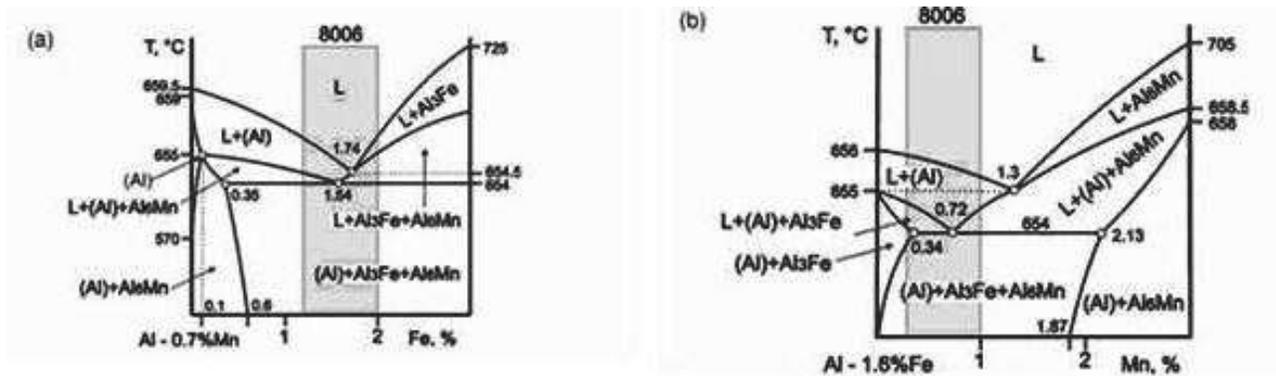


Figura 11a. Diagramas de fase pseudobinarios para el sistema de aleaciones Al-Fe-Mn para 0,7% Mn (superior). **Figura 11b:** Diagrama de fase para dichas aleaciones con 1,6% Fe. Se ilustra el rango de composiciones de la aleación AA8006. [6]

De las Figura 11a y 11b, se deducen que las fases de la aleación AA8006 son (Al) primario y precipitados del tipo $Al_3(Fe,Mn)$ y $Al_6(Fe,Mn)$, como se observa en la Figura 12.

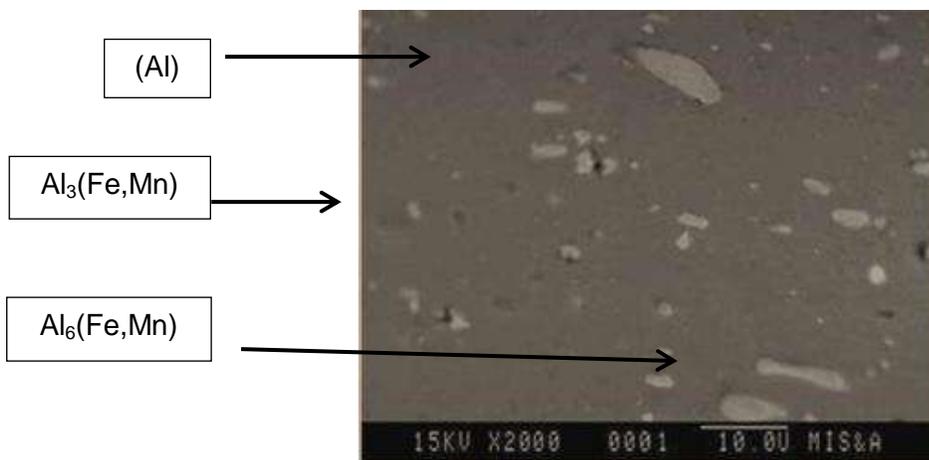


Figura 12. Microestructura de la aleación AA8006. La fase continua es aluminio primario (Al) y precipitados del tipo $Al_3(Fe,Mn)$ y $Al_6(Fe,Mn)$. [3].

2.4. Aleación AA8011.

Esta aleación contiene nominalmente 0,7% Si y 0,8%Fe. Como se observa de la Figura 13, del diagrama de fases pseudobinario Al-Si con 1% Fe, la secuencia de la solidificación de esta aleación pasa sucesivamente por los siguientes estados:

$L \rightarrow L+(Al) \rightarrow L+(Al)+Al_3Fe \rightarrow (Al)+Al_3Fe+Al_8Fe_2Si \rightarrow (Al)+Al_3Fe_2Si$ (hasta 500 °C).

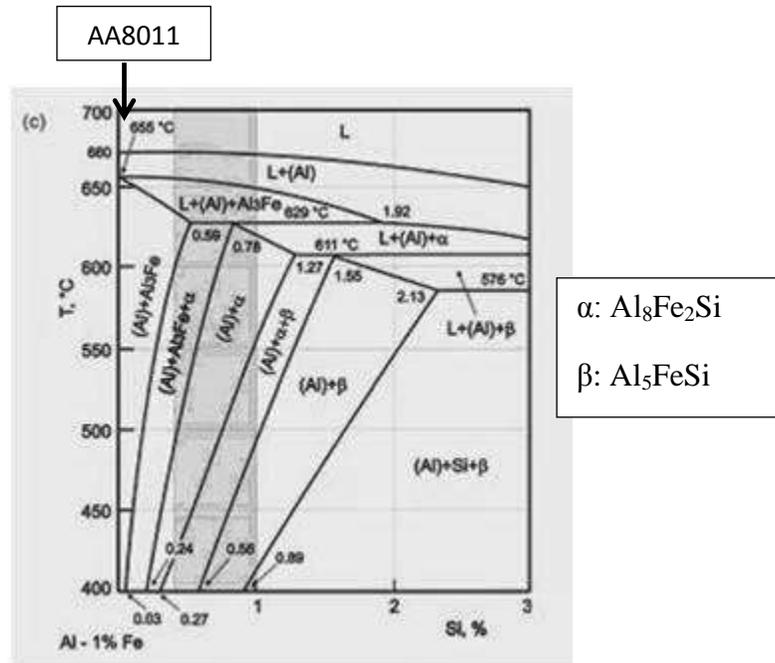


Figura 13. Diagrama de fases pseudobinario de las aleaciones Al-Fe-Si para 1%Fe. La fase α es $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ y β es Al_5FeSi . [6]

Según se desprende de la Figura 13, la aleación AA8011 presenta una estructura compuesta de aluminio primario $\alpha(\text{Al})$ y precipitados del tipo Al_3Fe , Al_5FeSi y $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$. Normalmente se observa el último compuesto intermetálico. Esto se observa en la Figura 14.

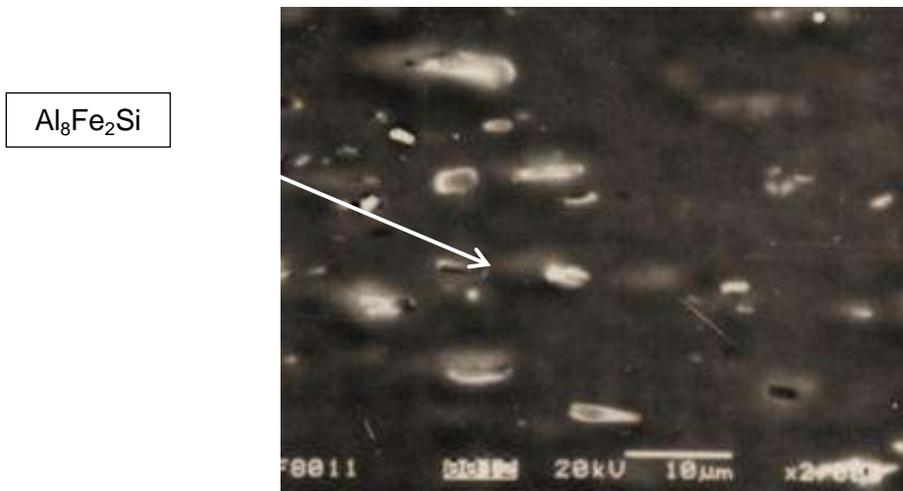


Figura 14. Microestructura de la aleación AA8011. El precipitado es del tipo $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$. [4]

2.5. Aleación AA6082.

Esta aleación contiene nominalmente 1,0% Si, 0,5%Mn y 0,9% Mg. La metalurgia básica de esta aleación se aprecia en el diagrama de fases del tipo Al-Mg₂Si, ya que ésta es la fase que se forma en las aleaciones que contienen Al-Mg-Si. Para la aleación AA6082 se espera un contenido de Mg₂Si de 1,4%. Este valor está por debajo del límite máximo de solubilidad, que es de 1,85% a 595°C. La secuencia de solidificación de la aleación, como se muestra en la figura 15 es: L→L+(Al)→(Al)→(Al)+Mg₂Si.

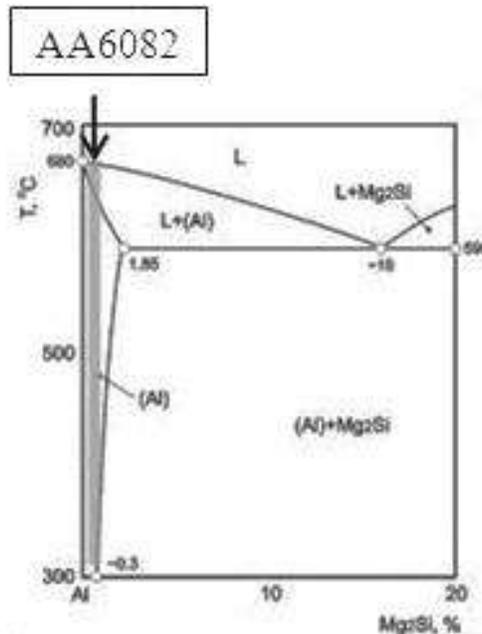


Figura 15. Diagrama de fases correspondiente a la aleación AA6082. Se espera un contenido de 1,4% Mg₂Si [6]

Esta aleación se somete a un tratamiento de endurecimiento por precipitación. Para ello se calienta a una temperatura entre 540-570 °C por 4 – 6 horas y disolver el precipitado Mg₂Si, luego se enfría en agua helada para retener la fase (Al) y, después de un posterior envejecimiento a temperaturas entre 200 ° y 350 °C se reprecipita la fase Mg₂Si en la matriz de (Al).

El silicio de la matriz que no forma Mg₂Si, cercano a 0,3% Si, forma un precipitado del tipo Al₁₅Mn₃Si₂. Esto se ilustra en la Figura 16.

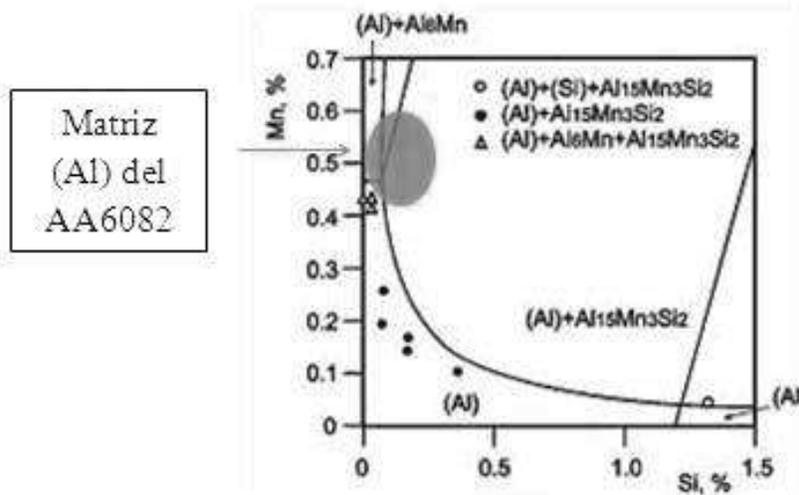


Figura 16. Probable rango de composiciones de la matriz (Al) de la aleación AA6082. Los puntos corresponden a los datos experimentales y las líneas sólidas a las calculadas. [2]

En conclusión, las fases que se esperan de la aleación AA6082 son: (Al) primaria, Mg₂Si (producto del envejecimiento por precipitación) y Al₁₅Mn₃Si₂.

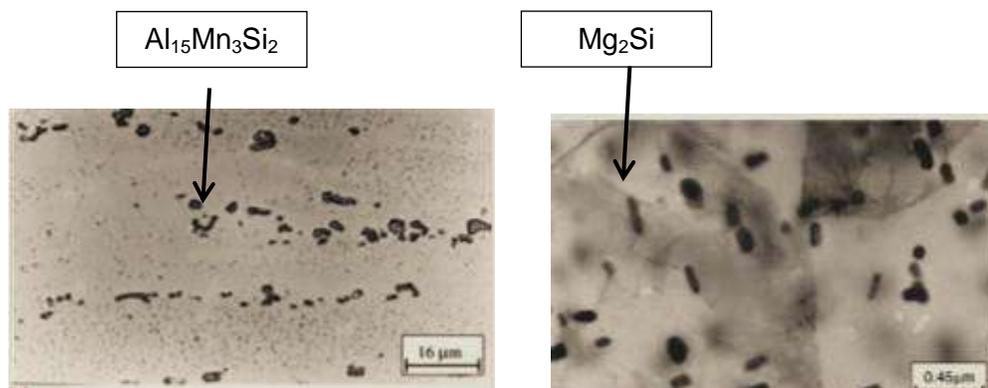


Figura 17. Microestructura de la aleación AA6082 homogenizada a 570 °C /6 horas con enfriamiento en agua (izquierda) y luego envejecida (derecha). Los precipitados de Al₁₅Mn₃Si₂ no se disuelven con el tratamiento de homogenización. Se observa la aparición de precipitados de Mg₂Si de 100 nm en la muestra envejecida.

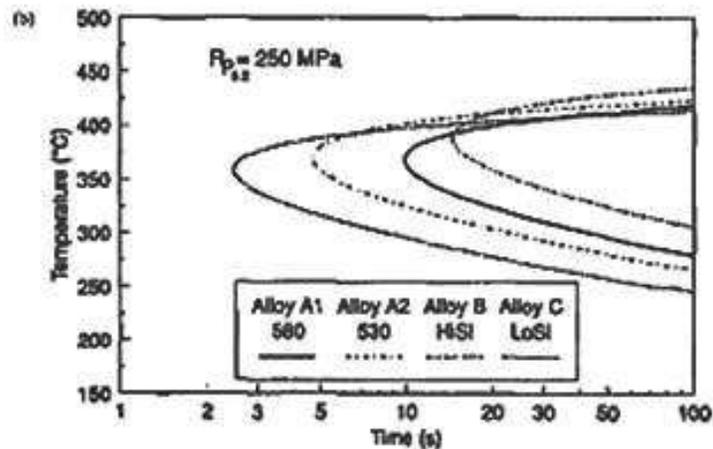


Figura 18. Envejecimiento artificial de la aleación AA6082 para conseguir el 90 % de la resistencia a la cedencia de 250 MPa. [5]

2.6. Aleación AA6061

Esta aleación contiene, en promedio, 0,6% Si, 1,0 % Mg, 0,30% Cu y 0,7% Fe. Es una aleación tratable térmicamente por ser de la serie 6XXX y tener como elementos principales el Mg y el Si. Según la experiencia y la práctica industrial, se logran los mejores desempeños y la máxima dureza con 0,75% Si y 1% Mg. Esta aleación tiene mayor resistencia que la AA 6082 gracias a su contenido de cobre más alto y a su contenido de hierro que le garantizan un tamaño de grano más refinado.

Una de las principales aplicaciones de esta aleación, gracias a su elevada resistencia a la tracción y a su excelente maquinabilidad y apariencia, se utiliza en la industria militar para la fabricación de soportes de culatas de fusil, en la industria del plástico para moldes prototipos ó para inyección, soplado e inyección y en general para portamoldes y portatroqueles, entre otros usos. Entre otras ventajas se encuentran su excelente conductividad, baja densidad, nula toxicidad y que no produce chispa y excelente resistencia a la corrosión.

En el estado 6061-T6, es decir, solubilizado y envejecido artificialmente, dicha aleación ofrece las siguientes ventajas: Resistencia superior a la de las aleaciones 6063, óptima conformación en frío y excelentes características para soldadura fuerte y al arco. La cinética del envejecimiento de la aleación AA6061 puede observarse en la Figura 4.

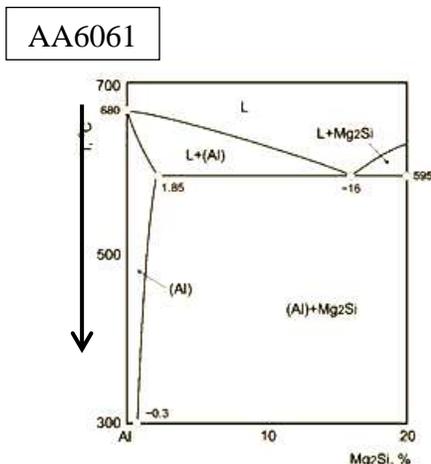


Figura 19. Diagrama de fases correspondiente a la aleación AA6061.

La característica esencial de este diagrama reside en que el aluminio y el compuesto Mg_2Si forman un sistema cuasi-binario que separa el diagrama ternario en dos partes. Cada una de estas partes contiene un eutéctico definido como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Eutécticos del sistema Al-Mg-Si

Eutéctico	Temperatura °C	Mg %	Si %
$Liq=\alpha(Al)+Mg_2Si+Si\dots$	556	4,97	14
$Liq=\alpha(Al)+Mg_2Si+ \beta Al_3Mg_2\dots$	450	33,5	0,2

Dada las características propias de esta aleación, no existe compuesto ternario alguno, sino una mezcla de Mg_2Si y Al_3Mg_2 . El compuesto Mg_2Si , inicialmente considerado como un compuesto iónico, según las investigaciones recientes, se comporta como un semiconductor. La solubilidad del compuesto Mg_2Si en aluminio varía de una manera muy importante, en función de la temperatura, por un lado y del exceso de magnesio, por otro (ver siguiente cuadro). Esto se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Solubilidad del Mg_2Si en función de la temperatura y del exceso del magnesio en la matriz

Temperatura °C	Exceso de magnesio				
	0%	0,20%	0,40%	0,80%	1%
595	1,85				
535	1,2	1,15	0,97	0,67	0,55
500	1,05	0,85	0,69	0,45	0,36
400	0,53	0,35	0,2	0	0
300	0,3	0,16	0,02	0	0
200	0,25	0,05	0	0	0

Por el contrario, el silicio no tiene efecto apreciable sobre esta solubilidad. Sin embargo, en la práctica de la fundición de estas aleaciones, se adiciona un exceso de silicio, con el objeto de evitar todo exceso de magnesio y asegurar de esta manera la solubilidad de todo el Mg_2Si y garantizar las máximas propiedades mecánicas y físicas de la aleación. Si la aleación contiene una baja concentración de

aleantes de Mg o Si, entonces el compuesto puede ser disuelto durante el tratamiento térmico. Si el porcentaje está en exceso el precipitado se distinguirá por la presencia de una estructura Widmanstätten. Por esta razón, el ajuste de la composición es vital para asegurar que no existe exceso de Mg o Si.

Puesto que dicha aleación contiene 0,7 %Fe, aparecen precipitados ternarios del tipo $\text{Fe}_3\text{SiAl}_{12}$ (cúbica) o $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{Al}_9$. (mono-clínica) formadas de la reacción eutéctica. Los precipitados claros y oscuros son del tipo $\text{Fe}_3\text{SiAl}_{12}$. Con bajos contenidos de silicio casi siempre el hierro está presente como Al_3Fe . Con el aumento de contenido de silicio entonces aparece la fase -Al-Fe-Si.

La microestructura de la aleación 6061 T6, se caracteriza por exhibir la fase alfa (más clara) con presencia de precipitados del tipo Fe_3SiAl_2 . Esto se observa en las Figuras 20 y 21.



Figura 20. Microestructura de un aluminio 6061 T6 (50X).



Figura 21. Aleación de Aluminio 6061 H0, 500X.

3. Efecto de la deformación plástica en las aleaciones estudiadas.

Las aleaciones citadas se comportan de forma diferente en cuanto a su respuesta a la deformación en frío. Las aleaciones endurecibles AA2024 y AA6061 deben deformarse en estado solubilizado. Véase la Figura 22.

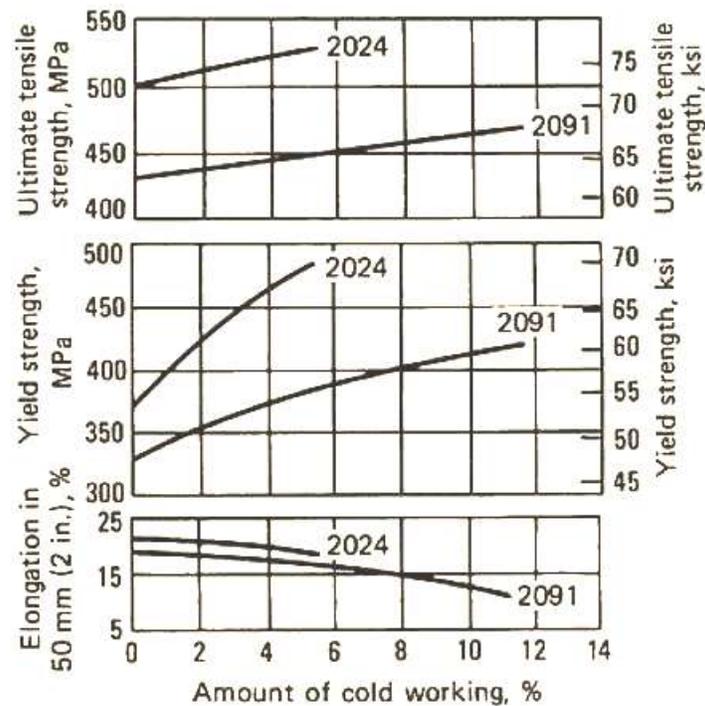


Figura 22. Propiedades de tensión de las aleaciones AA2024(AlCuMg) y AA2091 (Al-Li) en función de la deformación antes del envejecimiento natural del AA2024 [1]

Todas las aleaciones citadas se comportan diferentes según el grado de deformación plástica. La aleación AA8011 se endurece menos que el AA3003 pero exhibe mucha mayor elongación para 60% (aproximadamente 1.8% y 0.7% respectivamente) ó más de deformación.

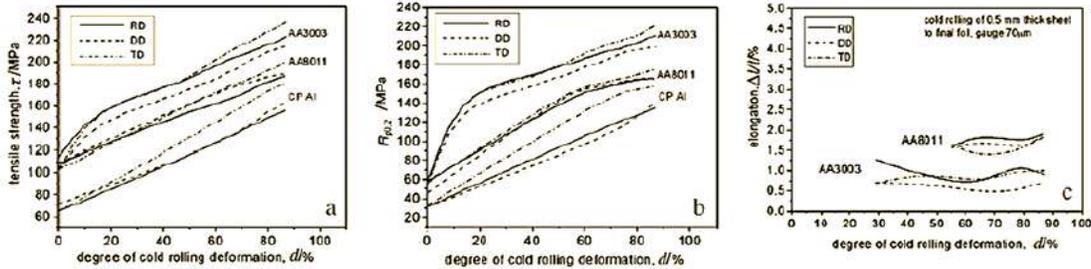


Figure 2: Dependence of (a) yield stress, (b) tensile strength and (c) elongation on the degree of cold-rolling deformation. Alloys: AA8011, CP Al, AA3003. RD – rolling direction, DD – diagonal direction, TD – transverse direction

Figura 23. Influencia del grado de deformación plástica en la resistencia a la tracción, fluencia y alargamiento de las aleaciones AA3003 y AA 8011 [5]

La aleación AA6082 por ser endurecible por precipitación, no se aconseja para grandes deformaciones plásticas y puede presentar problemas en el momento de la embutición.

Se anexan las propiedades mecánicas de una empresa fabricante de dichas aleaciones. Tabla 4. [7]

Tabla 4. Propiedades mecánicas de diversas aleaciones extruidas y laminadas [10]



5- Mechanical properties

Alloy	Temper → Gauge μm	Soft / H21		H18		H19		H22		H24 / H25		H26 / H28	
		UTS N/mm ²	Min % Elg										
AA1200	30-49	60-105	5										
	50-79	60-105	10										
	80-149	60-105	18										
	150-300	60-105	25										
AA3003	30-40	90-130	10	180-230	2	270-350	2	130-155	9	140-170	8	150-185	6
	41-89	90-130	10	180-230	2	270-350	2	130-155	14	140-170	10	150-185	8
	90-175	90-130	20	180-230	2	270-350	2	130-155	16	140-170	12	150-185	10
	175-195	90-30	20										
AA3005	40-45	136-157	10	261-315	1	320-370	1						
	50-60	136-157	12	261-315	1	320-370	1					180-235	4
	61-90	136-157	15	261-315	1	320-370	1	155-175	12			180-235	4
	91-200	136-157	17	261-315	1	320-370	1					180-235	4
AA8026	40-59	120-140	10			250-330	1					180-235	4
	60-69	120-140	13			250-330	1					180-235	4
	70-89	120-140	15			250-330	1					180-235	4
	90-180	120-140	18			250-330	1					180-235	4
AA5006	40-59	142-167	11									180-235	4
	60-79	142-167	13									180-235	4
	80-94	142-167	16									180-235	4
	95-200	142-167	17									180-235	4
AA8006	30-40	85-140	8										
	41-89	85-140	10										
	90-175	85-140	16										
AA8011	50-69	89-117	12										
	70-99	89-117	15										
	100-195	89-117	17										



En dicha tabla se encuentra que las propiedades entre las aleaciones AA8006 y AA 8011 son muy diferentes, en condición H21 (recocida). La mayor resistencia mecánica la exhibe la aleación AA8011, seguida por la AA3003 y por último la AA 8011 y en ese mismo orden se encuentra los menores valores de elongación en la AA8006.

4. CONCLUSIONES

La aleación AA8011 presenta mejores características de procesabilidad con respecto al AA3003. A mayores deformaciones plásticas presentan más altos valores de alargamiento.

Las aleaciones AA2024 y AA6082 son endurecidas por un tratamiento de envejecimiento por precipitación. No se recomienda para embutición.

La aleación 8006 puede ser una alternativa en casos de solicitaciones de alta resistencia a la temperatura ya que posee mayor resistencia mecánica y menor ductilidad que la AA 8011.

5. BIBLIOGRAFÍA

1. American Society for Metals, Casting, Vol. 15, 1992.
2. Du, Q; Eskin, D.G. and Katgerman, L. "Modeling Macroseggregation during Direct-Chill Casting of Multicomponent Aluminum Alloys". Metallurgical and Materials Transactions A. Volume 38A, p. 180, January 2007.
3. R.E.D. Mann, R.L. Hexemer Jr., I.W. Donaldson, D.P. Bishop. "Hot deformation of an Al-Cu-Mg powder metallurgy alloy". Materials Science and Engineering A. 528 5476-5483, 2011.
4. J. Zander and R. Sandström. "One parameter model for strength properties of hardenable aluminium alloys". Materials and Design. 29 1540-1548, 2008.
5. G.F. Vander Voort. "Atlas of time-temperature diagrams for Non ferrous alloys. ASM International". USA, 1991
6. Nikolay A. Belov, Dmitry G. Eskin and Andrey A. Aksenov. "Multicomponent Phase Diagrams Applications for Commercial Aluminum Alloys". Elsevier Ltd. ISBN: 978-0-08-044537-3, 2005.
7. Xing, Z., Kang, S. and Kim, H. "Softening behavior of AA8011 alloy produced by cumulative roll bending process". Scripta Materialia. 45 , 567-604, 2001.
8. American Society for Metals. "Properties and Selection. Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials". Vol. 2, 1992.
9. Delijic, K., Asanovic, V. and Radonjic, D. "Mechanical and corrosion properties of AAAA8011 Sheets and Foils". Materiali in Tehnologije. 40 - 3. p. 83-88, 2006
10. Moldovan, P. and Popescu, G. "Microstructure of AA 8006 Alloy Foils. Journal of Advanced Materials. Special Edition No. 2, 95, January 2007.
11. http://aluform.se/PDF/Container_foil_Novelis_CTF04.pdf
12. G. Totten and D. Mackenzie. "Handbook of Aluminum. Alloy Production and Materials Manufacturing". Vol. 2.