

Bibliografía

- [1].- ASM Handbook, vol 2, 10ª. Edición, ASM International pp. 3-5, 21-30
123, 135
- [2].- Mc. Graw Hill "Encyclopedia of Science and Technology" 1 (1971), 326-334
- [3].- A. H. White "Engineering Materials", Mc. Graw Hill (1948), pp. 320-326
- [4].- D.R. Askeland "La Ciencia e Ingeniería de los Materiales", G.E.
Iberoamérica, (1987), pp. 235-240
- [5].- J.E. Gruzleski, B.M. Closset "The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon
Alloys", AFS, Inc (1990), pp. 13-33, 149-153, 219-222
- [6].- L. Mondolfo "Aluminum Alloys: Structure and Properties", Butterworth,
London (1986)
- [7].- J.E. Hatch "Aluminum: Properties and Physical Metallurgy", ASM , Metals
Park (1984)
- [8].- E. Velasco "Estudios Microestructurales en una Aleación de Aluminio-
Silicio Tipo A319, Tesis Doctoral, UANL (1997), pp. 59-65, 78-81
- [9].- K. Radhakrishna, S. Seshan y M.R. Seshadri "Dendrite Arm Spacing in
Aluminum Alloy Casting" AFS Transactions (80-87) pp. 695-702
- [10].- B.P. Bardes y M.C. Flemings "Dendrite Arm Spacing and Solidification
Time in a Cast Aluminum-Copper Alloy" AFS Transactions (66-74),
pp.406-412
- [11].-M.C. Flemings, T.Z. Kattamis, B.P. Bardes "Dendrite Arm Spacing in
Aluminum Alloys" AFS Transactions pp. 501-506
- [12].- J.L. Carbajal et. al., "Study of the relationship Between Strontium and
Solidification Rate in the Modification of a 319 Type Aluminum Alloy
using a Directional Solidification Technique" (Conference Proceedings
of the 3rd. International Conference on Molten Aluminum Processing),
AFS, (Nov 1992), pp. 141-177
- [13].-D. Apelian, J.A. Cheng "Effect of Processing Variables on the grain
Refinement and Eutectic Modification of Aluminum-silicon Foundry Alloys"
(Artículo presentado en The International Molten Aluminum Processing,
City of Industry California, USA, (17-18 Febrero 1986)

- [14].- J.A. Odegard "The Static and Dynamic Mechanical Properties in Aluminum Casting alloys" Report No. STF 34 A91107, SINTEF Norway (1991) pp35-43
- [15].- D.K. Young, B.T. Dunville, W.C. Setzer , F.P. Koch "Light Metals" editado por E.L. Rooy (1991) p. 1115, Metal Soc. of AIME, Warrendale, PA
- [16].- P.S. Mohanty, J.E. Gruzleski " Grain Refinement Mechanisms of Hypoeutectic Al-Si Alloys", Acta Mater. **44** (1996) 3749-3760
- [17].- R.W. Ruddle " Grain Refinement" Proceedings of the AFS/CMI Conference (Dec 11-12 1984) Rosemont, Illinois pp. 77-100
- [18].- A. Pacs "Aluminum Alloy Casting and Process of Making the Same", US Patent 1, 860, 947 (1932)
- [19].- J. Shhr " Casting Alloy AP-33", Rev. Aluminum, Vol 9, pp. 1669-1680 (1932)
- [20].- I.J. Polmear "Light Alloys", U.K. Edward Arnold, (1981)
- [21].- I.G. Davis, J.M. Denis, A. Hellawell, Met. Trans, (1970) pp. 275-280
- [22].- B. Gallois, G.K. Sigworth "An analysis of Silicon Eutectic Modification" Proceedings of the AFS/CMI Conference (Dec 11-12 1984), Rosemont Ill, pp.101-109
- [23].- ASM Handbook Vol 15 "Castings" (1990) pp. 74-151
- [24].- J. Campbell "Castings", Butterworth-Heinemann (1991) pp. 175-208
- [25].- ASM Handbook, Vol 4 "Heat Treating" ASM International, (1991) pp. 841-861
- [26].- D. Zalensas "Aluminum Casting Technology" 2nd. Edition, AFS, USA (1993), pp. 66,67, 287-301
- [27].- D.L. Zhang "Precipitation of Excess Silicon During Heat Treatment of Cast Al-7 wt% Si – 0.4 wt % Mg Alloy" Materials Science Forum Vol 5 (1996) pp. 217-222
- [28].- Ch. R. Brooks "Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous alloys, ASM (1982) p 95.

Tablas

Tabla 3.1 Propiedades del Aluminio

Símbolo	Al
No. atómico	13
Peso atómico	26.9815
Red espacial	Cúbica de Caras Centradas
Diámetro atómico (Å)	2.8
Parámetro de red (Å)	4.04
Densidad (g/cm ³)	2.7
Punto de fusión (C)	660
Módulo de Elasticidad (Gpa)	70.0
Calor específico promedio 0-100C (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	917.0
Conductividad térmica 20-100 C (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	238
Coefficiente de expansión térmico 0-100C (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	23.5
Resistividad eléctrica a 20 C (μ ohm·cm ⁻¹)	2.67

Tabla 3.2 Aleaciones de Aluminio para Trabajo Mecánico [1]

Aluminio, ≥ 99.00%	1xxx
Aleaciones de aluminio agrupados por el (los) principal(es) elementos de aleación:	
Cobre	2xxx
Manganeso	3xxx
Silicio	4xxx
Magnesio	5xxx
Magnesio y silicio	6xxx
Cinc	7xxx
Otros elementos	8xxx
Serie fuera de uso	9xxx

Tabla 3.3 Otras clasificaciones para las aleaciones de aluminio, condición y método de fabricación [1]

Aleaciones de aluminio Para rotor (aluminio puro)		Aleaciones estándar para propósitos generales
Aluminio puro 99.996%	-18°C	
Aleación EC 99.45% Al, similar a la aleación 150.0	-18°C	
222.0	F(P) O(S) T61(S)	208.0 F(S) 308.0 F(P) 319.0 F(S) F(P) 324.0 F(P) 238.0 F(P) 240.0 F(S) 242.0 O(S) T77(S) T571(P) T61(P)
224.0	T62(S)	295.0 T4(S) T62(S)
238.0	F(P)	296.0 T4(P) T6(P) T62(S)
240.0	F(S)	308.0 F(P) 319.0 F(S) F(P) 324.0 F(P) 333.0 F(P) T5(P) T6(P) T7(P)
242.0	O(S) T77(S) T571(P) T61(P)	336.0 T551(P) 354.0 F(P)
Aleaciones Premium (alta resistencia y tenacidad)		
201.0	T6(S) T7(P)	355.0 T51(S) T6(S) T61(S) T7(S) T6(P)
206.0	T4(S)	356.0 T51(S) T6(S) T7(S) T6(P)
204.0	T4(S)	A356.0 T6(S) 357.0 T6(S) A357.0 T6(S)
204.0	T6(S)(P)	358.0 T6(S)
224.0	T62(S)	359.0 T6(S)
295.0	T4(S) T62(S)	392.0 F(P) 443.0 F(S) O(S) F(D) F(P)
296.0	T4(P) T6(P) T62(S) T61(S)	
C355.0	T61(S)	
A356.0	T6(S)	
A357.0	T6(S)	
Aleaciones para pistones y de elevadas temperaturas		
332.0	T5(P)	
360.0	F(D)	
A360.0	F(D)	
364.0	F(D)	
380.0	F(D)	
A380.0	F(D)	
384.0	F(D)	
390.0	F(D) T5(D)	

Tabla 3.3 (continuación)

Aleaciones para fundición
mediante dado

360.0	F(D)
A360.0	F(D)
364.0	F(D)
380.0	F(D)
A380.0	F(D)
384.0	F(D)
390.0	F(D)
	T5(D)
413.0	F(D)
A413.0	F(D)
443.0	F(S)
	O(S)
	F(D)
518.0	F(D)
A535.0	F(D)

Aleaciones aluminio-magnesio

511.0	F(S)
512.0	F(S)
513.0	F(P)
514.0	F(S)
518.0	F(D)
520.0	T4(S)
535.0	F(S)
A535.0	F(D)
B535.0	F(S)

Aleaciones aluminio-cinc
(Al-Zn-Mg y Al-Zn)

705.0	F(S)
707.0	F(S)
710.0	F(S)
711.0	F(P)
712.0	F(S)

Aleaciones para baleros
(aluminio-estaño)

713.0	F(S)
850.0	T5(S)
851.0	T5(S)
852.0	T5(S)

S, vaciado en arena;
P, en molde permanente
D, en dado

Tabla 3.4 Composición de las aleaciones Al-Si más comunes para fundición (a) [5].

Aleación	Método(b)	Elementos (% en peso)					
		Si	Cu	Mg	Fe	Zn	Otros
319.0	A, P	6.0	3.5	<0.1	<1	<1	
332.0	P	9.5	3.0	1	1.2	1.0	
355.0	A, P	5.0	1.25	0.5	<0.06	<0.35	
A356.0	A, P	7.0	<0.2	0.35	<0.2	<0.1	
A357.0	A, P	7.0	<0.2	0.55	<0.2	<0.1	0.05 Be
380.0	D	8.5	3.5	<0.1	<1.3	<3.0	
383.0	D	10.0	2.5	0.1	1.3	3.0	0.15 Sn
384.0	D	11.0	2.0	<0.3	<1.3	<3.0	0.35 Sn
390.0	D	7.0	4.5	0.55	<1.3	<0.1	<0.1 Mg
413.0	D	12.0	<0.1	<0.1	<2.0		
443.0	A, P	5.25	<0.3	<0.05	<0.8	<0.5	

(a) El resto: Aluminio y otras impurezas

(b) A, vaciado en arena; P, en molde permanente;

D, vaciado en dado a alta presión

Tabla 3.5 Características de las aleaciones Al-Si para fundición (a) [5].

	Aleación								
	319.0	332.0	355.0	A356.0	A357.0	380.0	390.0	413.0	443.0
Método de vaciado	A, P	P	A,P	A,P	A,P	D	D	D	P
Resistencia a grietas	2	1	1	1	1	2	2	1	1
Hermeticidad	2	2	1	1	1	1	2	2	1
Fluidez	2	1	1	1	1	2	2	1	2
Tendencia a la contracción	2	2	1	1	1	-	-	-	1
Resistencia a la corrosión	3	3	3	2	2	5	2	2	2
Maquinabilidad	3	4	3	3	3	3	4	4	5
Facilidad de soldado	2	2	2	2	2	4	2	4	1

(a) Niveles: 1, la mejor; 5, la peor

A, vaciado en molde de arena

P, en molde permanente

D, en dado a alta presión

Tabla 3.6 Variación de la temperatura eutéctica de algunas aleaciones de aluminio europeas para fundición con especificaciones estándar de Cu-Mg-Fe [5].

Aleación	Cu-Mg-Fe Mínima Especificación		Cu-Mg-Fe Máxima Especificación	
	Sin Modificar °C	Modificado °C	Sin Modificar °C	Modificado °C
AlSi5Cu3Mg	558	548	555	545
AlSi6Cu2	563	553	559	549
AlSi7Cu3Mg	560	550	556	546
AlSi9Cu	568	562	562	560
AlSi9Cu3	568	559	564	557

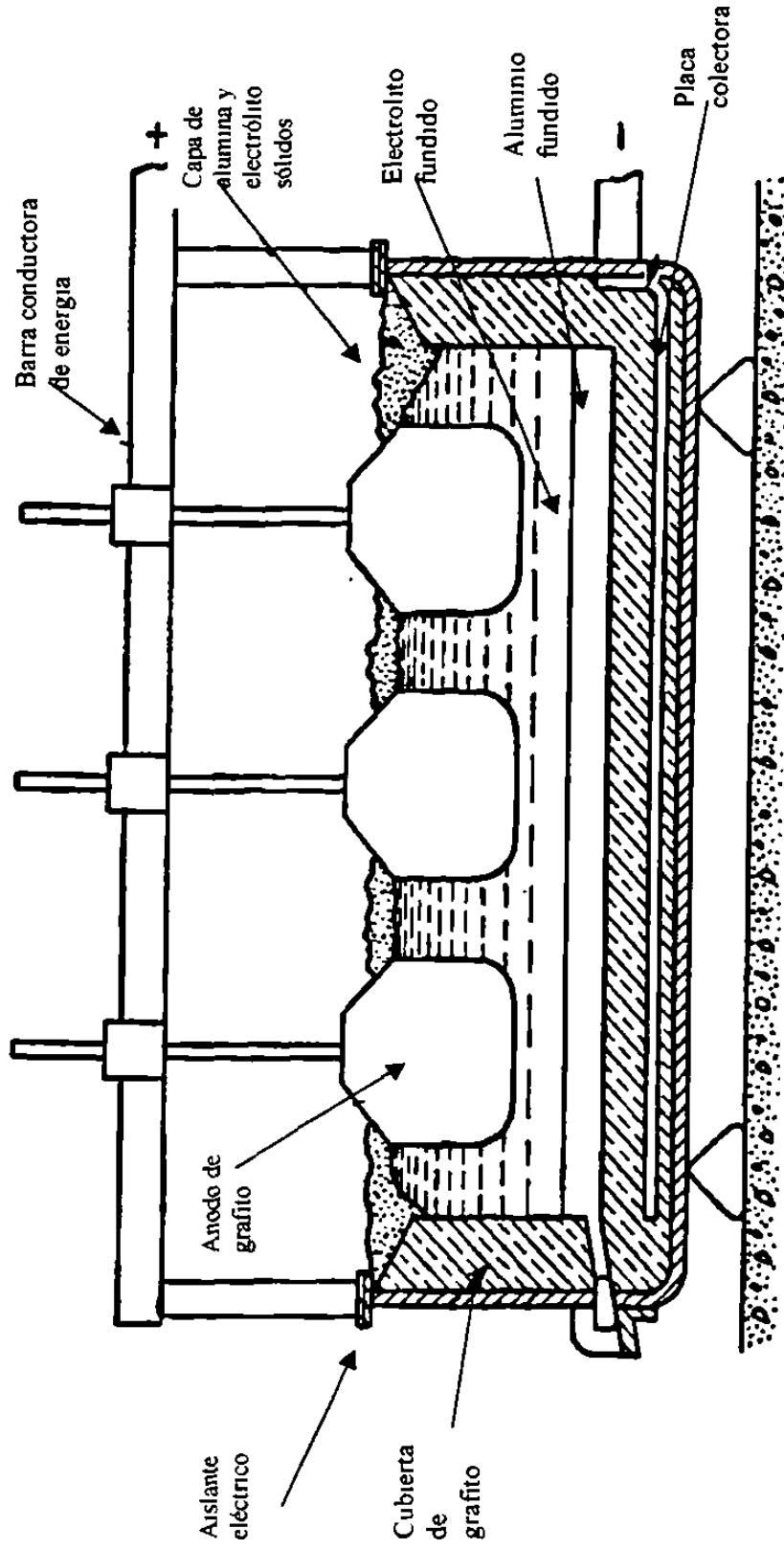


Fig 3 1 Sección transversal de la celda electrolítica para la producción de aluminio [3]

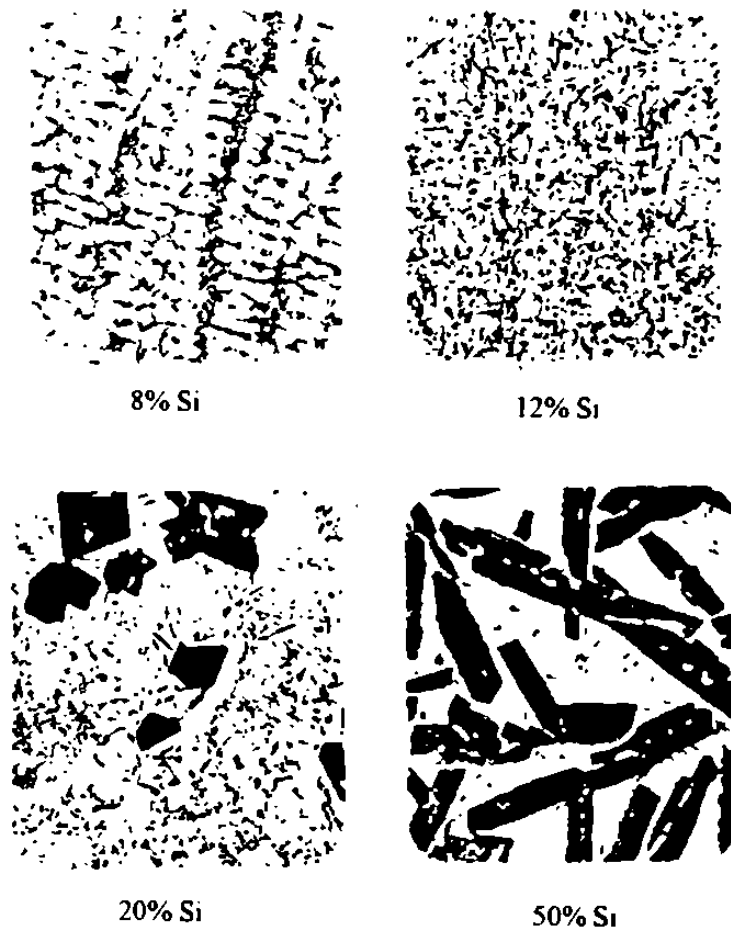


Fig. 3.2 Microestructuras de aleaciones de aluminio en función del contenido de silicio [1].

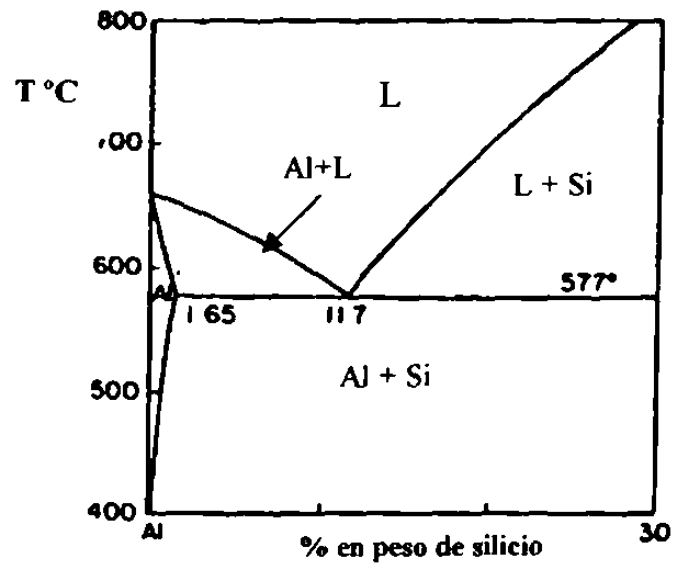


Fig. 3.3 Diagrama de fases binario Al-Si [5]

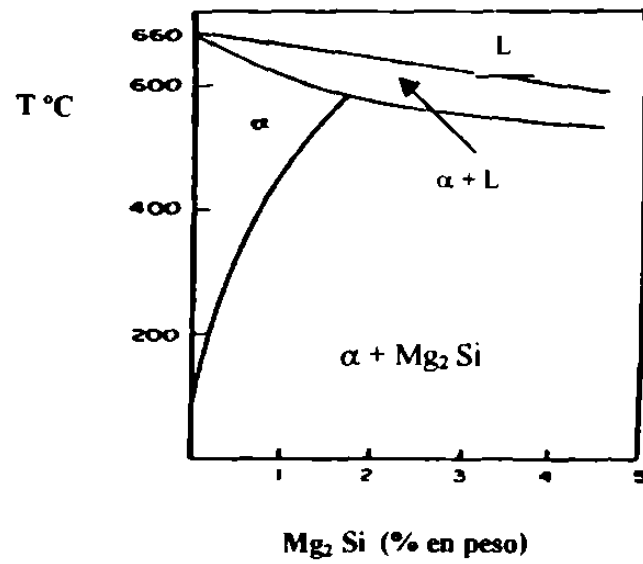
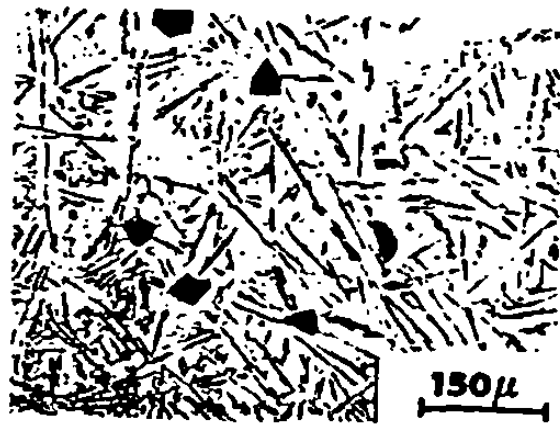


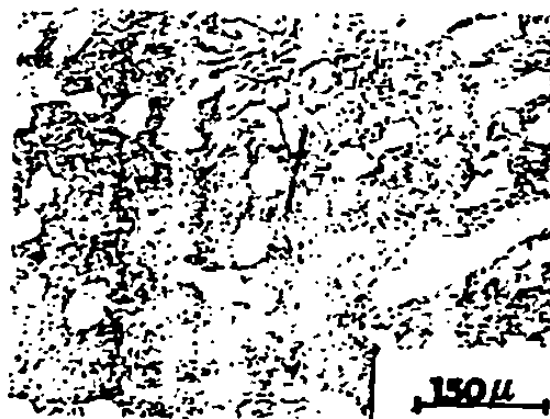
Fig. 3.4 Diagrama de fase pseudo binario Al-Mg₂Si [5]



a) no modificada



b) modificada parcialmente con 0.01 % de Sr



c) completamente modificada con 0.02 % Sr

Fig. 3.5 Microestructuras de la aleacion 413 (x 100) [5]

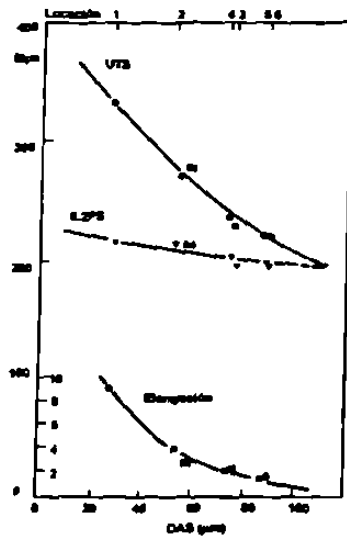


Fig. 3.6 Variación de las propiedades mecánicas en función del espaciamento dendrítico en una aleación Al-7Si-0.4Mg [8].

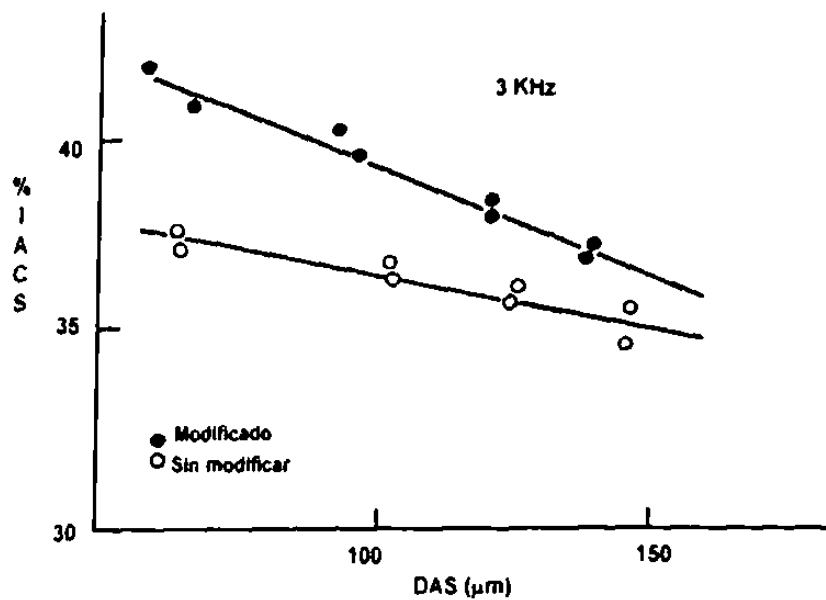


Fig. 3.7 Variación de la conductividad eléctrica en función del espaciamento dendrítico en una aleación Al-Si modificada y sin modificar [8]

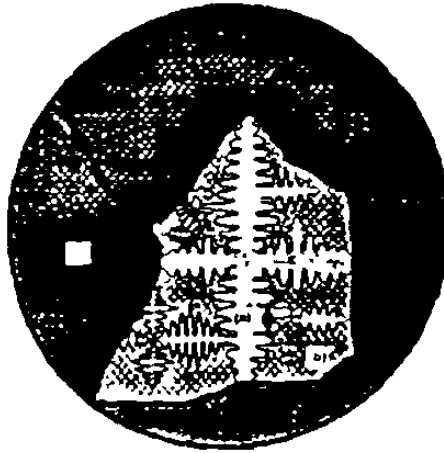


Fig. 3.8 Principales características microestructurales
 a) espaciamento dendrítico secundario, b) fase de silicio eutéctica, c) tamaño de grano

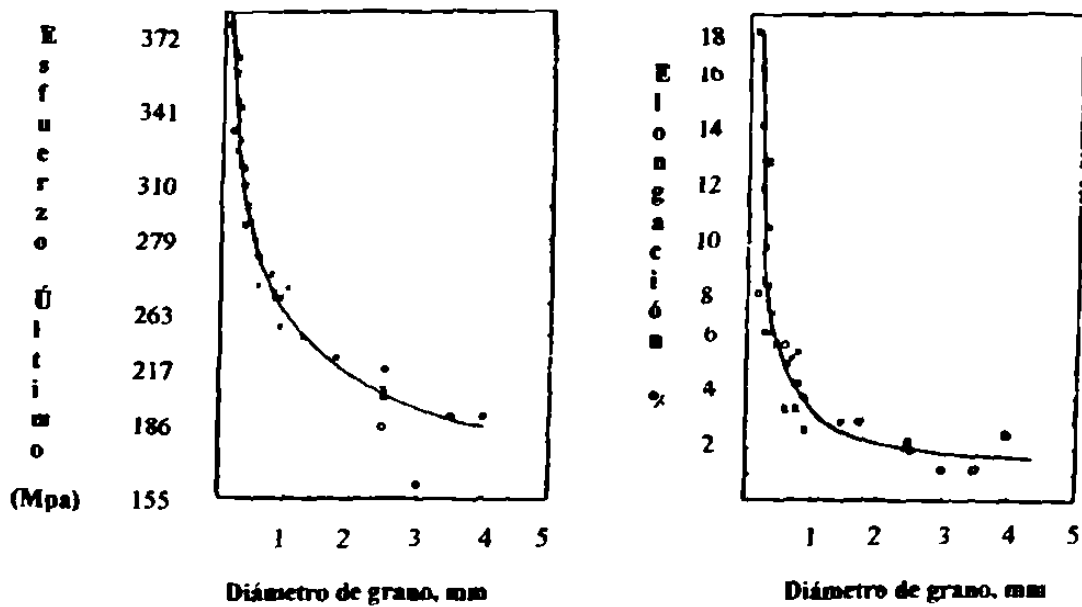


Fig. 3.9 Variación de las propiedades mecánicas en función del tamaño de grano para la aleación Al-4.5%Cu [17]

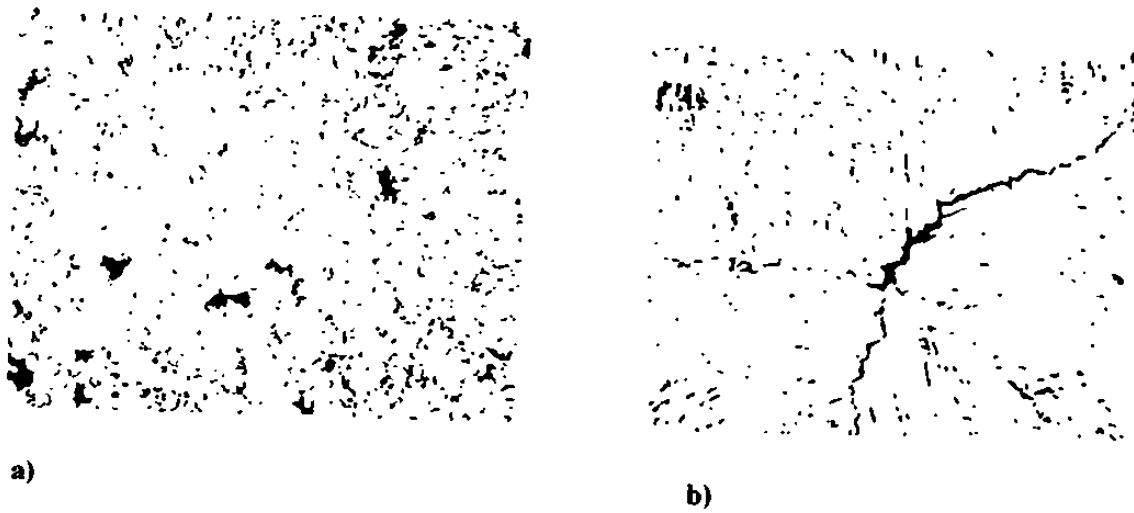


Fig. 3.10 Distribución de la porosidad en una aleación de aluminio-cobre 4.5%
a) tamaño de grano 0.25 mm y porosidad de 0.8%; b) tamaño de grano
4 mm y porosidad de 0.8% [17].

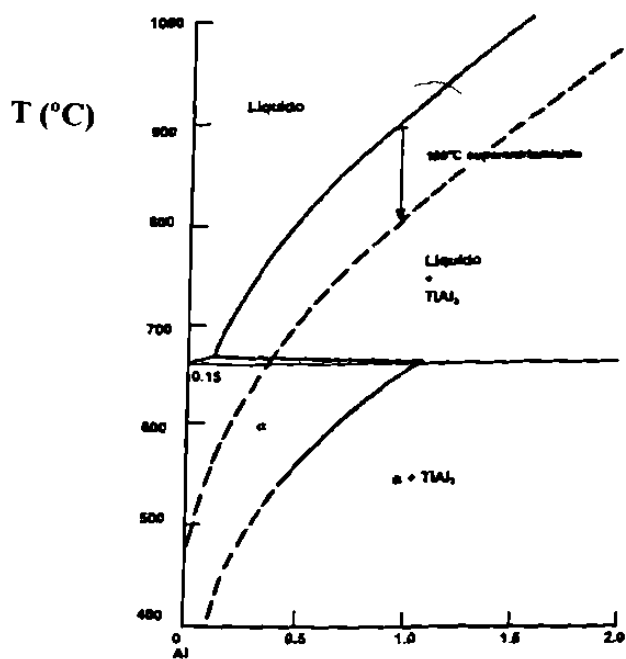


Fig 3.11 Diagrama de fases Al-Ti mostrando la porcion rica en Al [8].

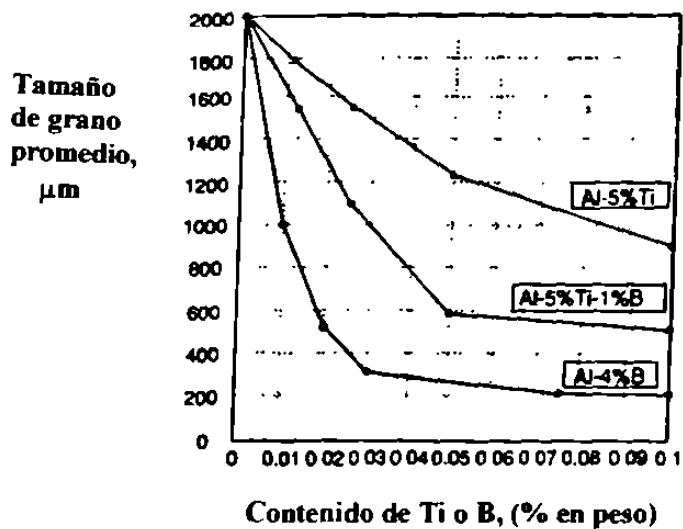


Fig. 3.12 Refinamiento de grano en la aleación A356 con las aleaciones maestras Al-Ti, Al-5Ti-B y Al-B [16]

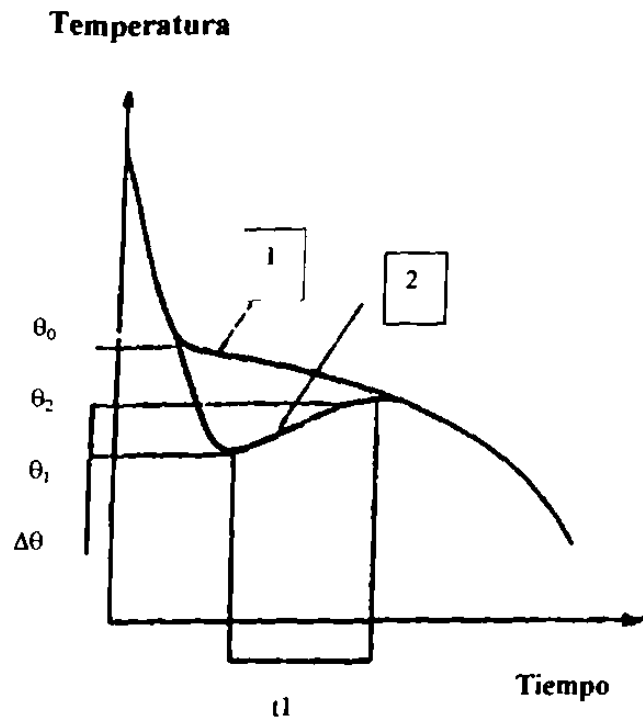


Fig. 3.13 Curva de enfriamiento al inicio de la solidificación [5].

Curva 1 : aleación con refinamiento de grano

Curva 2 : aleación sin refinamiento de grano

θ_0 = temperatura al inicio de la solidificación de la aleación refinada

θ_1 = temperatura de inicio de la solidificación en la aleación sin refinar

$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$; superenfriamiento aparente

t_1 : período de este superenfriamiento

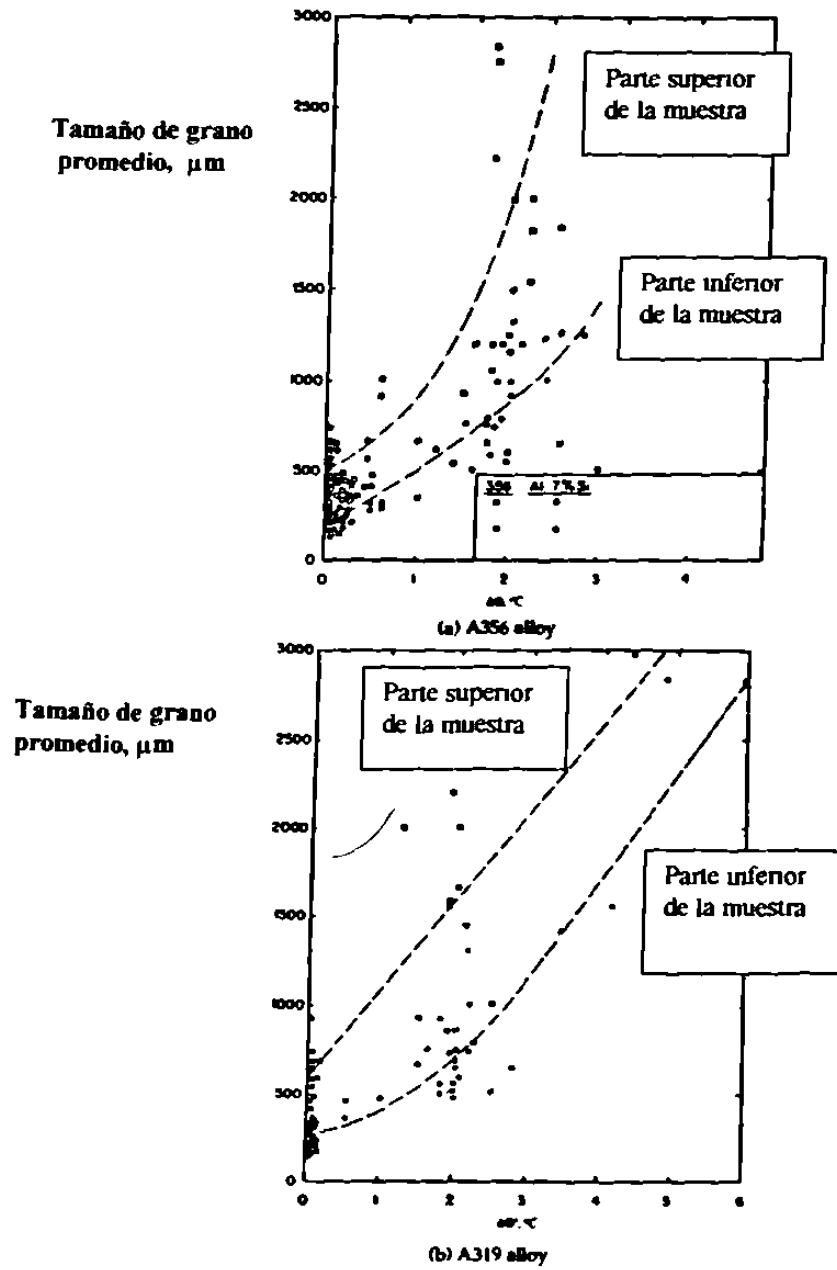


Fig. 3.14 Tamaño de grano promedio en función de $\Delta\theta$ [5].

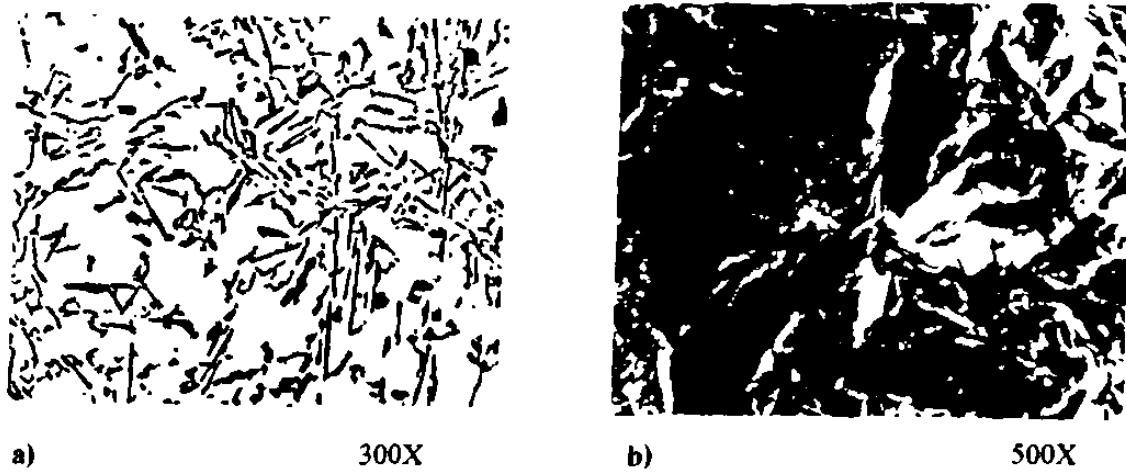


Fig. 3.15 Estructura de la aleación eutéctica Al-Si sin modificar; a) microestructura, b) superficie de fractura [22].

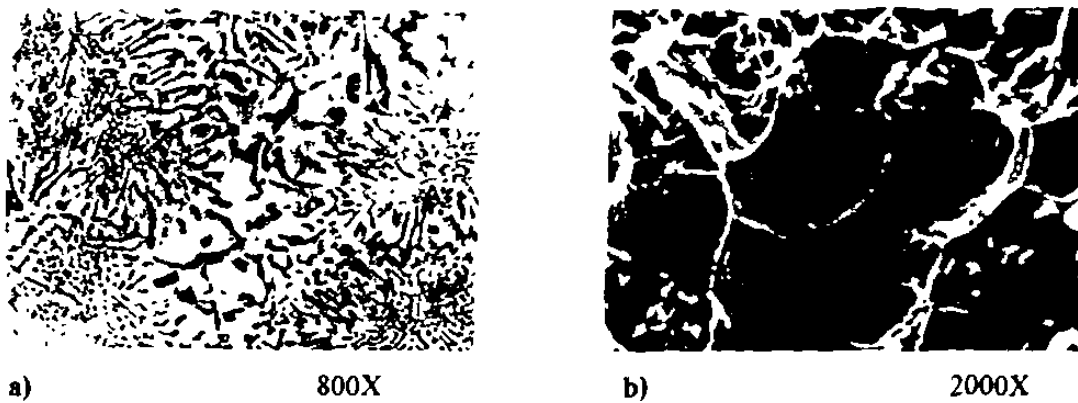


Fig. 3.16 Estructura de la aleación eutéctica Al-Si modificada; a) microestructura b) superficie de fractura [22].

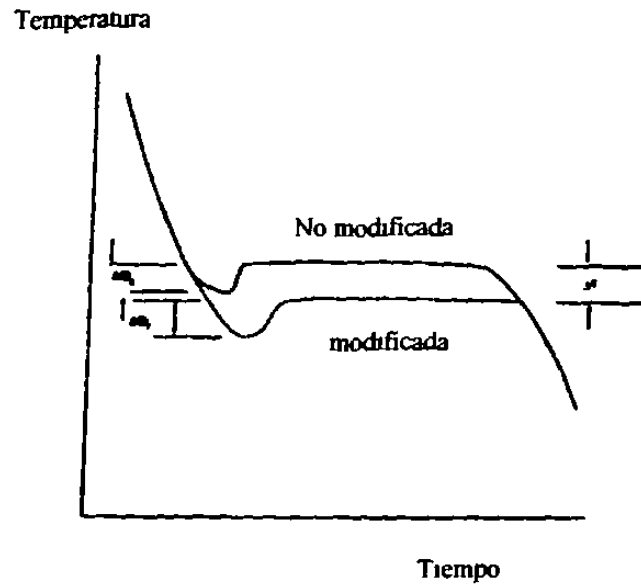


Fig. 3.17 Comparación de las zonas eutécticas en las curvas de enfriamiento de las aleaciones modificadas y no modificadas [5]

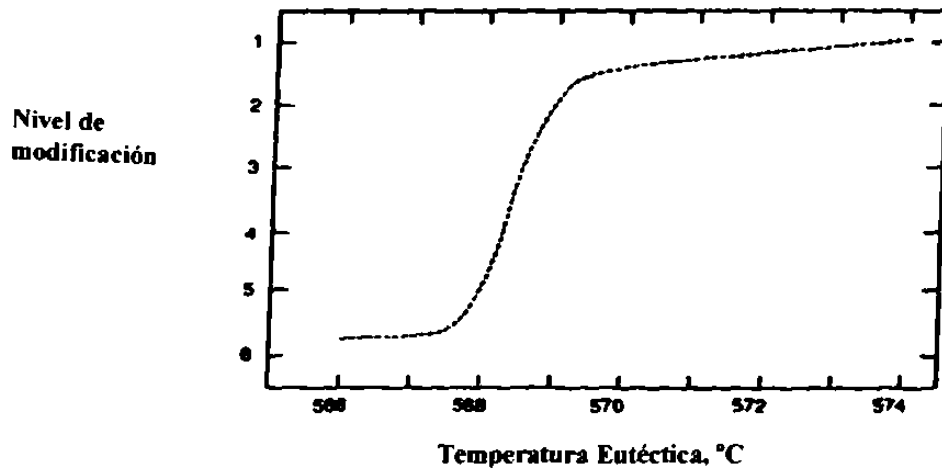


Fig. 3.18 Relación entre el nivel de modificación y la temperatura del eutéctico para una aleación A 356 [5]

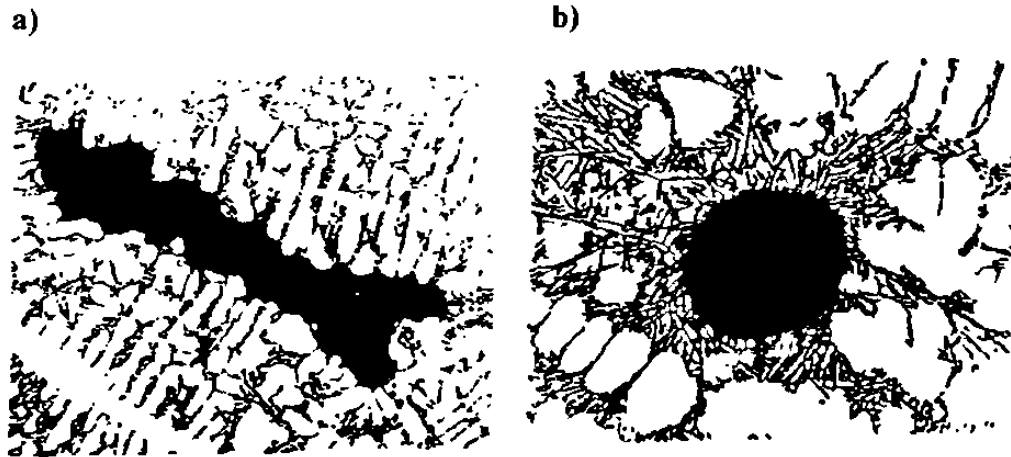


Fig. 3.19 Porosidad encontrada en el interior de una pieza vaciada, a) por contracción, b) por gas [5].

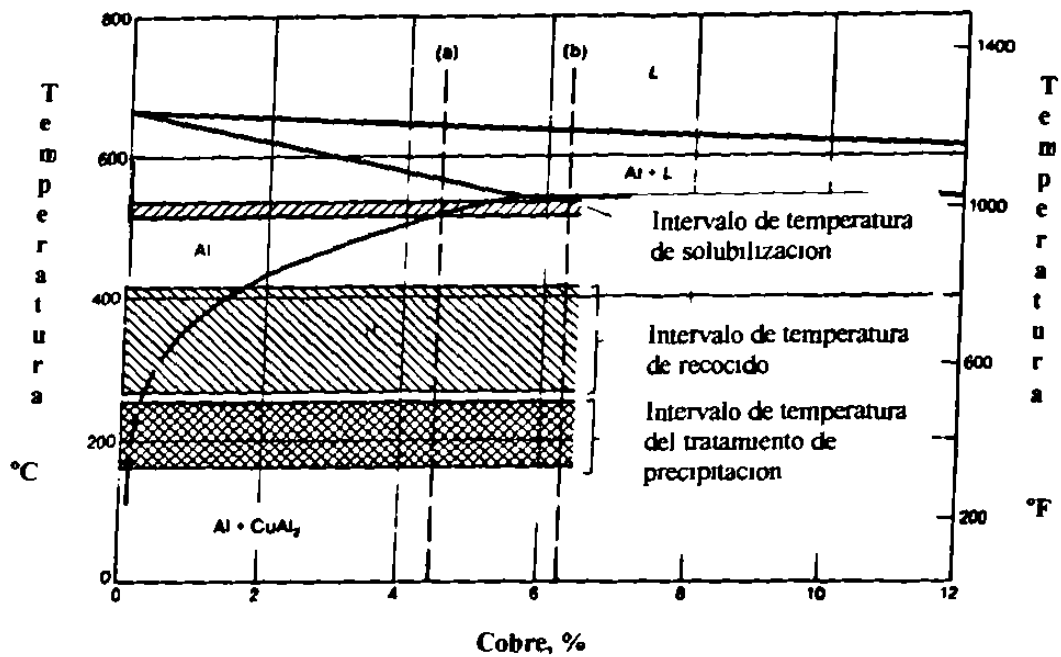


Fig. 3.20 Parte del diagrama de fases binario Al-Cu que muestra los intervalos de temperaturas para los diferentes tratamientos térmicos [1]

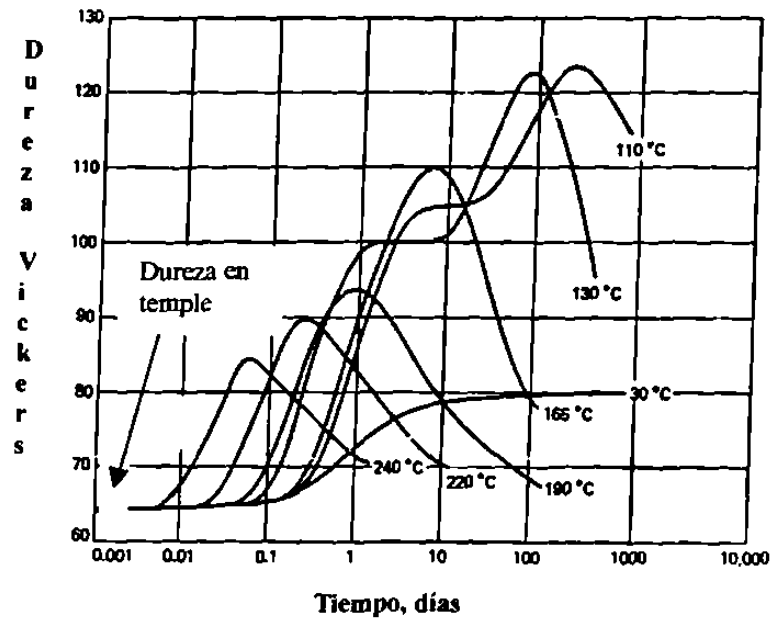


Fig. 3.21 Dureza en función del tiempo para una aleación Al-Cu 4%. La aleación se trató por solubilización durante 48 hrs a 520 °C seguido de un enfriamiento brusco en agua a 20 °C [28].