

ESTRUCTURAS DE SOLIDIFICACION ESPERADAS EN SISTEMAS EUTECTICOS TERNARIOS SIMPLES

THE STRUCTURES EXPECTED IN A SIMPLE TERNARY EUTECTIC SYSTEM

C.Morando¹⁻², O.Garbellini¹⁻³ y H.Palacio¹⁻³

1 IFIMAT, Dep. de Física, Facultad de Ciencias Exactas, UNCPBA, Pinto 399, 7000 Tandil

2 Becaria Post Doctoral CONICET.

3 CICPBA

e-mail: cmorando@exa.unicen.edu.ar

Resumen

Sobre la base de los modelos teóricos, desarrollados en la literatura, para predecir las distintas regiones estructurales que se esperan encontrar durante la solidificación de aleaciones de sistemas eutécticos ternarios simples, se analizaron las microestructuras de muestras obtenidas experimentalmente, correspondientes a aleaciones de los sistemas AlCuSi y AlAgCu. Los resultados obtenidos son consistentes con las predicciones de los modelos. En el caso del sistema AlCuSi se obtuvo un eutéctico ternario formado por las fases α -Al, Al₂Cu y Si y en el sistema AlAgCu el eutéctico ternario está formado por Al₂Cu y dendritas de dos fases α -Al y Ag₂Al.

Palabras Claves: sistemas eutécticos ternarios, estructuras de solidificación, aleaciones AlCuSi, aleaciones AlAgCu.

Abstract

Microstructures of AlCuSi and AlAgCu alloys, experimentally obtained by fluidity tests, were analyzed in order to predict the different structural regions expected to be found during solidification of simple ternary eutectic system alloys. The analysis was based on the theoretical models developed in the literature. The results obtained were consistent with model predictions. In the case of AlCuSi system, the ternary eutectic was formed by α -Al, Al₂Cu and Si phases, in AlAgCu system the ternary eutectic have a semiregular structure formed by Al₂Cu and two phase dendrites between α -Al and Ag₂Al.

Keywords: ternary eutectic systems, solidification structures, AlCuSi alloys, AlAgCu alloys.

Introducción

El diagrama de fase ternario temperatura-composición a presión constante puede obtenerse como un modelo tridimensional cuya base es un triángulo equilátero de composición y la temperatura es el eje vertical¹. La Figura 1 ilustra este modelo para un sistema eutéctico ternario ABC.

En las tres caras verticales encontramos los diagramas de fase para los subsistemas binarios AB, BC y CA que son eutécticos simples. Los puntos eutécticos binarios son e_1 , e_2 y e_3 , que se proyectan a un punto común E: el eutéctico ternario.

Como el modelo tridimensional no es práctico se construyen diseños bidimensionales que se obtienen como una proyección ortogonal sobre el triángulo de composición. Esta es una proyección térmica múltiple, de la que discutiremos las estructuras esperadas durante el crecimiento de aleaciones en sistemas eutécticos ternarios.

Mc Cartney y colaboradores²⁻⁴ predijeron el número de distintas regiones estructurales que se esperan encontrar durante el crecimiento de aleaciones de sistemas eutécticos ternarios simples, considerando la Figura 1 y suponiendo que cada fase primaria, α , β y γ , nuclea fácilmente y está presente en las estructuras de 2 y

3 fases con una fracción de volumen considerable. Los rangos de composición de cada una de ellas, para una velocidad de crecimiento y un gradiente de temperatura fijos, se muestran esquemáticamente en la Figura 2 y las interfases de crecimiento en la Figura 3.

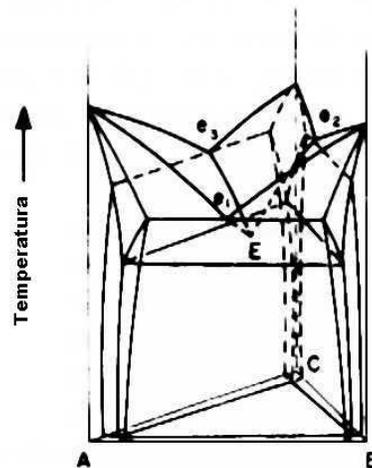


Figura 1: Sistema eutéctico ternario ABC.

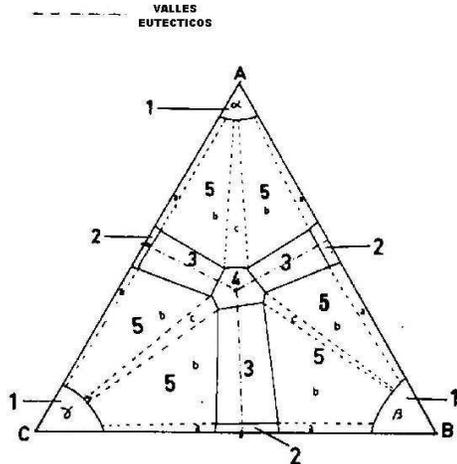


Figura 2: Diagrama esquemático de los rangos de composición de las fases α , β y γ para una velocidad de crecimiento y un gradiente de temperatura fijos.

REGION 1: cerca de la esquina del componente puro ocurre el crecimiento de una única fase con una interfaz plana.

REGION 2: cerca de la composición eutéctica binaria ocurre el crecimiento eutéctico de dos fases con estructura laminar o cilíndrica, y una interfaz de crecimiento macroscópicamente plana que se muestra en la Figura 3 a).

REGION 3: para aleaciones en el valle eutéctico se espera encontrar dendritas o celdas eutécticas de dos fases con la tercer componente apareciendo cerca de la temperatura eutéctica como una lámina fina de esta fase o como una lámina eutéctica de 3 fases alrededor de cada celda dependiendo de la fracción de volumen del eutéctico ternario. La interfaz se muestra en la Figura 3 b).

REGION 4: cerca de la composición eutéctica ternaria se espera una estructura eutéctica de 3 fases sin fase primaria ni eutéctica binaria. Esta estructura crece con una interfaz macroscópicamente plana de manera similar al componente puro y el eutéctico binario y se muestra en la Figura 3 c).

REGION 5: para aleaciones lejanas a los valles eutécticos se esperan celdas o dendritas de una única fase seguidas de estructuras descritas en las regiones 2, 3 y 4:

- dendritas de una fase + eutéctico binario creciendo con una interfaz plana, Figura 3 d).
- dendritas de una fase + celdas de 2 fases + eutéctico ternario. La interfaz se muestra en la Figura 3 e).
- dendritas de una fase + eutéctico ternario. La interfaz se muestra en la Figura 3 f).

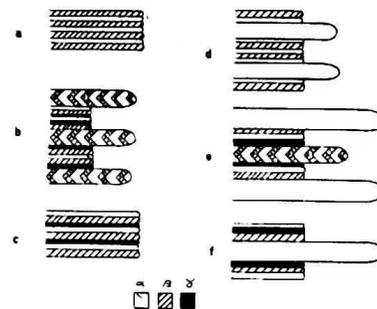


Figura 3: Diagrama esquemático de las interfases de crecimiento en un sistema ternario.

Como las propiedades físicas, químicas y mecánicas de una aleación dependen de su composición química entonces para determinar cierta propiedad, será necesario conocer las fases presentes en la microestructura a través del diagrama de equilibrio y el camino de solidificación. Debido a esto se propuso como objetivo de este trabajo analizar las estructuras de solidificación, de muestras obtenidas experimentalmente en ensayos de fluidez⁵⁻⁷, correspondientes a aleaciones de los sistemas AlCuSi y AlAgCu en la esquina rica en Al, de acuerdo a las estructuras predichas por los modelos teóricos desarrollados en la literatura y mencionados anteriormente.

Materiales y Procedimiento experimental

Las aleaciones de los sistemas AlCuSi y AlAgCu utilizadas en la investigación se prepararon a partir de materiales de pureza 99,99%.

Se utilizó un equipo para ensayos de fluidez lineal de llenado por aplicación de vacío. La descripción del mismo y el procedimiento experimental se presentó en un trabajo previo⁷.

Las probetas solidificadas se seccionaron longitudinalmente y se prepararon para análisis metalográfico mediante pulido mecánico con papel esmeril de distinta granulometría y con pasta de diamante hasta $1/4\mu\text{m}$. Posteriormente se atacaron químicamente, las aleaciones del sistema AlCuSi con el reactivo constituido por 7,5ml HN_3 + 5ml HCl + 2,5ml HF en H_2O y las del sistema AlAgCu con 0,5ml HF en H_2O y luego 42,5ml HCl + 42g FeCl_3 en 5ml de alcohol.

Resultados y Discusiones

Análisis de las estructuras de solidificación

1. Sistema Al-Cu-Si

Las aleaciones investigadas pueden dividirse en 5 grupos de acuerdo a las subregiones indicadas en la Figura 2:

REGION 5b: Grupo I: Fase Primaria α -Al, Eutéctico Binario AlSi

Grupo II: Fase Primaria α -Al, Eutéctico Binario AlCu

Grupo III: Fase Primaria Si, Eutéctico Binario AlSi

REGION 5c: Grupo IV

REGION 2

REGION 4



Grupo V: Eutécticos

Puede estimarse la evolución microestructural de las aleaciones del sistema AlCuSi en la esquina rica en Al siguiendo el camino de solidificación indicado en el diagrama de equilibrio⁸ que se presenta en la Figura 4.

Las aleaciones del Grupo I solidifican formando dendritas primarias de α -Al, la solidificación continúa a lo largo de la línea monovariante AE formando eutéctico Al-Si: $L \rightarrow \alpha - Al + AlSi$ y finalmente alcanzan el punto E donde el líquido remanente solidifica como eutéctico ternario Al-Si-Al₂Cu.

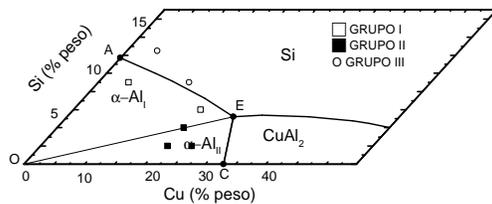
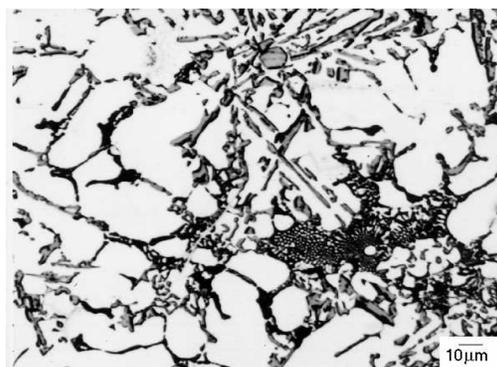
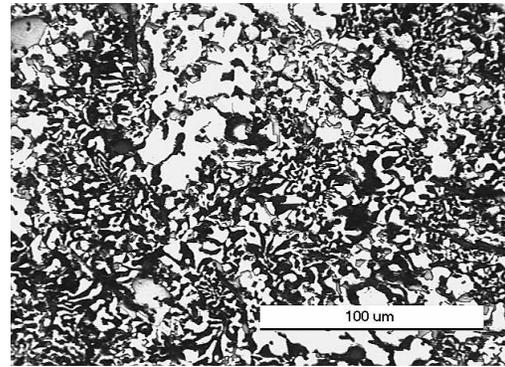


Figura 4: Diagrama de equilibrio mostrando la composición química de las aleaciones utilizadas.

Las Figuras 5 a) y b) muestran micrografías ópticas de las microestructuras de las aleaciones Al-5%Cu-9%Si y Al-21%Cu-6%Si pertenecientes a este Grupo. Las mismas exhiben dendritas de α -Al primario con eutéctico binario Al-Si y eutéctico ternario Al-Si-Al₂Cu en los espacios interdendríticos.



a)



b)

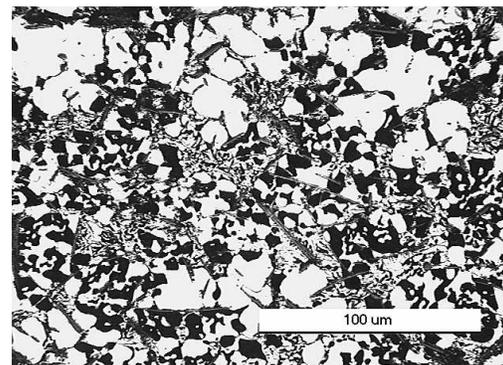
Figura 5: a) Al-5%Cu-9%Si y b) Al-21%Cu-6%Si. Para ambas micrografías las zonas blancas corresponden a dendritas de α -Al, zonas grises: eutéctico binario Al-Si y fase fina interdendrítica: eutéctico ternario Al-Si-Al₂Cu

Con las aleaciones pertenecientes al Grupo II puede hacerse un razonamiento similar, la solidificación comienza con dendritas primarias de α -Al, continúa a lo largo de la línea monovariante CE formando eutéctico binario Al-Al₂Cu: $L \rightarrow \alpha - Al + Al_2Cu$ y finaliza con eutéctico ternario Al-Si-Al₂Cu en los espacios interdendríticos.

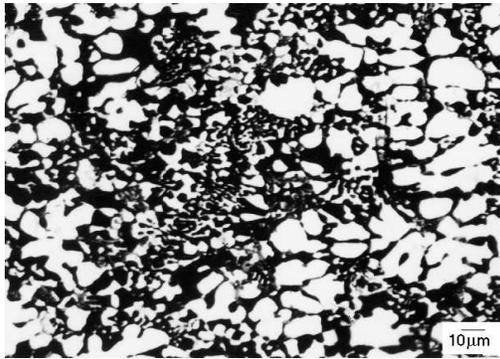
Las Figuras 6 a) y b) corresponden a las aleaciones Al-21%Cu-2%Si y Al-25%Cu-2%Si de este Grupo. Las mismas exhiben dendritas primarias de α -Al con eutéctico binario Al-Al₂Cu y eutéctico ternario Al-Si-Al₂Cu en los espacios interdendríticos.

Las aleaciones del Grupo III forman cristales de Si primario seguidos por la solidificación secundaria de eutéctico Al-Si y el eutéctico ternario Al-Si-Al₂Cu: $L \rightarrow Si + Al - Si + Al - Si - Al_2Cu$.

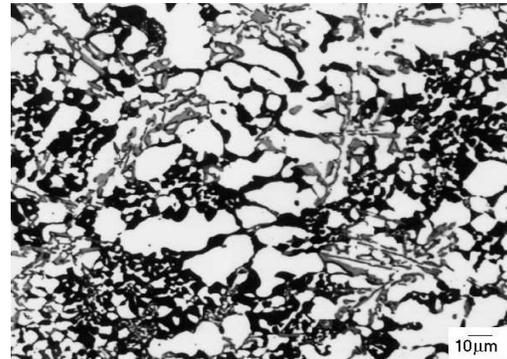
Las Figuras 7 a) y b) muestran micrografías ópticas de las aleaciones Al-5%Cu-12.5%Si y Al-15%Cu-9%Si de este Grupo. Revelan una matriz eutéctica AlSi con algunas partículas facetadas de Si primario y eutéctico ternario.



a)

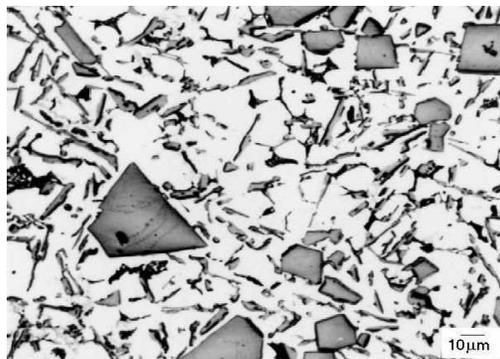


b)

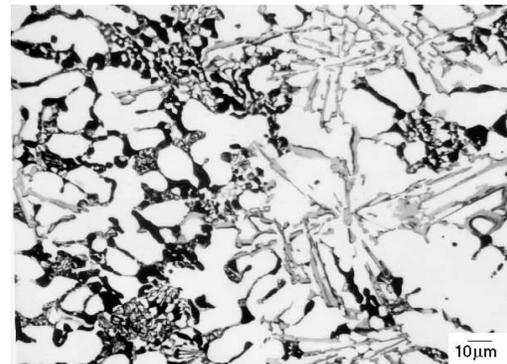


a)

Figura 6: a) Al-21%Cu-2%Si y b) Al-25%Cu-2%Si. Blanco: fase α -Al, negro: eutéctico Al-Al₂Cu y fase fina: eutéctico ternario Al-Si-Al₂Cu.

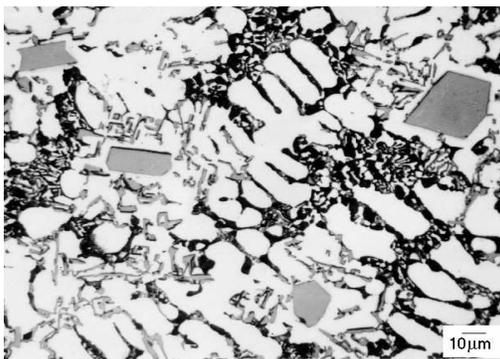


a)



b)

Figura 8: Al-21%Cu-4%Si. Blanco: fase α -Al y fase fina: eutéctico ternario Al-Si-Al₂ Cu.



b)

Figura 7: a) Al-5%Cu-12.5%Si y b) Al-15%Cu-9%Si. Gris: eutéctico AlSi y cristales de Si primario y fase fina: eutéctico ternario.

La aleación Al-21%Cu-4%Si, perteneciente al Grupo IV, está situada en la zona de separación de los Grupos I y II, presenta en su microestructura dendritas de α -Al y eutéctico ternario Al-Si-Al₂ Cu. Las Figuras 8 a) y b) son micrografías ópticas correspondientes a dicha aleación.

Las aleaciones del Grupo V corresponden a las composiciones eutécticas y pueden subdividirse de acuerdo a la región a la que pertenezcan en:

Eutécticos binarios (REGION 2): Se observaron dos eutécticos binarios de características morfológicas distintas: eutéctico regular Al-Al₂Cu, correspondiente a la composición Al-33%Cu, con una microestructura laminar no facetada-no facetada (Figura 9) y eutéctico irregular Al-Si, correspondiente a la composición Al-12%Si, con microestructura acicular facetada-no facetada (Figura 10).

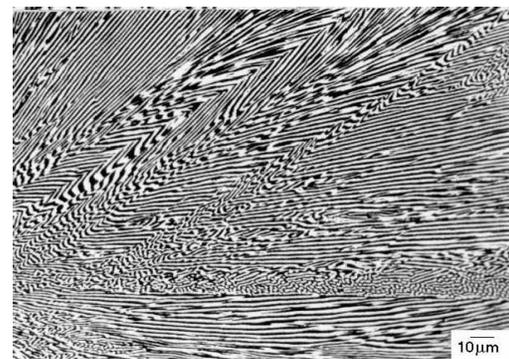


Figura 9: Microestructura del eutéctico Al-Al₂Cu

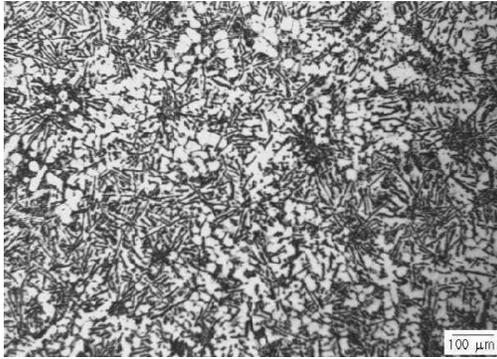


Figura 10: Microestructura del eutéctico Al-Si.

Eutéctico ternario (REGION 4): corresponde a la aleación de composición Al-27.5%Cu-5%Si, presenta una estructura de tres fases α -Al, Al_2Cu y Si como se observa en la Figura 11.

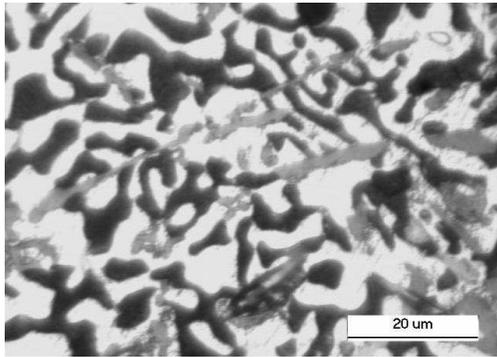


Figura 11: Micrografía óptica de la aleación Al-27.5%Cu-5%Si. Fase Blanca: α -Al, negra: Al_2Cu y gris Si.

2. Sistema Al-Ag-Cu

Las aleaciones investigadas pueden dividirse en 3 grupos de acuerdo a las subregiones indicadas en la Figura 2:

REGION 5b: **Grupo I**: Fase Primaria α -Al, Eutéctico Binario Al- Ag_2Al

Grupo II: Fase Primaria α -Al, Eutéctico Binario AlCu

REGION 2

REGION 4



Grupo III: Eutécticos

Puede estimarse la evolución microestructural de las aleaciones de este sistema siguiendo el camino de solidificación indicado en el diagrama de equilibrio⁹ que se presenta en la Figura 12.

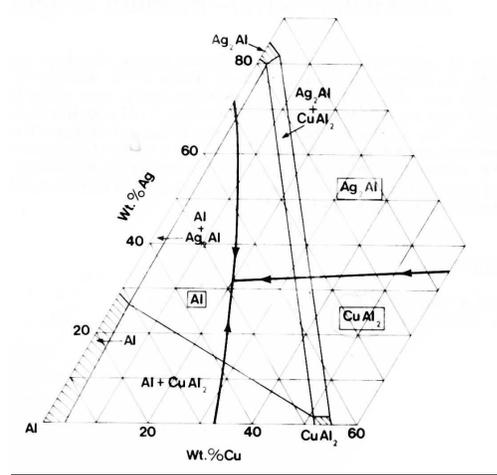


Figura 12: Diagrama de equilibrio del sistema Al-Ag-Cu.

Las aleaciones del Grupo I solidifican formando dendritas primarias de α -Al, la solidificación continúa formando eutéctico Al- Ag_2Al y el líquido remanente solidifica como eutéctico ternario Al- Ag_2Al - Al_2Cu .

Con las aleaciones del Grupo II puede hacerse un razonamiento similar: la solidificación comienza con dendritas primarias de α -Al, continúa formando eutéctico binario Al- Al_2Cu y finaliza con eutéctico ternario en los espacios interdendríticos.

Las aleaciones del Grupo III corresponden a las composiciones eutécticas.

Eutécticos binarios (REGION 2). Se observaron dos eutécticos binarios regulares con microestructura laminar no facetada-no facetada: Al- Al_2Cu (Figura 9) y, Al- Ag_2Al correspondiente a la composición Al-70%Ag (Figura 13).

Eutéctico ternario (REGION 4): corresponde a la aleación de composición Al-32%Ag-20%Cu, presenta una estructura semirregular del tipo Brick³ compuesta por Al_2Cu y dendritas de dos fases α -Al y Ag_2Al como se observa en la Figura 14.

Conclusiones

Se analizaron las estructuras de solidificación de aleaciones de los sistemas Al-Cu-Si y Al-Ag-Cu en la esquina rica en Al. Los resultados obtenidos son consistentes con los predichos por los modelos teóricos desarrollados en la literatura.

En el sistema AlCuSi se obtuvo un eutéctico ternario formado por las fases α -Al, Al_2Cu y Si y dos eutécticos binarios Al- Al_2Cu y Al-Si que se pueden clasificar como regular e irregular respectivamente.

En el sistema AlAgCu el eutéctico ternario está formado por Al_2Cu y dendritas de dos fases $\alpha-Al$ y Ag_2Al , presenta una estructura semirregular del tipo Brick³ y dos eutécticos binarios regulares Al- Al_2Cu y Al- Ag_2Al .

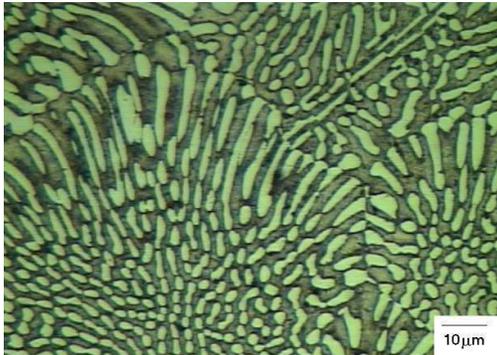


Figura 13: Microestructura del eutéctico Al- Ag_2Al .



Figura 14: Micrografía óptica de la aleación Al-32%Ag-20%Cu.

matrix alloys", Int. Journal of Cast Metals Research, **17**, 1, 12-16. 2004.

6.-O.Garbellini, C.Morando, H.Palacio and H.Biloni: "Correlation of microstructure and fluidity property of short fiber-Aluminum alloy matrix composites. A comparison with the unreinforced matrix alloys", Solidification of Aluminum Alloys, TMS, 369-376. 2004.

7.-C.Morando, O.Garbellini y H.Palacio: "Fluidez de aleaciones de sistemas eutécticos", Anales AFA, Vol.16, 194-197. 2004.

8.-H.W.Philips: "The constitution of Aluminium -Copper-Silicon alloys", Journal Institute of Metals, **82**, 9. 1953-54.

9.-L.F.Mondolfo: "Aluminum alloys structure & properties". Butterworths. London-Boston. 1976.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado en el IFIMAT (Instituto de Física de Materiales de Tandil) gracias a los aportes financieros de la CICPBA, CONICET y SeCyT-UNCPBA.

Referencias

- 1.-R.W.Cahn and P.Haasen editors: Physical Metallurgy, Vol. 1, Chapter 6: Phase Diagrams, Arthur Pelton. 1996.
- 2.-D.G.McCartney, J.D.Hunt and R.M.Jordan: "The structures expected in a simple ternary eutectic system: Part I. Theory", Metal. Trans. A, **11A**, 1243-1249. 1980.
- 3.-T.Himemiya and T.Umeda: "Three-phase planar eutectic growth models for a ternary eutectic system", Mat. Trans., JIM, **40**, 7, 665-674. 1999.
- 4.-D.G.McCartney, R.M.Jordan and J.D.Hunt: "The structures expected in a simple ternary eutectic system: Part II. The Al-Ag-Cu ternary system", Metal. Trans. A, **11A**, 1251-57. 1980.
- 5.-O.Garbellini, C.Morando, H.Palacio and H.Biloni: "Comparison of infiltration length of Al-Cu-Si-0.12 Al_2O_3 composites and maximum fluidity length of unreinforced