

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



**EI FENÓMENO DE LA SOLIDIFICACIÓN DURANTE LOS ENSAYOS DE FLUIDEZ
DE ALEACIONES Al-Cu**

PROYECTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Guatemala, junio de 2012

ROBERTO ALEJANDRO AGUILAR RIVAS

EL FENÓMENO DE LA SOLIDIFICACIÓN DURANTE LOS ENSAYOS DE FLUIDEZ DE ALEACIONES Al-Cu

Roberto A. Aguilar Rivas. Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. raarivas@hotmail.com

Resumen

El fenómeno de la solidificación durante el mecanismo de cierre de la vena fluida y su efecto sobre los resultados de los ensayos de fluidez en aleaciones Al-Cu diluidas, ha sido analizado en trabajos previos^{2,3} mediante la interpretación de las macroestructuras y las subestructuras de segregación. En el presente trabajo, se analizan los resultados de investigaciones metalográficas, bajo los mismos conceptos, en aleaciones Al-Cu: Al 99.99%, Al 0.5% Cu, Al 1% Cu, Al 2% Cu y Al 5% Cu, tomando en cuenta, como ha sido demostrado², que la inestabilidad de la interfase sólido-líquido permite el efecto del mecanismo de multiplicación copiosa debido a la fragmentación cristalina, lo cual delinea claramente el frente de solidificación que se analiza.

Abstract

The Solidification Mechanism in Fluidity Test of Al-Cu Alloys

The vein closing mechanism in Fluidity Tests of dilute Al-Cu alloys has been investigated in previous Works^{2,3} through the interpretation of the resulting macrostructures and of the segregation substructures. In the present work, in the same way, the results of metallographic investigation in Al-Cu alloys: Al 99.99%, Al 0.5% Cu, Al 1%Cu, Al 2% Cu, and Al 5%Cu, are analyzed taking into account that the instability of the solid-liquid interface of the alloys allows the multiplication mechanism due to crystal fragmentation that reveals the solidification profile which is analyzed.

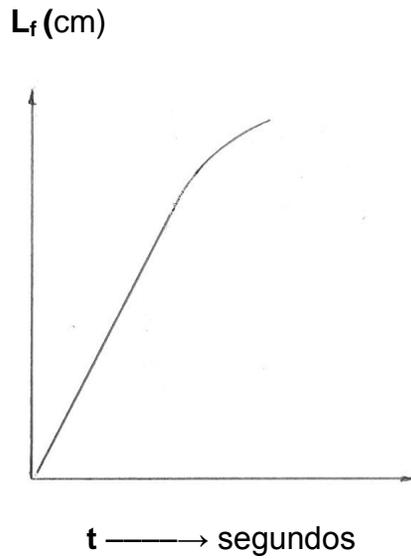
Palabras clave: fluidez, solidificación, fragmentación cristalina, convección forzada, segregación.

1. Introducción

La fluidez de los metales y aleaciones, como parámetro ingenieril, que significa la capacidad de un metal o aleación, en estado líquido, de recorrer cierto tramo en contacto con un sustrato cualquiera, hasta llenar la cavidad de un molde, se representa gráficamente en un sistema de coordenadas rectangulares en cuyas abscisas se señala el tiempo que tarda el flujo metálico antes de dejar de fluir, y, en las ordenadas, se señala la longitud alcanzada por el mismo hasta que la solidificación se manifiesta. “L_f”, que es la longitud máxima obtenida, constituye el parámetro **fluidez**. La representación esquemática es la que se observa en la figura 1.

En la gráfica puede apreciarse una curva formada por dos zonas. La primera zona es una recta con proporcionalidad lineal entre sus variables y que depende principalmente del sobrecalentamiento dado al líquido antes de la colada. La segunda zona – parte curva –, representa la capacidad del líquido de fluir sin sobrecalentamiento^{1,6} y depende esencialmente de la presión metalostática de colada, el coeficiente de transferencia calórica en la interfaz metal-molde, la composición química y el modo de solidificación del metal³. En general, el objetivo de los ensayos de fluidez, se concentra en la determinación de las relaciones existentes entre los parámetros que actúan, con el fin de poder predecir la capacidad del metal de llenar las cavidades de los moldes.

Figura 1. Curva representativa de la Fluidiez $L_f = f(t)$



2. Antecedentes

Aguilar Rivas y Biloni¹, investigaron el mecanismo de cierre de la vena fluida en probetas de fluidiez lineal, a diferentes sobrecalentamientos, de aleaciones Al 0.5% Cu, mediante la observación macroscópica y microscópica de las estructuras y subestructuras de segregación de las secciones longitudinales de las probetas, comprobando la ocurrencia del frente de solidificación propuesto por Morales y coautores⁶, para elementos puros, fig. 2, pero con la modificación que se muestra en la fig. 3, para aleaciones diluidas.

Figura 2. Frente de Solidificación Según Ref. (6)

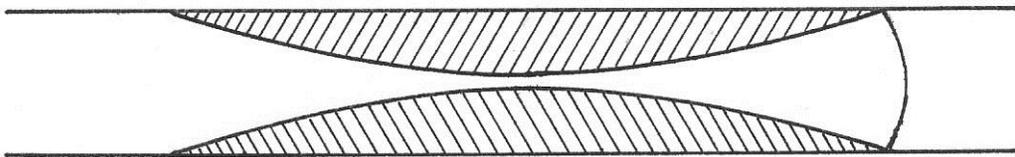
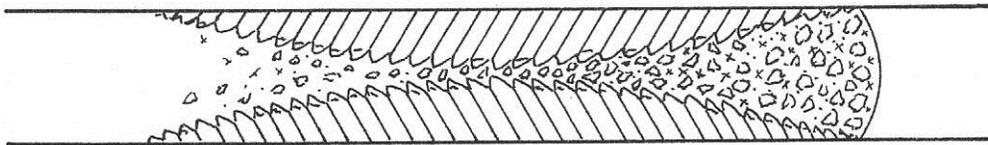


Figura 3. Frente de Solidificación Según Ref. (2)



El autor, basado en observaciones metalográficas sobre probetas obtenidas mediante los ensayos de fluidiez citados^{1,2}, en aluminio 99.99% y aleaciones diluidas y más concentradas de Al-Cu, comprobó la repetición de los conceptos

expuestos en dichos trabajos, y, que a continuación se describen, avalando la ocurrencia propuesta.

3. Metodología y Técnicas Experimentales

3.1. Equipo

Para la realización de los ensayos experimentales, se procedió a la obtención de probetas de fluidez, mediante la utilización de un equipo de vacío, diseñado y construido, inicialmente, por el grupo de Biloni, y, adaptado y complementado por quien suscribe, a los fines de realizar los ensayos correspondientes, como parte de los trabajos, que constituyen la base de la presente investigación^{1,2}, en la División de Solidificación y Fundición de la Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina

3.2. Aleaciones utilizadas.

Se utilizó aluminio de pureza 99.99% y aleaciones Al-Cu con tenores crecientes de cobre de 0.5%, 1%, 2% y 5%. La pureza de los metales originales fue de 99.99%.

3.3. Procedimiento Experimental.

Con el objeto de identificar claramente la diferencia de las estructuras de solidificación que definen el mecanismo de cierre durante los ensayos de fluidez, se procedió a la ejecución de tales ensayos, tratando de realzar los efectos de segregación de las estructuras que permitieran la interpretación de las mismas, mediante el análisis metalográfico, macro y microscópico. Para ello, los ensayos se efectuaron variando los parámetros externamente controlables, como lo son la presión efectiva de colada y el sobrecalentamiento.

3.3.1 Técnicas Metalográficas.

Las técnicas metalográficas se realizaron bajo dos conceptos distintos. Las primeras buscando el contraste adecuado para la observación macrográfica que pudiera dar un detalle de conjunto, y las segundas buscando los efectos micrográficos.

Para las observaciones macrográficas y micrográficas se realizó el ataque con el reactivo Keller modificado, durante períodos de 5 segundos.

Con el fin de tener una visión microscópica de conjunto, en los cortes longitudinales de las probetas, se realizó pulido electrolítico en las siguientes aleaciones:

Al 99.99%, Al 0.5 % Cu, Al 1% Cu, Al 2% Cu y Al 5%Cu.

El detalle de la metodología metalográfica se describe en la referencia³.

4. Resultados

De acuerdo a la metodología empleada, mediante el análisis metalográfico de las macroestructuras y subestructuras de segregación que caracterizan a las probetas de los ensayos de fluidez, los resultados pueden concretarse en lo siguiente:

4.1 Mecanismo de Cierre

a. Aleaciones Diluidas:

El mecanismo de cierre de la vena fluida para las aleaciones diluidas, se manifiesta por el choque de la estructura columnar, predominantemente dendrítica, que crece a partir de las paredes del molde. Esto se demuestra mediante la observación de la macrografía de la figura 4 que corresponde a una probeta de Al 99.99%, colada con cero sobrecalentamiento y presión efectiva superior a la normal, y, en la que se nota el efecto de la convección forzada, producida por una presión de colada superior a la efectiva correspondiente a la altura metalostática real. Esto último, con el fin de poder delinear claramente el avance independiente de las zonas columnares tratando de encontrarse en la línea central de la probeta. En las micrografías de la figura 5, correspondientes a otra probeta de similares características, pero colada con menor presión metalostática, se observa en detalle, en la cola de la probeta: el choque limpio de la zona columnar; en el centro: los escasos cristales equiaxiales atrapados que sugieren la ubicación de la longitud crítica; y, en la punta: la zona equiaxial arrastrada por el fluido.

Figura 4 (aprox. 3.22x)

Macrografía de una probeta de Al 99.99% colada con cero sobrecalentamiento y presión efectiva > normal para provocar el efecto de la fragmentación cristalina. Comprueba el frente de solidificación propuesto en la figura 3.

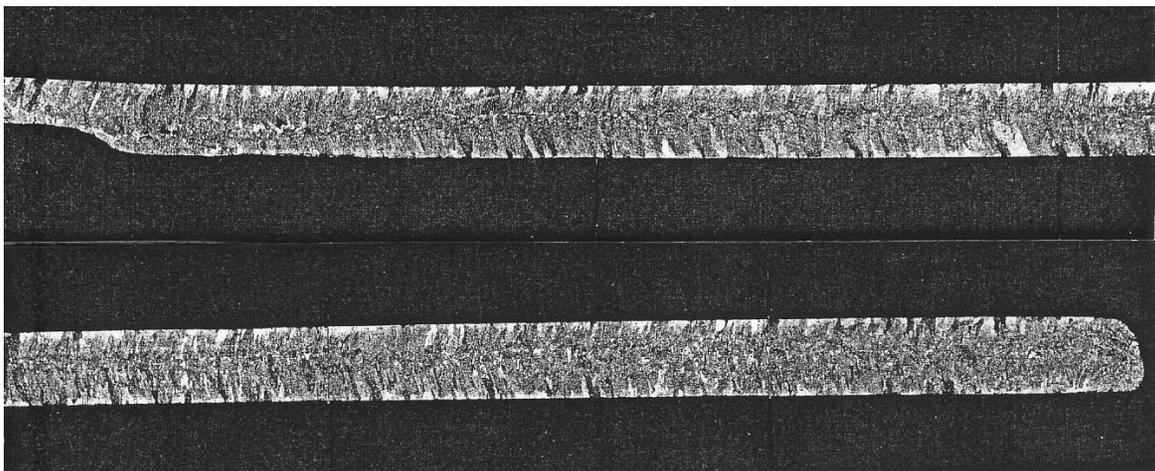
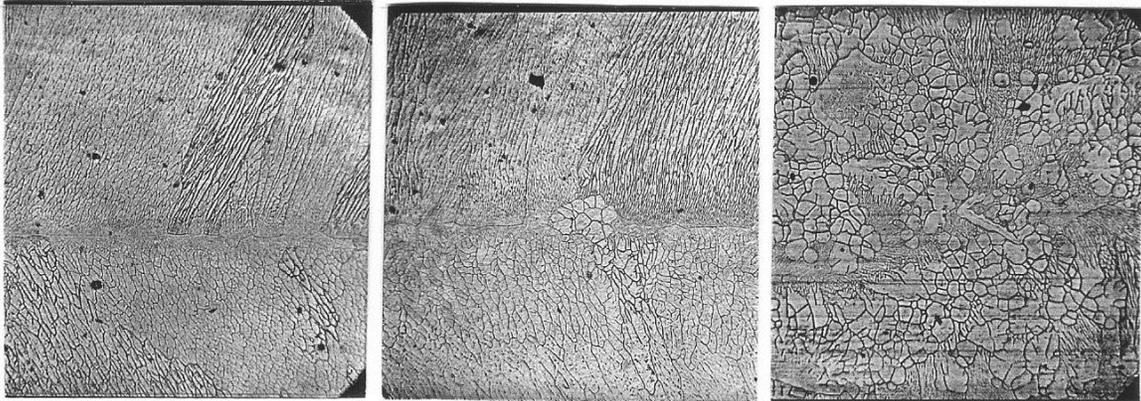


Fig. 5 (aprox. 17x)

Probeta de Al 99.99% de pureza. ΔT : 40°C; $\Delta P > 0$. Cola (choque de las estructuras columnares). Centro (primeras zonas equiaxiales atrapadas), y, punta (zona equiaxial producida por la convexión forzada).

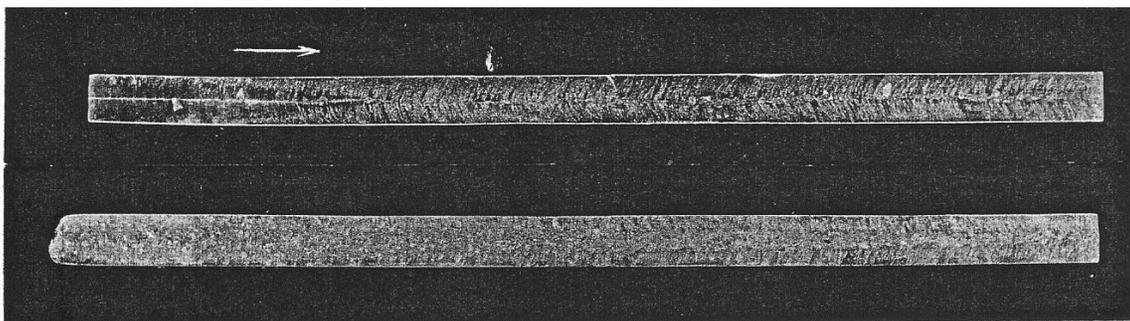


b. Aleaciones Concentradas:

En este caso, el mecanismo de cierre se manifiesta por un efecto combinado del descrito en el párrafo anterior y el efecto de la fricción de la zona multiplicada o equiaxial, es decir, mientras el crecimiento columnar dendrítico tiende a juntarse en la línea central de la probeta, a partir de las paredes del canal, las células multiplicadas corriente arriba del lugar de cierre, crecen hasta que se produce una fricción tan alta entre ellas mismas y con el frente dendrítico de la zona columnar, que el flujo se para en el lugar de mayor fricción. Desde este punto, corriente abajo, el resto del líquido solidifica a la temperatura de equilibrio y por el efecto de la extracción calórica desde las paredes del molde. Este mecanismo se observa claramente en la figura 6, que muestra las macrografías de dos probetas de Al 2% Cu, coladas con sobrecalentamientos de 30°C y 40°C y presión efectiva superior a la normal. Este efecto puede notarse también en la figura 7, que muestra las micrografías de probetas de ensayos realizados con sobrecalentamiento de 40°C y presión de colada normal para las aleaciones Al 5% Cu.

Figura 6 (aprox. 1.85x)

Macrografías de dos probetas de Al 2% Cu. $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ (abajo), y, 40°C (arriba); $\Delta P > \text{normal}$. Se delinean claramente los frentes de solidificación propuestos



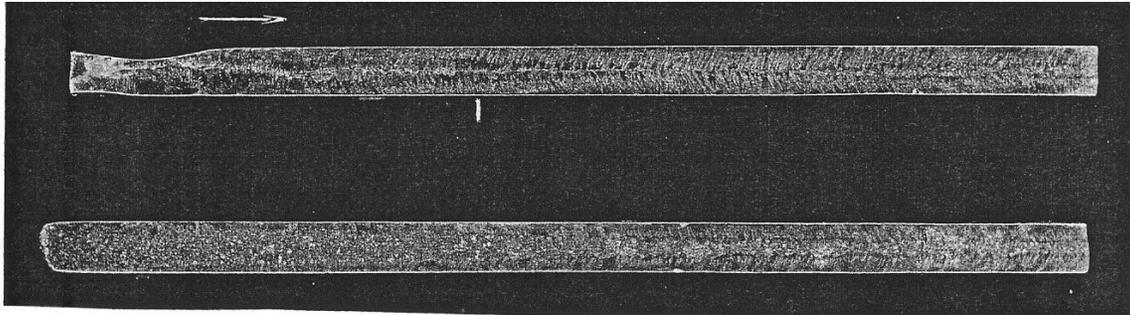
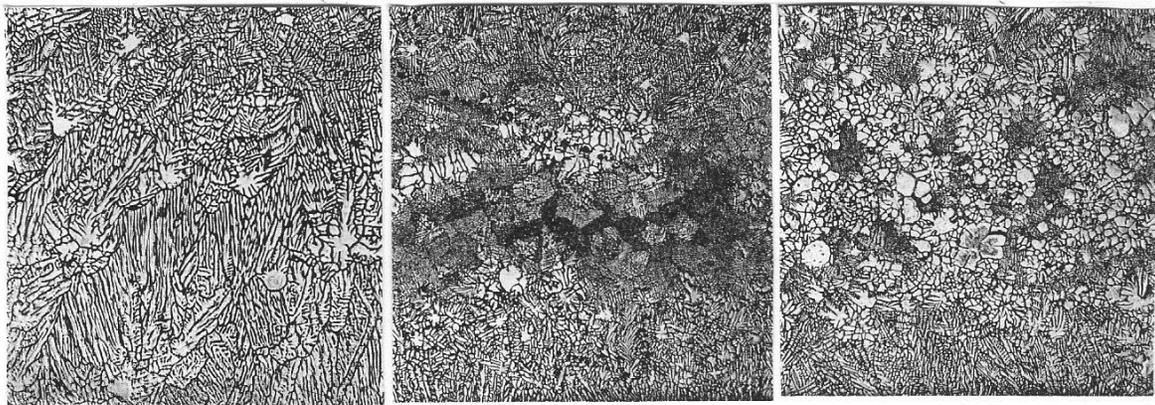


Fig. 7 (aprox. 24.5x, cola 42x)

Probeta Al 5% Cu. $\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$; $\Delta P = 0$. Cola (estructura columnar dendrítica y zonas iniciales por fragmentación. Zona equiaxial dendrítica). Centro (posible zona de cierre). Punta (coexistencia de las zonas columnares y equiaxiales).



5. Discusión y Análisis de los Resultados

En el presente trabajo, como en el de la referencia², se ha recurrido, como instrumento indiscutible, al análisis metalográfico de las subestructuras de segregación, que permiten la observación clara del desarrollo de los frentes de solidificación en las aleaciones.

En el caso de las aleaciones diluidas y las más concentradas, como las Al 1% Cu y Al 2% Cu, la inestabilidad de la interfase sólido-líquido permite la manifestación de los mecanismos de multiplicación en el camino de la vena líquida en contacto con la misma y la fragmentación cristalina revela la formación del perfil del frente de solidificación. De esta manera, el uso de las aleaciones Al-Cu, combinado con la aplicación de las técnicas metalográficas adecuadas proporciona detalles muy claros sobre los mecanismos de solidificación involucrados en el bloqueo de la vena líquida durante los ensayos.

Como puede observarse en las macrográficas de las figuras 4 y 6, el perfil de frente de solidificación de las aleaciones diluidas y más concentradas hasta Al 5% Cu corresponde al de la gráfica de la figura 3, similar al frente propuesto para metales puros por Morales y coautores⁶, y demostrado para aleaciones diluidas por

Aguilar Rivas y Biloni², y, cuya alteración debido al efecto de la convección forzada sobre una interfase inestable, se puede caracterizar de la siguiente manera, mientras se aprecian las macrografías y micrografías de las figuras 4 a la 7:

- i) La región de la cola de las probetas, corresponde a choque de las estructuras columnares que avanzan en un líquido sobrecalentado hasta encontrarse. Esto se aprecia claramente en las figuras 4 y 5.
- ii) La región del centro contiene una serie de granos equiaxiales producidos por el efecto de la convección que han quedado atrapados por los frentes de solidificación bidireccional o que han sido los causantes de la estrangulación por el efecto de la alta fricción entre sí mismos y con propios frentes dendríticos. Este fenómeno se aprecia tanto en las macrografías 4 y 6, cuanto en las micrografías 5 y 7.
- iii) En la región de la punta, se nota el crecimiento de granos columnares desde las paredes del molde, en coexistencia con una zona equiaxial densa –que se hace cada vez mayor dependiendo de la cantidad creciente de soluto–, debido al arrastre de la fragmentación cristalina, que en el caso de los metales puros no se presenta debido a la estabilidad de la interfase sólido-líquido en el frente de solidificación.

6. Conclusiones

Con base en los resultados experimentales que fundamentan este trabajo y los existentes en la literatura, puede concluirse en lo siguiente:

1. La morfología de las estructuras de solidificación correspondientes a las probetas de los ensayos de fluidez, está siempre condicionada por los siguientes aspectos:

- a) La pureza del metal o su concentración de soluto.
- b) La capacidad de extracción calórica del molde, que actúa directamente sobre el tamaño cristalino de la estructura.
- c) Las características superficiales del sustrato, que definen la densidad de la nucleación cristalina.
- d) El coeficiente de transferencia calórica “global” en la interfaz metal/molde como resultante de los efectos referidos en a, b y c.
- e) La presión de colada que influye directamente en la caracterización del flujo metálico y que puede llegar a alterar las características morfológicas de las estructuras resultantes debido a los efectos de la convección natural o forzada. Nótese claramente en la comparación de las figuras 4, 5, 6 y 7.

2. El mecanismo de cierre de la vena líquida está directamente influenciado por la morfología natural de las estructuras de solidificación, independientemente del grado de sobrecalentamiento, o sea, la temperatura de colada.

3. El perfil del frente de solidificación de los metales puros y aleaciones diluidas, es el correspondiente a las figuras 2 y 3 respectivamente, tal como fuera propuesto por Morales y coautores⁶ y Aguilar Rivas y Biloni¹.

4. El mecanismo de cierre de las aleaciones más concentradas, según se puede extrapolar de las características observadas en las probetas de Al5%Cu, coladas con sobrecalentamiento, figura 7, se debe fundamentalmente al efecto de la alta fricción intergranular entre una zona equiaxial producto de la multiplicación cristalina y una zona columnar bidireccional que avanza desde las paredes del molde, hacia el centro de las probetas, o, posiblemente, únicamente al primer efecto señalado para mayores concentraciones de soluto.

5. El mecanismo de solidificación afecta directamente los resultados de los ensayos de fluidez.

7. Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos, se cree conveniente realizar investigaciones que coadyuven a enriquecer el conocimiento sobre el tema de la solidificación, realizando ensayos de laboratorio que combinen la práctica del arte de la fundición con la aplicación de la investigación metalográfica. Esto podría iniciarse a través del desarrollo de los siguientes temas:

1. Análisis de las estructuras de solidificación de diferentes metales puros bajo condiciones invariables de molde y sustrato.
2. Igual que lo anterior, pero con aleaciones diluidas.
3. Análisis de las subestructuras de segregación en las aleaciones diluidas.

8. Referencias

1. Aguilar Rivas R. A. and Biloni H., Fluidity of Al-Cu Alloys with Zero Superheat. Zeitschrift für Metallkunde, Bd. 71 (1980) H.4 P. 264-268. Germany.
2. Aguilar Rivas R. A. and Biloni H., Vein Closing Mechanism in Fluidity Tests of Dilute Al-Cu Alloys. Zeitschrift für Metallkunde, Bd. 71 (1980) H.5 P. 309-311. Germany.
3. Aguilar Rivas R.A., Solidificación de Metales y Aleaciones y El Mecanismo de Cierre Durante los Ensayos de Fluidez de Aleaciones Al-Cu. Proyecto de Inv. Metalúrgicas, EIM. FIUSAC. 2011. Guatemala.
4. Biloni H., The Solidification of Metals, ISI P 110. (1968) 145.
5. Biloni H. Solidification. Cahn R. W. and Haasen P., Physical Metallurgy. Third Edition, North Holland Physics Publishing, (1983).
6. Morales A., Fisoló J. y Biloni H., On the Nature of the Fluidity Property. Zeitschrift für Metallkunde, Bd 68 (1977) 180. Germany.



Roberto Alejandro Aguilar Rivas

Dr. Sc. Ingeniero Mecánico, Post-Doctorado en Metalurgia. Ex investigador Asociado de la USAC, Programa Multinacional de Metalurgia, OEA-CNEA, Argentina. Director de INDESA —Ingeniería, Investigación y Desarrollo—. Profesor- Investigador, Escuela de Ingeniería Mecánica, FIUSAC.