

# CARACTERÍSTICAS METALÚRGICAS DE FUNDICIONES ARTESANALES EN ALEACIONES AL-CU

Roberto Alejandro Aguilar Rivas <sup>1</sup>

[raarivas@hotmail.com](mailto:raarivas@hotmail.com)

<sup>1</sup> Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Ciudad Universitaria zona 12, Ciudad de Guatemala, Centro América.

Recibido 09/10/2017; Aceptado: 30/11/2017

**Resumen:** Debido a la importancia de la fundición artesanal de metales y aleaciones con el empleo de chatarra de origen local, y su injerencia en el desarrollo socio-económico del país, se investigan las características estructurales de piezas fundidas artesanalmente, de aluminio de alta pureza y aleaciones Aluminio-Cobre con concentraciones de 1%, 2%, 3% y 5% de Cobre, simulando las condiciones de colada de dicha industria, en la búsqueda de las composiciones químicas y metodologías de fundición adecuadas, que satisfagan la demanda de las características técnicas de las piezas fundidas artesanalmente, mejorando su calidad. Tales características se comparan con las de estructuras obtenidas por medio de ensayos de fluidez lineal, observándose que los resultados coinciden en cuanto a su dependencia de las composiciones químicas de las aleaciones. Finalmente, se analiza la relación de las estructuras macrográficas de solidificación, de dichas aleaciones, con las propiedades de dureza, de las mismas.

**Palabras-clave:** fundición; solidificación; estructuras; macrografía; dureza.

**Abstract:** By the importance of artisanal castings of metals and alloys with the use of scrap metal of local origin, and their interference in the socio-economic development of the country, the structural characteristics of artisan castings, of high purity aluminum and alloys was investigate. Aluminum-Copper with concentrations of 1%, 2%, 3% and 5% of Copper, simulating the conditions of casting of said industry, in the search of the chemical compositions and methodologies of casting suitable, that satisfy the demand of the technical characteristics of the artisan castings, improving their quality. Such characteristics was compare with structures obtained through linear flow tests, observing that the results coincide in terms of their dependence on the chemical compositions of the alloys. Finally, the relationship of the solidification structures, of said alloys, with the hardness properties, of the same is analyze.

**Keywords:** Casting; solidification; structures; macrography; hardness.

## **1. Introducción**

El reciclado de los desechos metálicos redundará en beneficio del medio ambiente, en general, constituyendo una fuente de trabajo y desarrollo para los sistemas socioeconómicos implicados. La fundición artesanal, que utiliza tales desechos como materia prima, es uno de los sectores más importantes bajo tales conceptos. Por consiguiente, el apoyo científico-tecnológico que pueda darse a este sector, contribuirá en grande a los beneficios referidos.

Los sistemas de fundición artesanal, hacen uso de las metodologías empleadas a través de muchos años en todas partes del mundo, siendo su principal desarrollo la fundición en moldes de arena. Es importante el conocimiento de las variables ingenieriles que entran en juego en estos procesos, para poder contar con los conocimientos necesarios que reorienten la práctica artesanal hacia la producción de elementos de maquinaria y equipos de mejores calidades, redundando en beneficio de los usuarios, y por consiguiente, del país.

Por otro lado, lamentablemente el sistema nacional no realiza controles específicos en cuanto a la utilización de las chatarras metálicas de aleaciones no ferrosas, porque mientras las chatarras ferrosas cuentan con sistemas de protección, preservando su uso para el desarrollo local, las primeras se exportan indiscriminadamente bajo conceptos erróneos de que en Guatemala no existen procedimientos adecuados para su recuperación, lo cual es absurdo, ya que desde hace muchos años se producen, bajo el concepto de fundición artesanal, piezas de repuesto para la industria en general, y maquinarias y equipos de uso cotidiano, tal es el caso de molinos de nixtamal (maíz cocido), trapiches para pequeñas molindas de caña de azúcar, pulperos de café, utensilios de cocina etc.

En función de lo anterior, la Escuela de Ingeniería Mecánica y el Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC), han tomado acciones en el asunto, en la búsqueda de los aspectos científicos y tecnológicos que puedan sustentar las acciones de desarrollo del sector de la fundición artesanal. En tal sentido, se ha propuesto a la Dirección General de Investigación de la USAC, un proyecto consistente en el levantamiento de un perfil tecnológico que pueda arrojar como resultado la cuantificación y cualificación de las necesidades de desarrollo del sector productivo señalado, a través de la realización de proyectos específicos emprendidos por la Universidad, trasladando los resultados al sector implicado a través de los medios disponibles.

Por lo antes expuesto, se han iniciado investigaciones concernientes al conocimiento de las variables científico-técnicas que entran en juego, y cuyos resultados pueden consultarse en la página de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la FIUSAC, existente en la Web. Una de las citadas investigaciones la constituye la presente.

## **2. Marco Teórico**

La variable más importante manejada por los artesanos que se dedican a la actividad de la fundición, aunque en la mayoría de los casos en forma empírica, la constituye la “colabilidad”, que no es más que la propiedad del metal en estado líquido, de reproducir fielmente las características del molde, sin que se produzcan

fallas y/o defectos en los productos obtenidos, aunque en la mayoría de los casos se maneja únicamente en función de los sobrecalentamientos de colada. (López S. y Aguilar R., 2013).

Por otro lado, la colabilidad depende directamente del parámetro ingenieril más importante que actúa durante el proceso de fundición, conocido como “fluidez”, que constituye la medida de longitud que el fluido metálico es capaz de alcanzar, antes de que se desarrolle la solidificación del mismo, y que a su vez depende directamente de las variables implicadas en el proceso, que son: el sobrecalentamiento de colada, la presión metalostática, el coeficiente de transferencia calórica en la interfaz metal-molde, el tipo de sustrato (material del molde), la composición química de la aleación, y el modo de solidificación del metal. (Aguilar R., 2011).

Los parámetros referidos, fluidez y colabilidad, son las variables responsables que actúan directamente sobre las estructuras resultantes de solidificación, como lo son las características morfológicas, de la red cristalina que se forma durante la última fase del proceso. Por otro lado, se sabe que, las estructuras metalográficas de los metales, son altamente responsables de las respuestas de estos a las sollicitaciones mecánicas a que se someten.

Aguilar R. y Biloni H. (1980a, b), realizan investigaciones sobre los parámetros que gobiernan la fluidez de aleaciones aluminio-cobre, con sobrecalentamiento nulo, y las estructuras de solidificación resultantes en aleaciones diluidas de Al-0.5%Cu.

Biloni H. 1983, hace un análisis exhaustivo de las variables que regulan el fenómeno de la solidificación, íntimamente ligado al proceso de la fundición de metales, y la incidencia de las mismas sobre los resultados obtenidos en las piezas fundidas.

Por otro lado, Aguilar R. (2011b) y (2012), hace un análisis específico de las propiedades de la fluidez, y amplía los conceptos de la solidificación a aleaciones más concentradas.

El análisis de resultados de investigaciones previas sobre probetas de fluidez, comparados con resultados experimentales en los laboratorios de Metalurgia, de química y de ensayos mecánicos del Centro de Investigaciones, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, sobre probetas de aleaciones aluminio-cobre, producidas mediante una metodología simulando los procesos de fundición artesanal, permitió concluir que, efectivamente, existe una relación directa entre las estructuras metalográficas de las aleaciones Al-Cu, con la dureza de las mismas, en función de las cantidades de soluto de probetas de composiciones definidas. (Fuentes M. y Aguilar R., 2017).

### **3. Hipótesis**

A la luz de los análisis realizados en el marco teórico, se plantea la siguiente hipótesis:

La dureza de las aleaciones Al-Cu, con los tenores de cobre propuestos, aumenta en forma directa en función de las cantidades de soluto agregadas durante el proceso.

#### 4. Metodología de Investigación

En función de investigaciones referidas sobre ensayos de fluidez de aleaciones Al-Cu, a sobrecalentamiento nulo, y los resultados estructurales obtenidos mediante ensayos, con diferentes cantidades de soluto agregadas al aluminio puro, dentro del “Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas” de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos, surgió la interrogante de ¿cómo se reflejan estos resultados en la práctica de la fundición artesanal y en qué beneficiarían a dicha industria?, lo que motivó una serie de investigaciones en el tema. Para el efecto, se construyó un equipo, representativo del proceso, cuyas fotografías se muestran en la Fig. (1). Se procedió a la obtención de chatarra de alta pureza, tanto de aluminio como de cobre, para la fundición de las aleaciones específicas, las cuales se produjeron por medio de adiciones de soluto, para lo que se fundió una matriz del eutéctico Al-33%Cu, y se realizaron ensayos de fundición en moldes de diferentes sustratos: arena, acero al bajo carbono, acero al medio carbono y grafito; a presión metalostática constante, y dos temperaturas de sobrecalentamiento, simulando las características de operación de los talleres de fundición artesanal.

Posteriormente, se procedió al corte longitudinal y transversal de la probetas, las que se pulieron hasta papel esmeril 500, se atacaron con diferentes reactivos, se analizaron las macroestructuras, y se les realizaron ensayos de dureza.

Es importante anotar que, aunque se realizaron pruebas sobre cuatro diferentes calidades de sustrato, debido a que los resultados obtenidos mediante cada uno de ellos guardan la misma tendencia, con relación a la composición química, en el presente artículo se hace referencia a los resultados obtenidos únicamente en lingoteras de grafito. De igual manera, se encontró que la diferencia de los sobrecalentamientos tiene muy poca incidencia sobre las estructuras obtenidas, por lo que se hace referencia únicamente a la temperatura de colada con 75°C de sobrecalentamiento.

##### 4.1. Práctica experimental

Fig. 1. Equipo experimental, López S., 2013.



Molde de arena



Moldes de grafito



En la figura no aparecen las lingoteras de acero. Una fue construida con un trozo de palanquilla de acero AISI 1035, y para la de bajo carbono se empleó un tubo sin costura, cédula 120. No se obtuvo diferencias significativas en los resultados estructurales de ambas.

## 5. Resultados Estructurales

Resultados anteriores:

A continuación se presentan algunos de los resultados estructurales más significativos, obtenidos en probetas de fluidez. Estos son representativos de cinco muestras, de cada evento, para cada tipo de aleación y condiciones de colada.

Estructuras de solidificación de probetas de fluidez. Aguilar R., 2011.

Fig. – 2 Aluminio de alta pureza. 35X

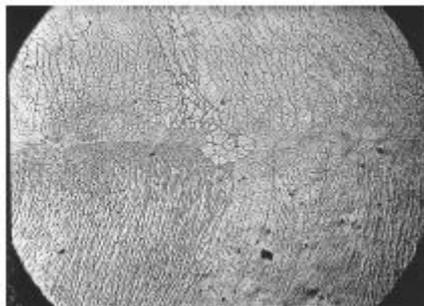


Fig. – 3 Aluminio 1% Cobre. 60X

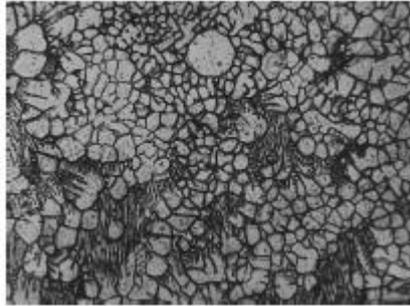


Fig. – 4 Aluminio 2% Cobre. 60X

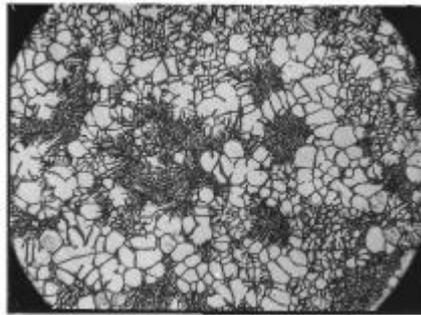
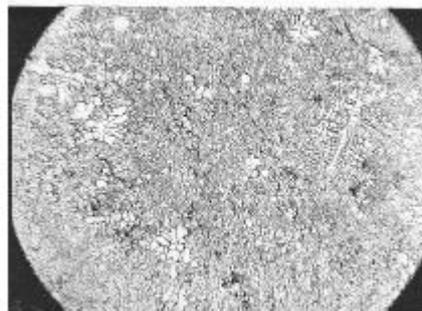


Fig. – 5 Aluminio 5 % Cobre. 35X



Las micrografías de las figuras de la 2 a la 5, coladas sin sobrecalentamientos y a presión metalostática constante, utilizando un sistema de vacío, muestran claramente los cambios estructurales de las probetas de fluidez en función de la composición química. La estructura desarrollada por el aluminio de alta pureza durante el ensayo es totalmente columnar, cuyo crecimiento se encuentra en el centro de la probeta, debido a la dirección de extracción calórica (molde canal de

cobre pulido, totalmente hermético). Mientras que las figuras 4 y 5, correspondientes a bajas concentraciones de soluto, muestran estructuras equiaxiales totales, de origen dendrítico, producto de la convección forzada. En la figura 6 se aprecia una estructura de grano fino equiaxial, de origen totalmente dendrítico, como resultado de la mayor concentración de soluto, y también del efecto de la multiplicación forzada, inducida por el efecto de la presión metalostática debida al sistema de vacío. Macroestructuras de solidificación de lingotes colados artesanalmente, en moldes de acero, a 750C de sobrecalentamiento. López S. y Aguilar R. 2013.

Fig. 6. – Aluminio de alta pureza



Fig. 7. – Al-1% Cu

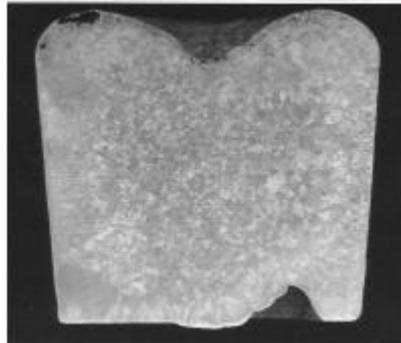
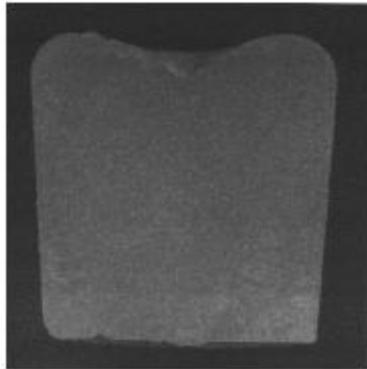


Fig. 8. – Al-3% Cu.



Fig. 9. – Al-5% Cu



Nótese la coincidencia de la formación de las estructuras macrográficas de los lingotes, colados artesanalmente, a presión metalostática normal y sobrecalentamiento constantes, con las estructuras de las probetas de fluidez. La figura 6, aluminio de alta pureza, solidifica con estructura predominantemente columnar, mientras las estructuras de los lingotes de baja aleación, figuras 7 y 8, muestran una estructura casi totalmente equiaxial, con poca existencia de la zona columnar, partiendo de una zona chill que pareciera inexistente. La figura 9 muestra una zona totalmente fina de forma equiaxial, sin trazas de la zona columnar, en función de su mayor concentración de soluto. Esto indica que las estructuras, tanto a nivel micro como macro, muestran una dependencia casi total de la composición química.

Las probetas coladas bajo las mismas condiciones, en moldes de arena y grafito, mostraron la misma tendencia, con muy pocas variaciones.

De igual manera, las probetas coladas con sobrecalentamientos mayores, no arrojaron ninguna diferencia significativa.

Macroestructuras de solidificación de lingotes de aleaciones Al-Cu, colados en moldes de grafito y 750C de sobrecalentamiento. Fuentes M. y Aguilar R. 2017.

Fig. 10. Aluminio de alta pureza - Corte transversal, 20X.



Fig.11. – Al-3% Cu - Corte transversal, 20X.

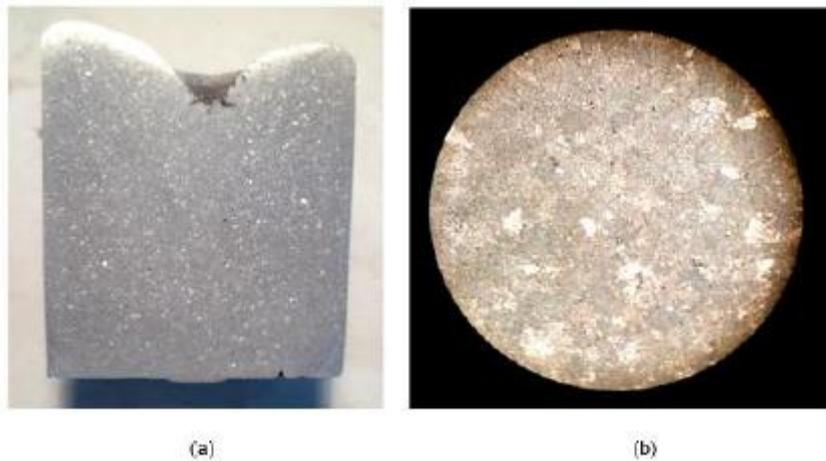
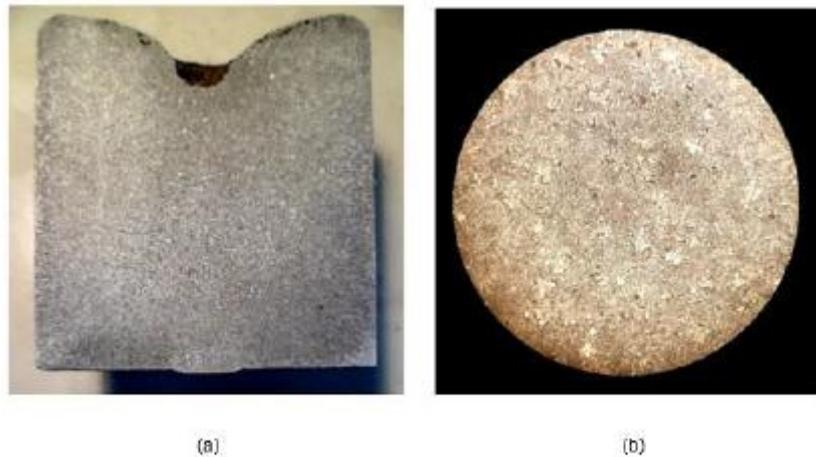


Fig.12. –Al-5% Cu - Corte transversal, 20X.



En las probetas (lingotes), coladas con fines de obtener una relación entre las estructuras macrográficas y las durezas de las aleaciones ensayadas, figuras 10, 11 y 12, puede notarse, al hacer la comparación, la coincidencia estructural con las probetas de fluidez y de fundición, en moldes de acero, analizadas anteriormente. Es decir, hay una dependencia significativa entre las estructuras de solidificación, y la composición química de las aleaciones, aunque los sustratos son de diferente material: cobre, acero y grafito. Al aumentar la cantidad de soluto, aumenta el fenómeno de la multiplicación, con la disminución significativa del tamaño de grano de las estructuras, asentándose el concepto de la fragmentación desde una nucleación totalmente dendrítica, que se observa claramente desde la composición Al-3%Cu y que es claramente definida en la aleación Al-5%Cu.

### 5.1. Ensayos de dureza

La Tabla 1, muestra algunos de los resultados de dureza obtenidos, de probetas coladas en moldes de grafito, a presión metalostática y sobrecalentamientos constantes. Cada resultado representa el promedio de cuatro ensayos en diferentes zonas de cada probeta.

Vale observar que los resultados mostraron similares tendencias en las probetas fundidas en moldes de arena y acero.

<b>Aleación</b>	<b>HB <math>\Delta T</math> 75°C</b>
<b>Al alta pureza</b>	<b>51.0</b>
<b>Al-1%Cu</b>	<b>62.4</b>
<b>Al-3%Cu</b>	<b>75.9</b>
<b>Al-5%Cu</b>	<b>92.8</b>

Tabla 1 – Durezas de las aleaciones Al-5%Cu. Moldes de grafito

En la tabla se aprecia claramente que la dureza aumenta en función directa con el incremento del soluto, siendo la menor dureza para el aluminio de alta pureza y la mayor para la aleación Al-5%Cu.

## 6. Análisis de los resultados

Como puede observarse en las gráficas de la 2 a la 5, las macroestructuras de las probetas de fluidez, coladas sin sobrecalentamientos, a presión metalostática constante en moldes de cobre, muestran una variación significativa en la caracterización y dimensionamiento de las estructuras de solidificación resultantes: mientras el concepto de solidificación con frente plano del aluminio de alta pureza, se traduce en un resultado de una zona columnar casi total, que crece en dirección opuesta a la de la extracción calórica. Las aleaciones muestran un desarrollo mayor de la zona equiaxial, creciente en función del aumento de soluto, siendo la más representativa de este fenómeno la aleación Al-5%Cu. Esto se comprueba con la observación de las figuras 10 y 12, de probetas coladas con igual sobrecalentamiento, pero en moldes de grafito. La figura 12, correspondiente a la aleación Al-5%Cu, muestra claramente una estructura totalmente dendrítica, con resultantes de granos muy finos, esto debido al efecto de la cantidad de soluto y al fenómeno de la multiplicación copiosa inducida por los frentes de solidificación dendrítica y la presión metalostática.

Por otro lado, al observar los resultados de dureza expuestos en la tabla 1, se observa que esta propiedad es creciente en función del contenido de soluto, lo que coincide con la disminución del tamaño de grano.

Los análisis realizados mediante los resultados expuestos son repetitivos cuando se cambia el sobrecalentamiento de colada, y cuando se cambia el tipo de sustrato. Esta tendencia se manifestó también en las probetas coladas en moldes de arena y acero.

## 7. Conclusiones

Del análisis de los resultados puede concluirse en lo siguiente:

1.- La forma y el tamaño de las estructuras de solidificación, cuando se mantiene la presión metalostática constante, dependen de:

- La cantidad de soluto de la aleación.
- La calidad de los moldes de colada (sustratos).
- En menor relación, de la temperatura de colada, que implica el sobrecalentamiento.

2.- La dureza de las estructuras resultantes se relaciona en forma directa con:

- La composición química de la aleación.
- El sustrato de colada.
- No se perciben efectos significativos en función de los sobrecalentamientos de colada.

3.- Existe una relación directa entre las estructuras macrográficas, la composición química y las propiedades de dureza de las aleaciones Al-Cu, fundidas artesanalmente.

4.- Se confirma la hipótesis propuesta, en cuanto a la dependencia del aumento de las durezas, en función de la composición química de la aleación, relacionándola directamente con los tenores crecientes de soluto.

5.- El manejo de las variables externamente controlables, analizadas, durante la fundición artesanal de las aleaciones Al-Cu, beneficia a este sector de la pequeña industria, por cuanto puede ofrecer productos de calidades controladas a los usuarios de la misma, manejando los conceptos de dureza y/o, resistencia, a través de su relación directa con la composición química, sin ir al análisis de las estructuras.

## **8. Recomendaciones.**

Al tenor de los resultados, se recomienda a los responsables del Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas, la difusión de los mismos, hacia los representantes y miembros del sector industrial de la fundición artesanal, por medio de los mecanismos adecuados de la USAC.

Esto es, seminarios y cursos directos, boletines especiales y asistencia técnica individualizada, tomando también en cuenta los resultados del levantamiento del perfil tecnológico referido.

Por otro lado, se recomienda a los encargados de los proyectos de investigación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la FIUSAC, realizar proyectos similares al presente en aleaciones de cobre, esto es bronce y latones.

## **9. Agradecimientos.**

El autor patentiza su agradecimiento a los Ingenieros Sergio A. López Rodríguez y Milton A. Fuentes Orozco, por su valiosa colaboración en la estructuración del presente artículo, y al M. Sc. Ingeniero Carlos Aníbal Chicojay, por su especial apoyo académico.

## **10. Referencias bibliográficas.**

Aguilar Rivas R. A. El fenómeno de la solidificación durante los ensayos de fluidez de aleaciones Al-Cu. Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, FIUSAC. Guatemala. Revista Escuela de Post-grado. 2012. P.17-22.

Aguilar Rivas R. A. Fluidity of Al-Cu Alloys with no Superheats and Solidification Mechanisms. Dr. Sc. Thesis, Atlantic International University, Honolulu, Hawaii, USA. 2011. UD13039SME20383.

Aguilar Rivas R. A. (2011). Parámetros básicos que condicionan la fluidez de aleaciones Al-Cu. Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, FIUSAC. Guatemala. Revista Científica. 2011. P. 44-55.

Aguilar Rivas R. A. and Biloni H. Fluidity of Al-Cu Alloys with Zero Superheat. Zeitschrift für Metallkunde, Bd. 71, 1980H.4 P. 264-268. Germany. 1980.

Aguilar Rivas R. A. and Biloni H. Vein Closing Mechanism in Fluidity Tests of Dilute Al-Cu Alloys. Zeitschrift Für Metallkunde, Bd. 71, H.5 P. 309-311. Germany. 1980

Biloni H. Solidification. En Cahn R. W. and Haasen P. (Third Edition), Physical Metallurgy (pp. 478-779). North Holland: Physics Publishing. 1983.

López Rodríguez S. A. Estructuras de Solidificación del Aluminio Fundido Artesanalmente. Trabajo de graduación. Escuela de Ingeniería Mecánica, FIUSAC, Guatemala. 2013.

8. López Rodríguez S. A. y Aguilar Rivas R. A. Colabilidad del Aluminio de Alta Pureza y Aleaciones Al-Cu Ligeramente Concentradas. FIUSAC, Guatemala. Revista Científica. 2013. P.32-35.

Fuentes Orozco M. A. y Aguilar Rivas R. A. Características macrográficas y mecánicas de aleaciones aluminio-cobre fundidas artesanalmente. EIM-CII. FIUSAC. Guatemala. 2017.