

# OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE ALAMBRES DE ALEACIÓN 6201 T-81

*Manufacturing process optimization alloy wire 6201 T-81*

Fecha de recibo del artículo: Julio de 2011 - Fecha de aceptación: Septiembre de 2011

Néstor Caicedo Solano

Universidad Autónoma del Caribe / Grupo de Investigación en Gestión Moderna de Operaciones  
Barranquilla, Colombia. nestor.caicedo@uac.edu.co

Ramón Pons Murgía

Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia. ponscu@yahoo.com

## RESUMEN

Durante el proceso de fabricación de alambres de aleación 6201 T-81 puede llegar a generarse un incremento del porcentaje de producto no conforme por baja carga de rotura, baja conductividad e incumplimiento del diámetro, a pesar de que la colada de aleación cumpla con los requisitos de composición química especificados en la Norma ASTM B398 (alambres de aleación de aluminio 6201 T-81) y que además, durante el proceso de trefilación de los alambres, se controlen las variables mecánicas y eléctricas que garantizan la calidad final del producto en el último proceso: el tratamiento térmico. Este trabajo está enfocado al mejoramiento del proceso de fabricación de los alambres de aleación 6201 T-81 para conductores eléctricos AAAC, utilizando estrategias experimentales, fundamentos de dominancia y control estadístico de procesos, con el fin de optimizar las condiciones de carga de rotura, conductividad y diámetro.

## Palabras clave

Control estadístico de procesos, diseño de experimentos, mejora de calidad, dominancia.

## ABSTRACT

During the process that makes the wires alloy 6201 T-81, can generate an increase in the percentage of nonconforming product by low tensile strength, low conductivity and no satisfaction in diameters, despite the casting alloy produced in foundries, meets the chemical composition specified in ASTM B398 (aluminum alloy wires 6201 T-81) and also during the whole process of wire drawing operation of wires, all mechanical and electrical variables are controlled to ensure final product quality in the latter process, the heat treatment. This work is focused On improving the fabrication process on alloy wires 6201 T-81 for the manufacture of electrical conductors AAAC, using experimental strategies, fundamentals of dominance and statistical process control to optimize the critical characteristics like tensile strength, the conductivity and diameter.

## Keywords

Statistical process control, design of experiments, quality improvement, dominance.

## INTRODUCCIÓN

En los procesos de fabricación de conductores eléctricos AAAC (All Aluminium Alloys Conductor), todos los alambres que lo componen son de aleación de aluminio 6201 T-81 [15].

Para la fabricación de esta aleación existen procedimientos que indican la composición química y la forma como deben alearse los elementos, los controles que se deben efectuar durante todas las etapas de la obtención de la colada y del alambro de diámetro 9.5 mm.

Una vez obtenido este alambro se continúa con el proceso de treflado, que tiene como objetivo la reducción de área del material, por medio de dados que reducen el área, pasando de calibre 9.5 mm hasta alambres de calibres 4.77 mm.

Una vez treflados los lotes de alambres, se someten a un proceso de tratamiento térmico de recocido, con la finalidad de estabilizar su estructura interna y alcanzar propiedades mecánicas y eléctricas especificadas por las normas ASTM B398 (American Society of Testing Materials, B398 Series) y NTC 2729 (Norma Técnica Colombiana 2729), controlando tiempos y temperaturas [7] [10].

Existen diversas modalidades de recocido, según el estado que se desee que alcance el material. Los tratamientos térmicos de recocido más empleados en la práctica diaria de las aleaciones de aluminio son: el recocido de homogeneización, de restauración y recristalización y el recocido con tratamiento de bonificación.

La presente investigación aplicada está enfocada al mejoramiento del tratamiento térmico de recocido utilizado en la fabricación de alambres de aleación 6201 T-81 para la fabricación de conductores eléctricos AAAC [7], usando el diseño de experimentos y corridas reales de confirmación, con el objetivo de minimizar el porcentaje de producto no conforme por baja carga de rotura, baja conductividad y diámetro, debido a que estos alambres se utilizan para el cableado de transmisión eléctrica de alto voltaje.

## ESTRATEGIAS DE LOS DISEÑOS EXPERIMENTALES APLICADOS A LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN DEL ALAMBRE 6201 – T81

### Estrategias para el proceso de colada

Para este proceso se escogió el modelo de un experimento factorial fraccionado, con 5 factores - 32 corridas - 4 bloques, con lo cual se pretendía estimar los efectos principales de los factores y determinar si éstos estaban confundidos o no; al igual, estimar los efectos de interacción [1].

El nivel de confusión de este experimento fue de Resolución III, es decir, que los alias de los

efectos principales eran las interacciones de segundo orden, y éstas, a su vez, alias de otras interacciones de segundo orden.

En el experimento se consideraban dos respuestas:

- Carga de rotura (Kg/mm<sup>2</sup>)
- Conductividad (% IACS).

Los cinco factores [2] [3] que se tuvieron en cuenta fueron:

- Temperatura de fundición (°C)
- Velocidad de dosificación (cm/min)
- Velocidad de la rueda de colada (m/min)
- Temperatura de la emulsión (°C)
- Temperatura del aceite (°C)

**Tabla 1. Niveles utilizados por los factores [5] [6]**

Factor	Rango bajo	Rango alto
Temperatura de fundición (°C)	700	850
Velocidad de dosificación (cm/min)	5	20
Velocidad de la rueda de colada (m/min)	6	12
Temperatura de la emulsión (°C)	40	70
Temperatura del aceite (°C)	40	65

**Tabla 2. Variables respuestas del proceso de colada**

Respuestas	Unidad	Valor mínimo para el proceso	Característica enfoque Taguchi
Carga de rotura	Kg/mm <sup>2</sup>	19.5	El valor nominal es mejor
Porcentaje de conductividad	% IACS	50	El valor mayor es mejor

### Estrategia para el proceso de trefilación

Una disposición factorial de tratamientos constituye una herramienta eficaz para el diseño experimental en el trabajo de calidad, ya que es común que haya diversos factores (variables) que afecten incluso el desempeño sencillo del producto o proceso. La cantidad de experimentos generados por un factorial completo (todas las combinaciones de tratamiento posible), optimiza los recursos disponibles luego de unos cuatro o cinco factores.

En estudios de calidad fuera de línea son útiles la confusión de factores en bloques y las réplicas fraccionales para reducir la cantidad de ex-

perimentación en tiempo real, incrementando la eficacia y conservando el rendimiento de la información. La confusión da como resultado la pérdida de resolución o la capacidad para aislar y medir todos los efectos (principales e interacciones), relativas a la resolución total en un experimento factorial completo.

Para este proceso se escogió el modelo de un experimento factorial fraccionado con 4 factores - 16 corridas - 2 bloques; con lo cual se pretendía estimar los efectos principales de los factores y determinar si éstos estaban confundidos o no, al igual estimar que los efectos de la interacción fueran evidentes.

El nivel de confusión [11] del experimento fue de Resolución III, es decir, que los alias de los efectos principales eran las interacciones de segundo orden, y éstas, a su vez, eran alias de otras interacciones de segundo orden.

En el experimento se tuvieron en cuenta tres respuestas:

- Diámetro del alambre (mm)
- Carga de rotura (Kg/mm<sup>2</sup>)
- Conductividad (% IACS).

Los cuatro factores considerados fueron:

- Tiempo de envejecimiento (horas)
- Combinación Mg<sub>2</sub>Si (%)
- Concentración de Fe (%)
- Reducción de área (%)

**Tabla 3. Niveles de factores para trefilación**

Factor	Rango bajo	Rango alto
Tiempo de envejecimiento	48 horas	720 horas
Combinación de MgSi	0.95%	1.27%
Concentración de Fe	0.15%	0.30%
Reducción de área	20.4 %	20.8 %

**Tabla 4. Variables respuestas del proceso de trefilación**

Respuestas	Unidad	Valor mínimo para el proceso	Característica enfoque Taguchi
Carga de rotura	Kg/mm <sup>2</sup>	27	El valor nominal es mejor
Porcentaje conductividad	% IACS	51	El valor nominal es mejor
Diámetro	mm	4.77	El valor nominal es mejor

### Estrategias para el proceso de tratamiento térmico

Para este proceso se escogió el modelo de un experimento con 6 factores - 8 corridas - 1 bloque, con lo cual se pretendía estimar los efectos principales de los factores y determinar si éstos estaban confundidos o no, al igual que los efectos de interacción pudieran ser estimados claramente.

El nivel de confusión del experimento fue de Resolución III, es decir, que los alias de los efectos principales eran las interacciones de segundo

orden, y éstas, a su vez, fueron los alias de otras interacciones de segundo orden.

En el experimento se consideraban dos respuestas:

- Carga de rotura (Kg/mm<sup>2</sup>)
- Conductividad (% IACS).

Los seis factores que se tuvieron en cuenta fueron:

- Temperatura del horno (°C).
- Tiempo de tratamiento (horas)
- Combinación de Mg<sub>2</sub>Si (%)
- Concentración de Fe (%)
- Tiempo de envejecimiento (%)
- Diámetro del alambre (mm)

### CORRIDAS DE CONFIRMACIÓN EN TIEMPO REAL PARA EL PROCESO DE TRATAMIENTO TÉRMICO

Con base en los nuevos niveles de los factores arrojados por el diseño de experimentos, se efectuaron diez (10) corridas reales (Tabla 5).

### ANÁLISIS DEL EXPERIMENTO CON CORRIDAS REALES DE CONFIRMACIÓN

Las filas 3, 4, 5 y 6 son las que presentan los mejores valores de las respuestas carga de rotura

**Tabla 5. Resultado de corridas reales del proceso de tratamiento térmico**

Corridas	Factores significativos								Variables de respuesta		Conforme		
	Diámetro (mm)		Temperatura horno (°C)		Tiempo tratamiento (horas)		% Fe		% Mg <sub>2</sub> Si			Carga de rotura (Kg/mm <sup>2</sup> )	Conductividad eléctrica (%IACS)
	4,72	4,77	150	180	8	12	0,2	0,3	0,95	1,27	31,12	52,5	Sí
1											31,8	54,6	Sí
2											32,1	54,3	Sí
3											32,1	53	Sí
4											32,2	53,5	Sí
5											32,2	53,8	Sí
6											32,2	53,1	Sí
7											33,3	52,7	Sí
8											33,6	52,8	Sí
9											34,3	52,9	Sí
10											34,3	52,7	Sí

y conductividad eléctrica de los alambres de diámetro 4.77 mm ensayados. Como se puede observar, los niveles de los factores coinciden con los resultados arrojados en las corridas experimentales realizadas en el software Statgraphics®; las demás filas cumplen con los requisitos mínimos de las variables de respuesta.

## FACTORES SIGNIFICATIVOS QUE AFECTAN LAS VARIABLES DE RESPUESTA DEL ALAMBRE DE ALEACIÓN 6201 - T81

### Proceso de colada

#### Carga de rotura (Kg/mm<sup>2</sup>)

- Velocidad de dosificación (cm/min): Permite la afinación del grano para evitar las grietas en la barra de la aleación de aluminio. Si la barra presentaba grietas, éstas partían el alambroón al momento de enrollarse; si llegaban a estar dentro del alambroón, partían al momento de trefilar el material. Este factor debe mantenerse en su nivel más alto (20 cm/min).
- Temperatura de la emulsión (°C): Es importante, ya que la barra se debe mantener caliente, a temperatura controlada, para que estén solubles los elementos aleantes; si no, los elementos aleantes se precipitan y no llegan a generar endurecimiento en el alambroón, dando como resultado una baja carga de rotura del material trefilado. Este factor debe mantenerse en su nivel más alto (70°C).
- Temperatura de fundición (°C): No debe estar a altas temperaturas; es decir, por encima de la especificada, ya que al entrar el material líquido a la rueda de colada con una temperatura muy elevada (>850°C) el proceso de enfriamiento por chorro de agua no lograría enfriarla lo suficiente como para convertirla en una barra endurecida, por lo tanto la carga de rotura de este mate-

rial sería baja. Este factor debía mantenerse en su nivel más bajo (700°C).

#### Conductividad eléctrica (% IACS)

- Temperatura de la emulsión (°C): La emulsión debe mantener la barra en una temperatura controlada, para que estén solubles los elementos aleantes, si permanece la temperatura controlada en su rango bajo, la estructura interna de la barra, al enfriarse por chorro de agua, no presenta cristalización brusca y/o precipitación de los aleantes, mejorando el paso de la corriente eléctrica a través de ésta. Este factor debía mantenerse en su nivel más bajo (40°C).
- Temperatura de fundición (°C): Para elevar la conductividad eléctrica del material, la temperatura de fundición debe mantenerse cerca del rango alto, para que los aleantes fundan junto con el material primario con el fin de que la mezcla sea homogénea y no presente precipitación, en especial el silicio (Si) que es el que afecta de manera significativa la conductividad eléctrica de la aleación. Este factor debía mantenerse en su nivel más alto (850°C).

**Tabla 6. Niveles propuestos para factores significativos del proceso de colada**

Respuestas	Factor	Rango bajo	Rango alto
<b>Carga de rotura (Kg/mm<sup>2</sup>)</b>	Velocidad de dosificación (cm/min)	*	20
	Temperatura de emulsión (°C)	*	70
	Temperatura de fundición (°C)	700	*
<b>Conductividad eléctrica (% IACS)</b>	Temperatura de la emulsión (°C)	40	*
	Temperatura de fundición (°C)	*	850

## Proceso de trefilación

### Carga de rotura (Kg/mm<sup>2</sup>)

- Concentración de hierro (Fe): En la aleación 6201 se encuentra el elemento hierro en una cantidad mayor a los elementos restantes, ya que hace posible obtener endurecimientos superiores bajo un mismo proceso. Este elemento se alea en exceso con la finalidad de aumentar ligeramente la resistencia sin un descenso en las características plásticas. Este factor debe mantenerse en su nivel más alto (0.30%).
- Reducción de área: Al hacer reducción de área del material por medio del proceso de trefilado, se endurece el material por trabajo en frío, incrementando el número de dislocaciones. Al reducir el área en varios pasos de trefilación (dados) se aplica un esfuerzo mayor a la aleación, incrementándose el esfuerzo de fluencia y la carga de rotura. Este factor debe mantenerse en su nivel más alto (20.8 %).

### Conductividad eléctrica (% IACS)

- Concentración de Mg<sub>2</sub>Si: El magnesio y el silicio forman un compuesto intermetálico: el Mg<sub>2</sub>Si, con una proporción estequiométrica de Mg = 1.73Si, causante de los precipitados, que origina el endurecimiento cuando se realiza el envejecimiento artificial o natural de la aleación 6201; por lo tanto, al encontrarse la estructura interna con heterogeneidades locales de los compuestos intermetálicos, se disminuye el paso de la corriente eléctrica. Este factor debe mantenerse en su nivel más alto (1.27%) [12].

### Diámetro del alambre (mm)

- Reducción de área: La reducción de área es inversamente proporcional a las tolerancias mínimas y máximas requeridas en el diámetro del alambre. Por lo tanto, entre mayor sea la reducción de área aplicada en la trefi-

lación del alambre, menor será el diámetro final obtenido y viceversa. Este factor debe mantenerse en su nivel más bajo (20.8 mm).

**Tabla 7. Niveles propuestos para factores significativos del proceso de trefilación**

Respuestas	Factor	Rango bajo	Rango alto
Carga de rotura (Kg/mm <sup>2</sup> )	Concentración de Fe (%)	*	0.30
	Reducción de área (%)	*	20.8
Conductividad eléctrica (% IACS)	Combinación de Mg <sub>2</sub> Si (%)	*	1.27
Diámetro del alambre (mm)	Reducción de área (%)	20.4	*

## Proceso de tratamiento térmico

### Carga de rotura (Kg/mm<sup>2</sup>)

- Combinación de magnesio y silicio (Mg<sub>2</sub>Si): Ya que esta combinación de elementos es la que se precipita en la aleación, ocupa las vacantes de la estructura cristalina del aluminio, fortalece la estructura e incrementa la resistencia mecánica del material, que se traduce en un aumento de la carga de rotura. Este factor debe mantenerse en su nivel más alto (1.27%).
- Diámetro del alambre (mm): Entre menor sea el diámetro (hacia la tolerancia mínima permitida), mayor será la carga (Kgf), que necesita para fracturar, ya que en el proceso de trefilación se incrementan las propiedades mecánicas debido a las reducciones de área que deben efectuarse al material. Este factor debe mantenerse en su nivel más bajo (4.72 mm).

### Conductividad (% IACS)

- Concentración de hierro (Fe): Afecta de manera significativa el valor de la respuesta

ya que el hierro es un mal conductor de la corriente eléctrica. Cuando los átomos de hierro se intercalan en la estructura cristalina del aluminio, obstaculizan el paso de la corriente; esto produce un aumento de la resistencia eléctrica por el efecto del hierro que se opone al paso de la corriente, disminuyendo la conductividad. Este factor debe mantenerse en su nivel más bajo (0.15%).

- Temperatura del horno de envejecimiento: Entre mayor sea la temperatura del horno, mayor será la estabilización molecular que reciba el material, disminuyendo la resistencia eléctrica de la estructura interna. Este factor debe mantenerse en su nivel más alto (180°C).
- Tiempo de tratamiento térmico: Entre más tiempo de tratamiento térmico reciban los alambres, mayor será la estabilización de las propiedades que alcance. Este factor debe mantenerse en su nivel más alto (12 horas).

**Tabla 8. Niveles propuestos para factores significativos del proceso de tratamiento térmico**

Factor	Rango bajo	Rango alto
Temperatura del horno	*	180°C
Tiempo del tratamiento	*	12 horas
Combinación de Mg - Si	*	1.27%
Concentración de Fe	0.15%	*
Diámetro del alambre	4.72 mm	*

Manteniendo los factores en estos niveles, los valores de las variables de respuesta carga de rotura y conductividad eléctrica cumplirán con los valores mínimos requeridos por la norma del material.

## CRITERIOS DE CONTROL DE PROCESOS PARA LA FABRICACIÓN DEL ALAMBRE DE ALEACIÓN 6201 - T81 [4]

Si bien es cierto que la ejecución de las tareas de control se delega generalmente a los operarios, es común que antes de comenzar a producir se impongan determinados criterios que debe cumplir el proceso. Esos criterios se extienden a tres áreas:

- Criterios de preparación: En algunos procesos, el inicio de la producción debe esperar a que determinados criterios de preparación se satisfagan (Una cola de piezas esperando por un ensayo).
- Criterios de ejecución: En muchos procesos se necesita verificar periódicamente la ejecución, para decidir bien si el proceso debe continuar o si se debe parar y proceder a reajustarlo. Estos criterios de control se refieren a temas como frecuencia de verificación, tamaño de muestra, formas de elección de la muestra, pruebas que se deben realizar y tolerancias por satisfacer.
- Criterios de mantenimiento de equipos: En todos los procesos, los equipos deben controlarse a fin de verificar que mantienen los niveles de calidad adecuados. El mantenimiento incluye un detallado esquema del conjunto de criterios que definen las características de calidad que se van a controlar y que en un determinado momento se convierten en variables críticas por controlar.

Para la fabricación del alambre de aleación 6201 - T81 los tres criterios de control en el proceso productivo generan la necesidad de concebir de manera diferente y mejorada el control de proceso para este producto, razón por la cual se plantea un nuevo sistema de control y unas variables de dominancia que inciden directamente y de manera significativa las variables de respuesta estudiadas en el desarrollo del experimento.



Según Juran, existen cinco tipos de categorías de dominancia en los procesos [14], según las cuales se identificaron las siguientes:

- Preparación dominante: Estos procesos normalmente tienen altos índices de reproducibilidad y estabilidad a lo largo de las corridas de producción. En estos procesos el sistema de control está basado en la verificación de los pasos de preparación previos al inicio de la producción.
- Tiempo dominante: En ellos el proceso está sujeto a cambios progresivos en el tiempo, por ejemplo, el desgaste de herramientas o el calentamiento de máquina, por lo tanto el sistema de control enfatiza sus actividades en la verificación del proceso, teniendo en cuenta la retroalimentación que pueda generar el mismo y permitir que el operario pueda reajustar, compensando el cambio.
- Componentes dominantes: Es claro que

este concepto indica que los materiales y componentes de entrada al proceso son las variables más influyentes en las variaciones. Aquí el sistema de control se orienta directamente a la relación con los proveedores, incluyendo muestreos e inspecciones en la recepción de los lotes de materia prima más pequeñas.

- Operario dominante: En estos procesos, la calidad depende principalmente de la experiencia y destreza de los operarios de producción. El sistema de control en estos casos apunta a la formación, entrenamiento y certificación de los operarios.
- Información dominante: El sistema de control en este tipo de variables se dirige a la precisión y la actualización en tiempo real de la información que se facilita a los operarios.

En las Tablas 9 y 10 la propuesta de control según los estados de dominancia.

**Tabla 9. Tipos de dominancia y herramientas de control**

		Colada		Trefilación		Tratamiento térmico	
		Actual	Propuesta	Actual	Propuesta	Actual	Propuesta
<b>PREPARACIÓN DOMINANTE</b>	Inspección de las condiciones del proceso	X					
	Inspección de la 1a. pieza	X					
	Vigilar lote	X					
	Control previo	X					
	Ajuste estrecho de márgenes	X					
	Inspección visual de atributos	NA					
<b>TIEMPO DOMINANTE</b>	Inspección periódica			X		X	
	Gráfico X			NA		NA	
	Gráfico mediana			NA		NA	
	Gráfico X y R				X	X	
	Control previo			X		X	
	Ajuste estrecho de márgenes			X		X	
	Gráfico p				X		X
	Verificar variables del proceso			X		X	
Memorización automática			NA		X		
Auditorías de proceso			X		X		



**Tabla 10. Tipos de dominancia y herramientas de control II**

		Colada		Trefilación		Tratamiento térmico	
		Actual	Propuesta	Actual	Propuesta	Actual	Propuesta
<b>COMPONENTES DOMINANTES</b>	Clasificación de proveedores						
	Inspección de entradas					X	
	Control previo de operaciones					X	
	Inspección de aceptación					X	
	Evaluación de prototipos					X	
<b>OPERARIO DOMINANTE</b>	Inspecciones de aceptación	X					
	Gráfico p	NA					
	Gráfico c	NA					
	Clasificación puntuada de cada operación	NA					
	Descertificación de operarios		X				
<b>INFORMACIÓN DOMINANTE</b>	Auditorías del proceso	X					
	Información generada por ordenador					X	
	Verificación <<activa>> de la documentación					X	
	Entradas y salidas de datos electrónicos					X	
	Auditorías de proceso					X	

## RESULTADOS OBTENIDOS

Adicional a la identificación de los factores significativos y sus respectivos valores nominales de uso en la producción de alambres, se obtuvieron los indicadores de capacidad de procesos para las variables críticas de calidad, antes y después de la optimización, incluyendo los costos de no calidad (Tabla 11).

**Tabla 11. Mejora técnico-económica del proceso**

<b>Variable</b>	<b>Antes</b>	<b>Después</b>
Diámetro	Cp=0,41	Cp=1,09
Carga de rotura	Cp=0,41	Cp=0,88
Conductividad	Cp=0,37	Cp=1,08
<b>Variable</b>	<b>DPMO</b>	<b>DPMO</b>
Diámetro	256767	37700
Carga de rotura	235691	10274
Conductividad	248008	22932
<b>Costos de No Calidad</b>		
	12% total facturado	3% total facturado
	\$ 756.598.884	\$ 27.237.550

## CONCLUSIONES

- El proceso en general de producción de alambres 6201-T81 se inicia en el monitoreo y control de las variables que inciden desde los procesos críticos de colada, trefilación y tratamiento térmico.
- Si se mantienen los factores significativos en los rangos propuestos, podría asegurarse que el proceso de fabricación será uniforme y se convertirá en el principal.
- El control de estos procesos debe convertirse en parte de los objetivos de calidad de las organizaciones; esto conlleva a que se diseñen mecanismos eficaces de monitoreo que aseguren los cambios en las variables críticas del producto y que la desviación de medición del rango especificado sea detectada con más rapidez y así tomar acciones preventivas, correctivas y/o de mejoramiento antes de que originen un problema de gran escala en el control del proceso de tratamiento térmico o en el producto final [8].

## REFERENCIAS

- [1] A. M., Law and W. D., Kelton. "Simulation Modeling and Analysis". McGraw-Hill, New York, 1982.
- [2] ASKELAND, Donald R. La ciencia e ingeniería de los materiales. México, D. F.; Grupo Editorial Iberoamericana, 1985. 556 p.
- [3] AMERICAN STANDARD FOR TESTING MATERIALS. "Standard Specification for Aluminium Alloy 6201 – T81 Wire for Electrical Purpose". 2001. 4 p. ASTM B398.
- [4] D., Besterfield. "Control de Calidad". 4ta Edición. McGraw-Hill, Ciudad de México, 1995.
- [5] D. C., Montgomery. Diseño y Análisis de Experimentos. 3a Edición. Wiley, New York, 1991.
- [6] G. E. P, Box, W. G., Hunter and J. S., Hunter. "Statistics for Experimenters". Wiley, New York, 1978.
- [7] Handbook of Aluminium. Aluminium Company of Canada Ltd., Third Edition (Revised), 1970.
- [8] H., Noori y R., Radford. "Administración de Operaciones y Producción". 1a Edición. McGraw-Hill. Bogotá, 1997.
- [9] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Normas colombianas para la presentación de trabajos de investigación. Segunda actualización. Santafé de Bogotá D. C.: ICONTEC, 1996. 126 p. NTC 1307.
- [10] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Norma Técnica Colombiana para alambre de aleación de aluminio 6201 - T81.
- [11] J. A., Cornell. "Experiments with Mixture". 2a ed. Wiley, New York. 1990.
- [12] J. B., Lowe. "Improved Medium Strength Al-Mg-Si Alloys". Kingston Works, Report KW - 462, August 1963.
- [13] J. M., Juran y A. B., Godfrey. Manual de Calidad. 5a Edición. McGraw-Hill, Volumen 2, Madrid. 2001.
- [14] R. E., Walpole y R. H., Myers. Estadística y probabilidad para ingenieros y científicos. 4a Edición. McMillan, New York, 1989.
- [15] Salvador Moya, María Dolores. Aleaciones de aluminio y microscopía. Barranquilla: Universidad del Norte, 2001. 96 p.
- [16] W. G., Barry. "Extrusion Metallurgy and Quality". Alcan Research and Development Limited: Kingston, September 1969.