

Gestión de la producción

---

Production Management



# Incremento de la productividad en proceso de extrusión de perfiles de aluminio con *billets* de aleación experimental 6063

**Bladimiro Hernán Navas Olmedo\***

Universidad Técnica de Cotopaxi. Latacunga, Ecuador

**Hernán Alberto Navas Moscoso\***

Universidad Técnica de Ambato. Ecuador

Recibido: 27 de marzo del 2017 / Aprobado: 24 de mayo del 2017

**RESUMEN:** El efecto de la composición química de la materia prima en el proceso de extrusión se ve reflejado en los indicadores de gestión. Al variar la constitución de los aleantes principales para producir *billets* de aluminio de aleación 6063 en un equipo de fundición de colada continua horizontal, fue posible incrementar la productividad en el proceso de extrusión. En nueve turnos de trabajo consecutivos, en los que se utilizaron *billets* homogeneizados AA 6063, se registró una velocidad de extrusión promedio de 7,37 mm/s con un incremento en la productividad del 13,54 % y un recobrado promedio del 82,42 %.

*Palabras clave: norma técnica AA 6063 / billets / extrusión / productividad / aluminio-aleaciones*

## Improvement of productivity in aluminum extrusion process with experimental aluminum alloy 6063 cast *billets*

**ABSTRACT:** The chemical composition of the raw material has a direct effect on the extrusion process and it is reflected in the key performance indicators. By varying main alloying elements levels to produce AA 6063 cast billets made in horizontal continuous casting machine, it was possible to increase productivity levels during extrusion process. During nine consecutive work shifts using homogenized billets of aluminum alloy 6063, a 7.37 mm/s average extrusion speed was registered; it means there was a significant increase in productivity of 13.54 % with an average recovery of 82.42 %.

*Keywords: AA 6063 standard / billets / extrusion / productivity / aluminum alloys*

---

\* Correos electrónicos: hernannavasolmedo@gmail.com,  
hernannavasmoscoso@gmail.com

## 1. INTRODUCCIÓN

La técnica de extrusión del aluminio requiere una serie de condiciones que individual o colectivamente influyen de forma considerable en el producto final, en lo que concierne a productividad, calidad y costo de producción.

Además de los parámetros operacionales ligados a la propia técnica de la extrusión, convergen otros factores que influyen en este proceso, como son el equipo de extrusión, la prensa, sus instalaciones auxiliares y la matricería con sus utillajes de apoyo. Tampoco se debe olvidar la materia prima en sus diferentes variedades de aleaciones (especialmente la AA 6063, de mayor demanda en el mercado).

Se considera un incremento de la productividad cuando se usa la misma cantidad de insumos y se obtiene la misma calidad en el producto final; sin embargo, en empresas extrusoras de aluminio no sirve de mucho aumentar la productividad si los perfiles al final de su tratamiento térmico correspondiente no cuentan con las características mecánicas que garanticen un producto de calidad. También, cabe mencionar que estas compañías utilizan dos principales indicadores de gestión: la productividad y el recobrado. Ambos dependen de la composición química de la materia prima con que se obtienen perfiles de aluminio que cumplan las normas técnicas específicas que aseguren su calidad.

Utilizar chatarra de aluminio en un porcentaje específico como materia prima en el proceso de fundición de colada continua horizontal para obtener *billets* AA 6063 exige un control de calidad que permita controlar la cantidad de aleantes principales durante su proceso de moldeado.

### 1.1 Parámetros operacionales en extrusión

Entre los parámetros operacionales, se consideran los tres más importantes: presión, temperatura y velocidad.

Una de las características de la prensa de extrusión es la fuerza total (expresada generalmente en toneladas) que es capaz de ejercer sobre el tocho durante la extrusión.

En términos prácticos, el valor más relevante es la presión específica de extrusión, que se define como la relación que existe entre la fuerza total de la prensa y la sección del contenedor empleado en ella. Generalmente, este valor se representa en  $\text{kg/mm}^2$ .

$$P = \frac{p \times 1000}{\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)}$$

Donde:

$P$  = presión específica (kg/mm<sup>2</sup>)

$p$  = fuerza total de la prensa (toneladas)

$d$  = diámetro del contenedor (mm)

De la fórmula anterior se desprende que la presión específica de una prensa varía según el diámetro del contenedor que se emplee. Así pues, cuanto menor sea este diámetro, mayor será la presión específica que se obtenga.

Es muy importante tener en cuenta que el valor de la presión específica en toda operación de extrusión debe estar comprendido dentro de ciertos límites. El límite superior viene condicionado por la resistencia máxima del acero empleado en la fabricación de matrices, los elementos de apoyo y la fuerza mínima necesaria para la deformación plástica del aluminio en sus diferentes aleaciones.

La presión que se necesita para extruir aluminio varía según la aleación, la temperatura del tocho, la sección del perfil que se va a extruir y la velocidad de extrusión. Además de esto, la presión depende de la longitud del tocho que se utilice. Así, cuanto menor sea su longitud, menor será la presión necesaria.

De aquí se desprende que la presión necesaria para la extrusión de un tocho de aluminio varía a medida que la extrusión avanza, debido naturalmente a que la longitud del tocho va haciéndose cada vez más pequeña.

La velocidad de extrusión es el factor que tiene más relevancia, pues de esta depende la cantidad de producción que se consigue en cada una de las prensas, con el objetivo de obtener datos para la medición de la productividad.

## 1.2 La materia prima en el proceso de extrusión

Existen tres grupos principales de materia prima en el proceso de extrusión de aluminio:

- Aleaciones fáciles de extruir
- Aleaciones moderadamente difíciles de extruir
- Aleaciones difíciles de extruir

De acuerdo con Saha (2000), las aleaciones de aluminio pertenecientes a los grupos I y II son suaves y de grado medio; especialmente, las de la serie 6000, que tienen una alta extrudibilidad y permiten que se obtengan perfiles con formas complejas.

Entre los aleantes principales de la serie 6000 se encuentran el magnesio y el silicio. Estos elementos, al combinarse, precipitan y forman siliciuro de magnesio, que en solución sólida ayuda a fortalecer la estructura cristalina del aluminio.

Con la aleación 6063, es posible obtener perfiles con aplicaciones arquitectónicas, ornamentales y estructurales, porque a su composición química en el proceso de extrusión y el tratamiento térmico T5. Este último permite que el perfil alcance las propiedades mecánicas deseadas para lograr un mayor fortalecimiento mediante el endurecimiento por precipitación. Para ello, se parte de una secuencia controlada de calentamiento (de 245 °C a 170 °C) por un tiempo aproximado de tres a seis horas con el respectivo enfriamiento del perfil (Rio Tinto Alcan, 2008).

### 1.3 Efectos de la composición química de la aleación de aluminio 6063 durante el proceso de extrusión

La composición química de los *billets* de aluminio ejerce una influencia directa en los procesos de homogeneizado, extrusión y envejecido artificial; en consecuencia, esto se reflejará en las propiedades mecánicas del producto final.

En la aleación AA 6063, la incidencia de sus aleantes principales es directa. Así, un exceso de magnesio dificultará la extrusión, mientras que bajas concentraciones de este elemento mitigarán su resistencia a la corrosión, ductilidad y su respuesta al proceso de anodizado.

El silicio es un elemento endurecedor de la aleación y colabora para obtener una buena respuesta de los perfiles durante el proceso de envejecido artificial. Acorde con la recomendación técnica (Rio Tinto Alcan, 2008), si se alcanza 0,15 en porcentaje de peso de silicio libre, se pueden obtener óptimas propiedades mecánicas; pero si el silicio libre es mayor de 0,15, el límite de fluencia puede reducirse drásticamente.

## 1.4 La productividad

La productividad se conoce como la relación o cociente entre bienes o servicios producidos u ofrecidos y los medios utilizados (Cuatrecasas, 2011). Los resultados alcanzados pueden ser medidos como piezas vendidas, clientes atendidos o utilidades generadas en una organización, mientras que los insumos empleados o recursos utilizados se pueden calcular en hora-hombre, hora-máquina, número de trabajadores, tiempo total empleado, entre otros (Niebel y Freivalds, 2014).

$$\text{Productividad} = \frac{\text{bienes o servicios entregados}}{\text{recursos utilizados}}$$

Por tal razón, para mejorar la productividad es necesario optimizar el uso de los recursos y maximizar los resultados (Chang y Niedzwiecki, 1999). Al respecto, en las empresas extrusoras de perfiles de aluminio la productividad es uno de los indicadores que más relevancia tienen cuando se evalúan los resultados productivos. Por lo general, se mide en kilogramos netos, dividido para las horas útiles trabajadas.

La productividad permite cuantificar la eficiencia de un proceso de producción (Miranda, Rubio, Chamorro y Bañeguil, 2012). Por ello, los indicadores de desempeño o KPI de productividad en una organización varían de acuerdo con la necesidad de medición que requiere la alta gerencia.

Por medio de la productividad es posible cuantificar la eficiencia del proceso de extrusión, el cual corresponde, como ya se mencionó, al cociente resultante de los kilogramos producidos dividido entre el tiempo en horas registrado.

$$\text{Productividad de extrusión} = \frac{\text{kilogramos producidos}}{\text{tiempo en horas}}$$

Este indicador de gestión es uno de los más importantes porque ayuda a evaluar el desempeño de los *billets* como materia prima durante el proceso de extrusión, con el objetivo de utilizar esta información como herramienta en la toma de decisiones sobre la calidad y tipo de materia prima que se utilice.

## 1.5 El recobrado

El recobrado en procesos de extrusión de aluminio mide los kilogramos de materia prima usada y los kilogramos netos obtenidos; también es el rendimiento de materia prima bruta a producto terminado. Es un indicador de tipo porcentual.

$$\text{Recobrado} = \frac{\text{kilogramos netos obtenidos}}{\text{kilogramos de materia prima}} \times 100$$

Como tipo de indicador, tiene una relación directa con los niveles de los aleantes principales en la aleación de aluminio 6063.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Diagnóstico de la situación inicial

En el diagnóstico inicial del proceso de extrusión de la planta industrial de la empresa Cedal S. A., se consideró el análisis de dos indicadores básicos (la productividad y el recobrado) con los cuales se midió el desempeño del proceso de extrusión. En primer lugar, el nivel de productividad registrado en promedio fue de 938 kilogramos producidos por hora con un recobrado promedio del 79 %. Todo esto, utilizando aleación de aluminio 6063, que posee una composición química de porcentaje en peso promedio de silicio de 0,496, magnesio de 0,547 y hierro de 0,208.

Después del tratamiento térmico T5, los perfiles extruidos pasaron satisfactoriamente el control de calidad con una dureza Webster promedio de 10 y con resistencia a la tracción promedio de 216 MPa.

A partir de la información anteriormente mencionada, se procedió a modificar la composición química de la materia prima para extrusión. El objetivo era obtener *billets* de aluminio AA 6063 con niveles experimentales para conocer su impacto en los ámbitos de productividad, recobrado y propiedades mecánicas de los perfiles, después de su respectivo tratamiento térmico T5.

### 2.2 Procedimiento y toma de muestras

El presente estudio no contó con información de estudios *in-situ* similares que hayan permitido establecer un procedimiento específico para el desarrollo de la investigación; tampoco con datos históricos con respecto

a productividad o recobrado con *billets* que tuvieran niveles de aleación experimental iguales a los propuestos para la empresa Cedal S. A.

Se estableció un proceso de trazabilidad de los *billets* provenientes del proceso de fundición de colada continua horizontal de la misma empresa. Estos fueron utilizados durante los nueve turnos de trabajo para la recolección de la información durante el proceso de extrusión y después del proceso de envejecido artificial de los perfiles obtenidos en los distintos turnos de producción. Cada uno de estos turnos posee una orden de producción que obliga a cambiar la matriz para obtener perfiles de aluminio de diferente forma. Por ello, se decidió seleccionar aleatoriamente 13 perfiles por turno de producción para recoger en total 123 muestras. De ellas se extrajeron probetas para ensayos de tracción, según la norma ASTM B557M, y para ensayos de dureza Webster, según la norma ASTM B647.

### 2.3 Composición de la materia prima de fundición

Para obtener una aleación, se debe establecer el origen de la materia prima y la cantidad que será utilizada, porque esto contribuye a alcanzar una buena composición química de la aleación.

Con el objetivo de lograr niveles óptimos en porcentaje de peso en la aleación AA 6063, la materia prima se constituye con 40 % de aluminio primario, 31 % de chatarra negra, 28 % de chatarra blanca y el resto corresponde a magnesio, silicio, entre otros.

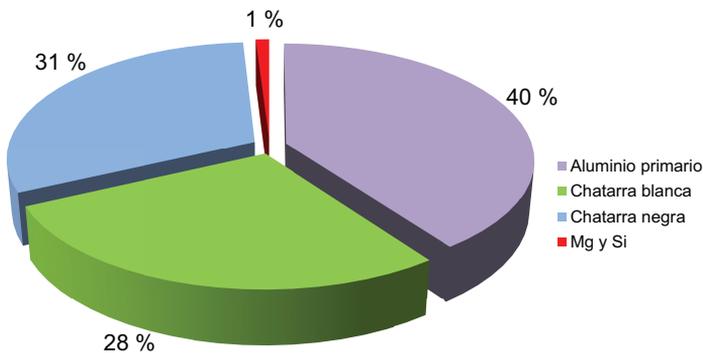


Figura 1. Porcentaje de composición de la materia prima en aleación AA 6063 para el proceso de fundición  
Elaboración propia

Para obtener la aleación experimental de aluminio 6063 sin afectar el costo de producción, se variaron los rangos de porcentaje en peso de magnesio y silicio.

#### 2.4 Aleación experimental AA 6063 y parámetros de control de elementos principales

Los valores establecidos para la aleación experimental AA 6063 se fijaron en rangos con valores máximos y mínimos de porcentaje en peso de cada elemento. Dichos valores se detallan en la tabla 1.

Tabla 1  
*Valores máximos y mínimos establecidos para la aleación experimental 6063*

| Elemento | Porcentaje en peso |        |
|----------|--------------------|--------|
|          | Mínimo             | Máximo |
| Silicio  | 0,38               | 0,42   |
| Magnesio | 0,45               | 0,49   |
| Hierro   | N/A                | 0,17   |

Elaboración propia

Por experiencia y recomendación técnica, todo tipo de aleación de aluminio 6063 no debe poseer un exceso de magnesio que sobrepase el 0,70 de porcentaje en peso, porque reduce la velocidad de extrusión y perjudica la productividad.

A partir de los valores de porcentaje en peso de magnesio y silicio, se establece una relación estequiométrica para conocer si una aleación de la serie 6000 cuenta con exceso de magnesio y de silicio o está equilibrada.

$$\frac{\% \text{Mg}}{\% \text{Si}} = 1,73$$

Al aplicar la relación estequiométrica, si el resultado es mayor de 1,73, esto indica que la aleación tiene exceso de magnesio; si es menor de 1,73, entonces la aleación posee exceso de silicio; si es igual a 1,73, se puede decir que la aleación es equilibrada (Navas, Vaca, Núñez, Paredes y Morales, 2017).

En la aleación experimental 6063, las pruebas de espectrometría dieron valores promedio de porcentaje en peso de 0,429 para silicio, 0,489 para magnesio y 0,166 para hierro.

Empleando la anterior ecuación se obtuvo un total de 1,14. Esto indicó que la aleación experimental poseía exceso de silicio y, además, presentaba un valor promedio de silicio libre de 0,134 de porcentaje en peso.

La importancia de esta relación estequiométrica radica en que va a influir en la productividad tanto en la extrusión como en la respuesta de los perfiles al tratamiento térmico T5. Una aleación con exceso de magnesio puede afectar el límite de solubilidad sólida y ocasionar inconvenientes en el momento de extruir, como grumos del tocho acumulados en las matrices de la prensa extrusora.

## 2.5 Productividad y recobrado con *billets* de aleación experimental 6063 en proceso de extrusión

Los registros de producción durante los nueve turnos de trabajo consecutivos, en los que se usó la aleación experimental AA 6063, se resumen en la figura 2. En ella se detallan las toneladas brutas (*billets*) y las toneladas netas (perfiles extruidos).

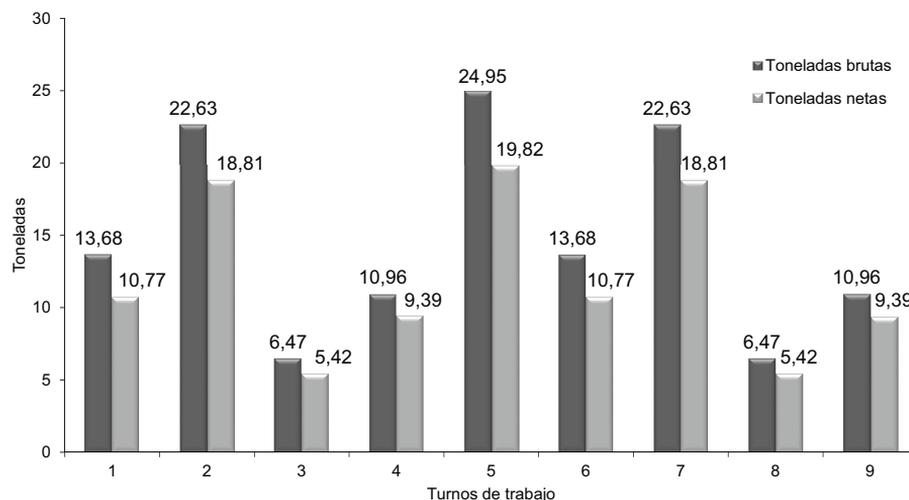


Figura 2. Registro de producción en extrusión durante nueve turnos con *billets* de aleación experimental 6063

Elaboración propia

Un turno de trabajo de ocho horas, en el que se han empleado *billets* de aluminio AA 6063, produce normalmente de siete a ocho toneladas en promedio, lo cual da una productividad de 937,5 kilogramos por hora.

En la figura 3 se muestran los valores de productividad alcanzados en cada uno de los turnos de trabajo con *billets* de aleación experimental AA 6063. Se observa que se obtuvo una productividad promedio de 1064,44 kilogramos por hora.

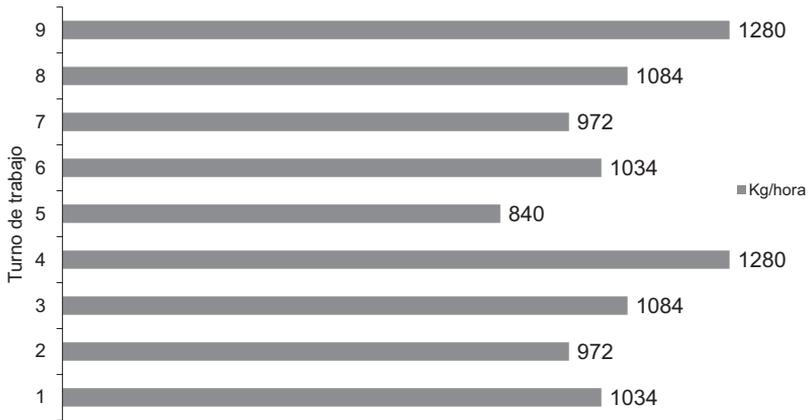


Figura 3. Productividad obtenida por turno de trabajo en proceso de extrusión con aleación experimental AA 6063

Elaboración propia

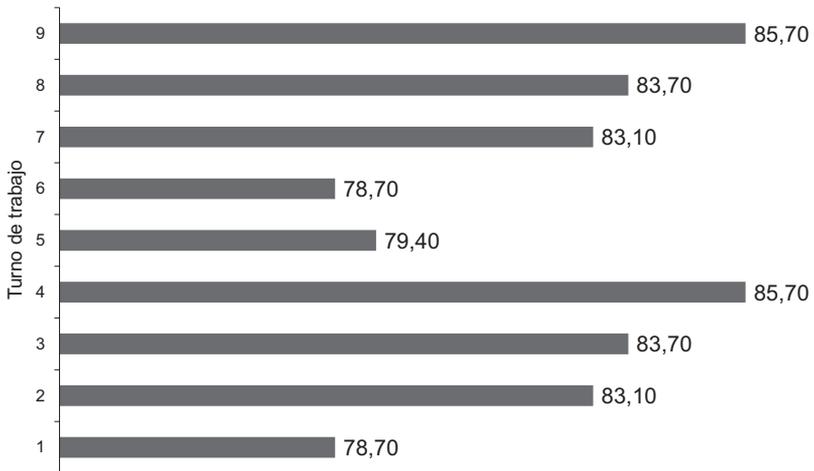


Figura 4. Porcentaje de recobrado registrado por turno de trabajo durante el proceso de extrusión con aleación experimental AA 6063

Elaboración propia

El recobrado promedio, según registros históricos, está entre 78 y 79 %. Los valores de recobrado obtenidos con *billets* de aleación experimental AA 6063 se muestran en la figura 4. Tuvieron un promedio del 82,42 % de recobrado.

## 2.6 Ensayo de tracción

Por medio de las 13 probetas obtenidas aleatoriamente de perfiles de aluminio extruidos de *billets* de aleación experimental AA 6063 por cada turno de trabajo se establecieron los resultados promedio que se muestran en la tabla 2. Se registró un promedio total con respecto al límite de fluencia de 180,42 MPa, una resistencia a la tracción promedio de 206,38 MPa y un porcentaje de elongación en 50 mm de 6,03 %.

Tabla 2

*Valores promedio de los ensayos de tracción en perfiles de aluminio con tratamiento térmico T5 extruidos a partir de aleación experimental 6063*

| <b>Departamento:</b>        | Calidad                | <b>Aleación:</b>              | 6063                              |
|-----------------------------|------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Probetas bajo norma:</b> | ASTM B557M             | <b>Tipo:</b>                  | experimental                      |
| <b>Probetas por turno:</b>  | 13                     | <b>Tratamiento térmico:</b>   | T5                                |
| Turno                       | Límite de fluencia MPa | Resistencia a la tracción MPa | Porcentaje de elongación en 50 mm |
| 1                           | 189,54                 | 215,77                        | 5,69                              |
| 2                           | 181,85                 | 209,62                        | 5,95                              |
| 3                           | 189,46                 | 215,23                        | 6,23                              |
| 4                           | 176,92                 | 202,38                        | 5,96                              |
| 5                           | 174,92                 | 198,92                        | 5,74                              |
| 6                           | 174,85                 | 200,54                        | 6,38                              |
| 7                           | 174,54                 | 201,00                        | 6,47                              |
| 8                           | 183,31                 | 208,38                        | 5,73                              |
| 9                           | 178,38                 | 205,54                        | 6,10                              |

Elaboración propia

## 2.7 Relación entre dureza Webster y resistencia a la tracción

Durante los ensayos de dureza y tracción, se consiguió establecer que existe una relación directa entre los valores de dureza Webster y la resistencia a la tracción del perfil extruido después del tratamiento térmico T5; es decir, a mayor dureza, mayor resistencia del perfil a la tracción; mientras que a menor dureza, menor resistencia a la tracción.

En la figura 5 se observa la relación expuesta anteriormente. Por ejemplo, un perfil con dureza Webster de 7 alcanzó una resistencia a la tracción de 155 MPa; por otro lado, un perfil que registró una dureza Webster de 13 obtuvo una resistencia a la tracción de 264 MPa.

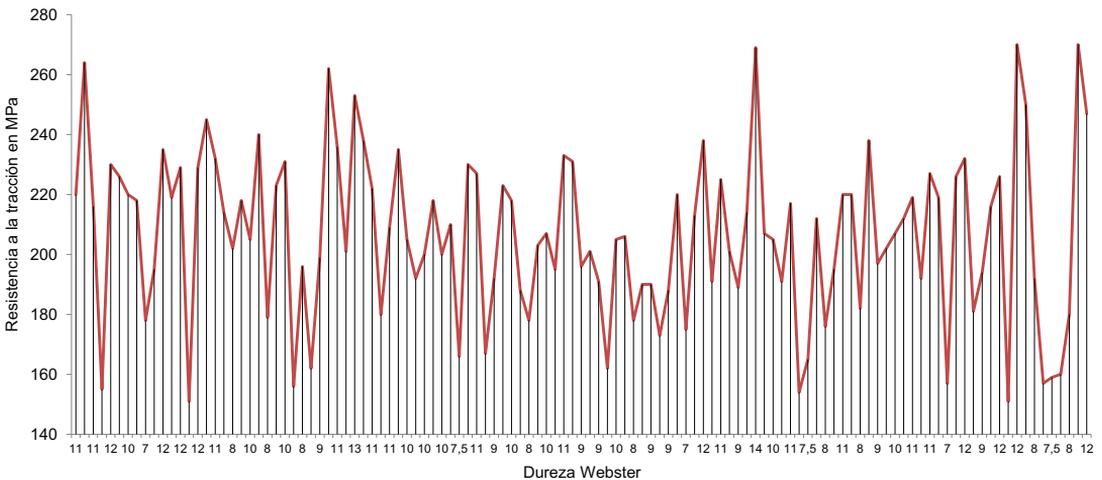


Figura 5. Relación entre dureza Webster y resistencia a la tracción en perfiles extruidos de aleación experimental AA 6063, después del tratamiento térmico T5  
Elaboración propia

## 3. RESULTADOS

Con la aleación experimental AA 6063, se obtuvo una productividad promedio de 1064,44 kilogramos por hora, lo que significó un incremento del 13,54 % con respecto al promedio normal registrado históricamente. Además, no se manifestó rechazo o reproceso de los perfiles extruidos después del tratamiento térmico T5.

El recobrado promedio alcanzado con la aleación experimental fue de 82,42 %. Esto representó 4,15 % más que el promedio normal registrado de 79 %.

Elevar la productividad y mejorar el recobrado indica un mejor rendimiento de la materia prima. Esto se traduce en una reducción del costo de producción final en el proceso de extrusión.

Se registró una dureza Webster máxima de 14 y una dureza mínima Webster de 7 en las 123 muestras obtenidas de los perfiles extruidos después del tratamiento T5; además, se pudo determinar que se mantiene una relación directamente proporcional entre la dureza Webster del perfil y su resistencia a la tracción.

La calidad de los perfiles de aluminio no disminuyó cuando se modificaron los porcentajes en peso de los aleantes principales, porque después de haber sido sometidos al proceso de envejecido artificial estos alcanzaron una dureza Webster promedio de entre 9 y 12. Así, se demostró que su calidad no menguó, debido a que se mantuvo un exceso de silicio adecuado y un control estricto de los niveles acordados cuando se produjo la aleación experimental AA 6063.

#### 4. CONCLUSIONES

Se puede afirmar que se incrementa la productividad en empresas extrusoras de aluminio cuando sus perfiles después del tratamiento térmico adecuado alcanzan propiedades mecánicas aceptables. Lo anterior permite concluir que con la aleación experimental AA 6063 se incrementó la productividad; además, se evitaron pérdidas económicas y desperdicio de recursos de la empresa.

La aleación experimental de aluminio 6063 mejoró la productividad en un 13,54 % y el recobrado en un 4,15 %, por lo que se dio un incremento de estos dos indicadores importantes de gestión.

La velocidad promedio de extrusión alcanzada fue de 7,37 milímetros por segundo. De esta forma, se deduce que la aleación experimental AA 6063 favoreció un incremento de la productividad al mejorar la velocidad de extrusión.

En conclusión, el costo de producción en extrusión por recobrado tuvo una reducción aproximada del 4 %, lo que equivale a un promedio de USD 20 en el costo por hora de producción.

El control de la aleación en el proceso de fundición de colada continua horizontal hace posible obtener un producto final de calidad, debido a la relación directa con los niveles de productividad y recobrado.

## 5. RECOMENDACIONES

Controlar la composición química de la aleación 6063 en proceso de colada continua horizontal tomando las muestras de *tundish* durante un intervalo mínimo de dos veces por hora para poder mantener una aleación dentro de los parámetros establecidos.

Regular la temperatura de calentamiento de la composición química del *billet* durante el proceso de extrusión tomando como base el análisis espectrométrico y los porcentajes en peso de los aleantes principales.

Analizar la relación entre la curva de calentamiento de los perfiles extruidos durante el proceso T5 y su composición química de aleantes principales.

Evaluar los efectos de la composición química propuesta y su respuesta a los procesos de anodizado o pintura electrostática en el acabado superficial de los perfiles de aluminio de aleación 6063.

## REFERENCIAS

- Chang, R. y Niedzwiecki, M. (1999). *Las herramientas para la mejora continua de la calidad* (vol. 2). Argentina: Granica.
- Cuatrecasas, L. (2011). *Gestión económica de la producción*. Madrid: Díaz de Santos.
- Miranda, F., Rubio, S., Chamorro, A. y Bañeguil, T. (2012). *Manual de dirección de operaciones*. España: Paraninfo.
- Navas, H., Vaca, W., Núñez, D., Paredes, J. y Morales, F. (2017). Análisis cuantitativo de los elementos aleantes principales precipitados en *billets* de aluminio de aleación 6063 en equipo de fundición de colada continua horizontal para el proceso de extrusión. *Ingenius*, (17), 42-50.

Niebel, B. y Freivalds, A. (2014). *Niebel's Methods, Standards, and Work Design* (13.<sup>a</sup> ed.). Estados Unidos: McGraw-Hill.

Rio Tinto Alcan. (2008). *Heat Treatment for Aluminum Foundry Alloys*. Recuperado de <http://www.riotinto.com>

Saha, P. (2000). *Aluminum Extrusion Technology*. Ohio: ASM International.

