

Optimización del costo de aleaciones Zn-Al-Cu de una dureza determinada

David Villegas-Cárdenas¹, Víctor Manuel López-Hirata², Maribel L. Saucedo-Muñoz², Miguel Morales-Rodríguez¹, Erika Osiris Ávila-Dávila², Juan Radilla-Chávez¹

¹ Universidad Politécnica del Valle de México

² Escuela Superior de Ingeniería Química y Extractiva. Colonia Lindavista - México D.F (México).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7506>

1. INTRODUCCIÓN

Tanto las aleaciones aluminio como las de zinc tienen un amplio rango de utilización en el sector industrial que va desde la industria para la construcción, automotriz y aeroespacial. Las propiedades de estas aleaciones han sido estudiadas por muchos investigadores como es el caso de Savas y Altintas [1]. Las aleaciones de zinc están especialmente preparadas para ser utilizadas en molde por inyección y en coquilla, con propiedades particulares en la fundición del producto a obtener, para substituir piezas de bronce [2]. En las aleaciones Zamac es donde se puede reconocer más fácilmente las propiedades y usos de las aleaciones de Zinc, las cuales se pueden observar en componentes decorativos, estructurales, eléctricos y electrónicos [3].

Se debe recordar que actualmente de acuerdo a estándares económicos estrictos, los productos necesitan estar elaborados con los materiales más baratos posibles, pero que tengan las mismas propiedades mecánicas y que por lo tanto cumplan con la misma calidad [4, 5]. También cabe mencionar que la reducción en el costo de la materia prima es una disminución directa al precio y un aumento a las ganancias, de ahí la importancia del ahorro que se obtenga.

Por otra parte el estudio de investigación de operaciones siempre ha servido para poder encontrar soluciones alternativas, que puedan resolver problemas complejos [6], sin embargo en la industria metalúrgica con respecto a las

aleaciones Zn y Al, hasta este momento no existe una aplicación de investigación de operaciones en la cual se pueda minimizar los costos y tener las mismas propiedades mecánicas o mejores. En este trabajo se ha utilizado la metodología de investigaciones de operaciones, la cual se ve plasmada en un programa computacional muy sencillo en base a estudios científicos anteriores [7, 8], en los cuales se desarrollo una metodología para el pronóstico de dureza de una gran gama de aleaciones Zn-Al-Cu. En este trabajo se resume toda una metodología de investigaciones anteriores en un programa de cómputo, el cual proporciona las cantidades de cada elemento para la obtención de una cierta dureza a un costo mínimo, con la finalidad de que sea utilizado por microempresarios que solo tengan un conocimiento básico del proceso. Todo el programa y los resultados obtenidos fueron en base a estudios que modelaban de manera fiel el proceso de fundición de las aleaciones comerciales de zinc, como son: No. 2, No. 5, No. 13, ZA8, ZA12, las cuales se utilizan en la manufactura de una serie de piezas mecánicas ampliamente empleadas en tuberías.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se obtuvieron las metalografías por medio de un microscopio óptico, de cada una de las muestras de las líneas de control para conocer los cambios microestructurales de las mismas.

Se utiliza de base la metodología que se presenta en el artículo "Predicción de la dureza de aleaciones Al-Cu-Zn" [8], para la obtención de la dureza, en el cual se estudian 16 muestras que se dividen en dos líneas como se muestra en la Figura 1, estas líneas se les llama líneas de control y cada una de acuerdo a este artículo fueron sometidas a diferentes tratamientos térmicos, quedando clasificadas en aleaciones en estado de colada, homogeneizadas y templadas.

Para el tratamiento de colada las 16

muestras de las dos líneas se fundieron a 850 °C y se enfriaron a una velocidad de 0.115 °C/s. Debido a que el enfriamiento fue demasiado rápido las muestras no llegan a su estado de equilibrio y presentan una estructura dendrítica.

Para el tratamiento de homogeneizado se calentaron las muestras a 350 °C durante 180 horas con la finalidad de eliminar la estructura dendrítica, la velocidad de enfriamiento fue de 0.012 °C/s y aunque esto es mucho más lento que en el caso de colada, es aún demasiado rápido para llegar a su estado de equilibrio. Por último en el templado se calentaron las muestras a 350 °C durante 12 horas y posteriormente se enfrió en agua hielo a 0 °C a una velocidad de 70 °C /s.

El objetivo de someter a las 16 muestras de la misma forma en cada tratamiento térmico es con la finalidad de poder apreciar el cambio en sus propiedades mecánicas por el porcentaje químico de cada una de ellas.

Cada una de estas muestras se encuentran dentro de una zona compuesta por las fases α , τ , y η , como se observa en la Figura 1, lo cual indica que al variar el porcentaje químico de cada muestra va a cambiar la proporción de cada una de las fases. Esta variación en el porcentaje de cada fase debe ser directamente proporcional al cambio en sus propiedades mecánicas y por esta razón se designaron líneas rectas, de tal modo que al tener una relación lineal en el incremento de sus porcentajes químicos se tendrá un cambio proporcional

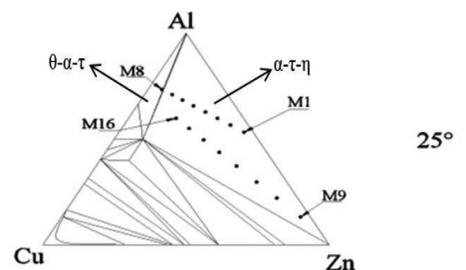


Figura 1. Serie de aleaciones utilizadas para obtener la ecuación general (Villegas D. et al 2014)

en el porcentaje de las fases, y por ende en sus propiedades mecánicas, exactamente igual que en la regla de la palanca pero en tres dimensiones.

En cada uno de estos tratamientos térmicos se midió la dureza, la cual presenta también una tendencia lineal con respecto a la composición de sus elementos, con lo que se puede pronosticar la dureza de cualquier aleación que este dentro de estas dos líneas.

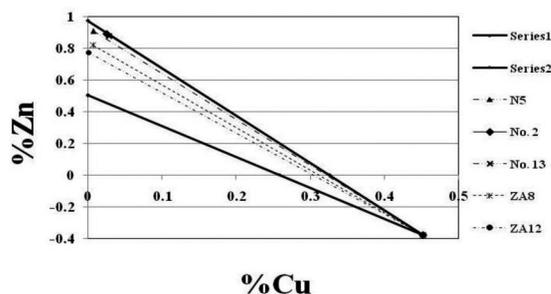


Figura 2: Obtención de la pendiente de cada una de las aleaciones comerciales, de acuerdo a las líneas de control, para cada una de las aleaciones comerciales

Elemento (% peso)	Tipo de aleación				
	No.2	No. 5	No. 13	ZA8	ZA12
Aluminio	3.7-4.3	3.7-4.3	4-4.7	8-8.8	10.5-11.5
Magnesio	0.02-0.06	0.02-0.06	0.05-0.1	0.01-0.03	0.01-0.03
Cobre	2.6-3.3	0.7-1.2	3-3.8	0.8-1.3	0.5-1.2
Hierro	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.1	≤ 0.075	≤ 0.075
Plomo	≤ 0.005	≤ 0.005	≤ 0.007	≤ 0.006	≤ 0.006
Cadmio	≤ 0.004	≤ 0.004	≤ 0.005	≤ 0.006	≤ 0.006
Estaño	≤ 0.002	≤ 0.002	≤ 0.005	≤ 0.003	≤ 0.003
Níquel	----	----	1-1.5	----	----
Zinc	Resto	Resto	Resto	Resto	Resto

Tabla 1. Especificaciones químicas de las aleaciones de zinc empleadas en el presente estudio

Como ya se menciona anteriormente en este trabajo se utilizó la misma metodología presentada en el trabajo [8], que se plasma en una ecuación general en la que tan solo se requiere el porcentaje químico de los elementos de la aleación para obtener la dureza de la misma. La validez de esta ecuación se comprobó al obtener la dureza de una serie de aleaciones que realizaron otros investigadores y en aleaciones comerciales como son: No. 2, No. 5, No. 13, ZA8 y ZA12, cuyas especificaciones de composición son mostradas en la Tabla 1.

Los datos de estas aleaciones serán empleados para obtener una aleación con una dureza determinada, con el mínimo costo en relación a los precios del Zn, Cu y Al.

2.1. MÉTODO

De acuerdo al artículo [8], es posible obtener la dureza de una amplia gama de aleaciones que se encuentran entre dos líneas de referencia. Esta gama de aleaciones son las que se encuentran en las líneas de control como se muestra en la Figura 1.

Cuando se mide la dureza de estas aleaciones en estado de colada, homogeneizadas y templadas muestran una

tendencia lineal con respecto a su contenido de sus elementos químicos. Esto permite el desarrollo de ecuaciones que pronostican la dureza de cualquier aleación que este dentro de las líneas de control.

Las primeras ecuaciones que se requieren son, las que proporcionan la pendiente que tiene cada línea de control de acuerdo a su fracción atómica, las cuales se obtienen al representar las líneas de control de la figura 1 en un plano cartesiano (Figura 2).

Del gráfico de la Figura 2 se obtienen las ecuaciones lineales (1) y (2), las cuales pertenecen cada una de las líneas de control.

$$Zn_{\text{línea 1}} = -1.9438X_{\text{Cu}} + 0.50334 \quad (1)$$

$$Zn_{\text{línea 2}} = -2.9823X_{\text{Cu}} + 0.97337 \quad (2)$$

Donde $Zn_{\text{línea 1}}$ y $Zn_{\text{línea 2}}$ es la fracción atómica de Zn para cada línea.

X_{Cu} es la fracción atómica de Cu.

Las ecuaciones (1) y (2) proporcionan la fracción atómica del Zn de acuerdo a la cantidad de Cu que tenga, lo que falta para llegar a 1 es la cantidad de Al, por ejemplo al utilizar 3% at. de Cu en la línea de control 1, de acuerdo a la ecuación (1) se debe tener una cantidad de 0.445 de Zn y el resto de aluminio esto es $1 - 0.03 - 0.455 = 0.525$.

También es posible identificar en la figura 2 que tienen un punto de intersección que se ubica en 0.4526 % at. Cu y -0.3764 % at. Zn. Debido a que esta última fracción atómica es negativa, se dice que es un punto virtual.

Este punto virtual sirve para obtener la pendiente de cualquier aleación que se encuentre dentro de las dos líneas de control y la pendiente a su vez se utiliza para obtener la relación con la pendiente de dureza, por lo que es posible obtener el pronóstico de dureza de cualquier aleación que se encuentre dentro de las líneas de control. En el caso de las aleaciones comerciales de Zn: No. 5, No. 2, No. 13, ZA8 y ZA12, éstas se encuen-

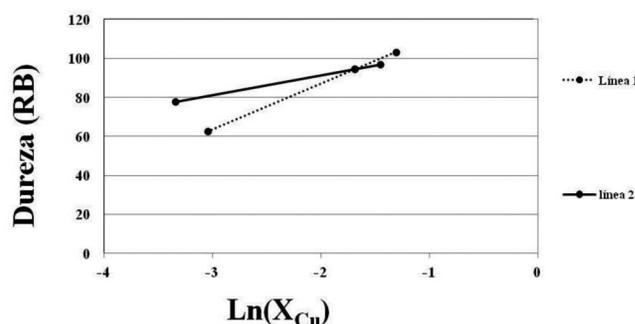


Figura 3: Tendencia lineal de las líneas de control en estado de colada en donde se puede apreciar la intersección de las mismas

tran dentro de las líneas de control, por lo cual es posible pronosticar su dureza.

La pendiente general de cualquier aleación que se encuentre dentro de las líneas de control corresponderá a la ecuación:

$$m = \frac{X_3 + 0.3764}{X_1 - 0.4526} \quad (3)$$

Donde X_3 es la fracción atómica del Zn y X_1 es la fracción atómica del Cu, -0.3764 y 0.4526 es la fracción atómica de Zn y Cu en el punto virtual, estas cambian de signo en la ecuación debido a la ecuación general de una pendiente.

Donde tanto X_{Zn} y X_{Cu} son las fracciones atómicas generales que corresponden a toda aleación que esté dentro de las líneas de control y con este punto y el virtual es posible construir la ecuación a la cual pertenece la aleación a pronosticar.

Posteriormente se obtienen las durezas de cada una de las aleaciones de las líneas de control, estas tienen una tendencia lineal para los tratamientos térmicos de colada, homogeneizado y templado. Esta tendencia lineal se puede representar en una ecuación lineal y en cada uno de los tratamientos térmicos se observa que existe un punto de intersección de la dureza.

Por ejemplo la figura 3 presenta la tendencia lineal de dureza que tienen las líneas de control 1 y 2 en estado de colada. En este gráfico es posible apreciar el punto de intersección de estas dos líneas, se da cuando el Cu es de 0.1857 a una dureza de 94.33 RB, (las ecuaciones de cada línea se presentan en la Tabla 2).

La apreciación anterior vista en la fracción atómica de cada elemento se puede representar como se observa en la Figura 4.

La Figura 4 indica que cualquier aleación que se encuentre en la línea punteada presentará la misma dureza que será de 94.14807 RB, por lo que es posible obtener una serie infinita de aleaciones que presenten la misma dureza pero que contienen diferente porcentaje de Zn y Al, por lo que es posible tener una equivalencia entre el elemento Zn y el Al.

Uno de los problemas que presenta la metodología expuesta en el artículo "Predicción de la dureza de las aleaciones Al-Cu-Zn" [8], es que solo funciona cuando el porcentaje de Cu es mayor al 1 % at., pero a porcentajes más bajos el error del pronóstico va en aumento, de ahí que en este trabajo se utiliza una regresión multilínea que permite trabajar a porcentajes 10 veces más bajos (esto es 0.01% at. de Cu), pero por debajo de este porcentaje se convierte en un pronóstico muy inexacto.

En la tesis "Efecto de la Composición Química y Microestructuras sobre las Propiedades Mecánicas en Aleaciones Zn-Al-Cu", [9], se presentan las ecuaciones de dureza para cada una de las líneas de control con dos variables, obtenidas mediante una regresión multilínea. La Tabla 2 muestra las ecuaciones que se generan de acuerdo a los tratamientos térmicos de colada, homogeneizado y templado.

Con estas ecuaciones es posible obtener la dureza de cualquier aleación que esté dentro de las líneas de control. Para esto es necesario primero conocer la pendiente de la composición de la aleación a pronosticar y posteriormente por interpolación se obtienen las pendientes de cada elemento.

La Tabla 3 muestra los valores de cada uno de los elementos para la interpolación en estado de colada.

Donde m se obtiene con la Ecuación 3, B sería la pendiente de dureza de la aleación a pronosticar en Cu y C la pendiente de Zn.

Tanto B como C se obtienen por una interpolación y al desarrollar la misma se adquieren las ecuaciones (5) y (6).

$$B = -5.4791 \left(\frac{X_3 + 0.37643}{X_1 - 0.45261} \right) - 5.3362 \quad (5)$$

$$C = 8.8397 \left(\frac{X_3 + 0.37643}{X_1 - 0.45261} \right) + 12.4426 \quad (6)$$

TRATAMIENTO TÉRMICO	ECUACIONES DE DUREZA PARA LA LÍNEA 1
Colada	$93.28 + 5.32\ln(X_{Cu}) - 4.74\ln(X_{Zn})$
Homogeneizado	$103.55 + 13.7\ln(X_{Cu}) - 4.88\ln(X_{Zn})$
Templado	$124.1 + 10.9\ln(X_{Cu}) + 2.7\ln(X_{Zn})$
TRATAMIENTO TÉRMICO	ECUACIONES DE DUREZA PARA LA LÍNEA 2
Colada	$98.22 + 11.01\ln(X_{Cu}) - 13.92\ln(X_{Zn})$
Homogeneizado	$136.84 + 27.81\ln(X_{Cu}) - 2.84\ln(X_{Zn})$
Templado	$105.82 + 15.34\ln(X_{Cu}) - 11.53\ln(X_{Zn})$

Tabla 2: Ecuaciones de dureza para cada línea de control

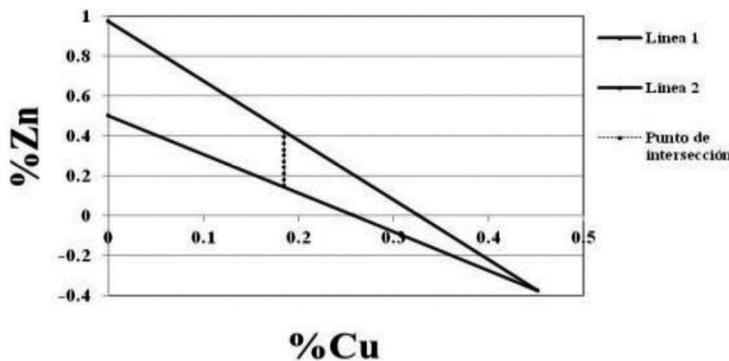


Figura 4: la línea punteada indica toda la gama de aleaciones que van a tener la misma dureza teniendo el mismo porcentaje de Cu

Tratamiento Térmico	Pendiente de composición química	Pendiente de dureza	
		Para el Cu	Para el Zn
Colada (línea 1)	-1.9438	5.32	-4.74
Colada (aleación a pronosticar)	m	B	C
Colada (línea 2)	-2.9823	11.01	-13.92

Tabla 3. Valores para la interpolación de los valores A, B y C.

$$HRB = 94.14807 - B \ln(0.18218) - C \ln\{-0.27042m - 0.3764\} + B \ln(X_1) + C \ln(X_3) \quad (7)$$

$$HB = 102.6981 - B \ln(0.2796) - C \ln(0.06193) + B \ln(X_1) + C \ln(X_3) \quad (8)$$

$$HB = 102.6981 - B \ln(0.2796) - C \ln(-0.173m - 0.37643) + B \ln(X_1) + C \ln(X_3) \quad (9)$$

$$HB = 91.8284 - B \ln(0.1965) - C \ln(-0.2561m - 0.37643) + B \ln(X_1) + C \ln(X_3) \quad (10)$$

Con las pendientes B y C, es posible obtener una ecuación (7) la cual podrá predecir la dureza de la aleación a pronosticar.

Donde HRB es la dureza en rockwell B de una aleación que contenga una cierta fracción atómica de Cu (X_1) y Zn (X_2), en estado de colada.

La exactitud de la ecuación (7) se comprobó con los resultados que se presentan en el artículo “predicción de la dureza de las aleaciones Al-Cu-Zn” [8], y en la tesis “Efecto de la Composición Química y Microestructuras sobre las Propiedades Mecánicas en Aleaciones Zn-Al-Cu” [9]. La gráfica mostrada

en la Figura 5 presenta el error R^2 del respectivo ajuste, el cual es de 0.95 lo que representa un buen ajuste entre el experimental y el pronosticado por la ecuación (7).

Por ejemplo suponiendo que la aleación base Zn No.2 contiene 3.7% en peso de Al, 2.6 de Cu y el resto de Zn, en fracción atómica sería 0.0851 de Al, 0.0254 de Cu y 0.8895 de Zn, por lo tanto la pendiente B y C en estado de colada es:

Utilizando la ecuación (7) se obtendría la dureza de la aleación.

La dureza de esta aleación en estado de colada sería 62.5143 RB utilizando

los porcentajes en peso antes mencionados lo cual se asemeja al valor real de la aleación comercial.

Para cada tratamiento térmico se tendrá una ecuación de dureza distinta aunque el procedimiento para obtener cada una es el mismo.

En el caso de templado se tiene que en las ecuaciones de dureza se interceptan en la fracción atómica de Cu de 0.2796, cuando la dureza es de 102.7 RB. Pero se debe observar que ciertos porcentajes Zn son negativos, para la línea de control 2 como se muestra en la Figura 6.

Para obtener la dureza cuando se tienen valores de Zn negativos, se fija la fracción atómica de Zn a 0.06193, este valor se obtiene al despejar el valor de Zn de la ecuación de la línea 1, cuando la dureza es de 102.7 RB en una fracción atómica de Cu de 0.2796. Por esta razón la ecuación de templado se divide en dos partes:

Teniendo en cuenta que m, B y C son:

$$m = \frac{X_3 + 0.3764}{X_1 - 0.4526}, \quad B = -4.2754m + 29.3348 \quad \text{y} \quad C = 13.7025m + 29.3348$$

Si la $m > -2.1759$, que es cuando la fracción atómica de Zn es negativa se utiliza la ecuación (8).

Si la $m < -2.1759$, que es cuando la fracción atómica de Zn es positiva se utiliza la ecuación (9).

Para verificar la exactitud de las ecuaciones (8) y (9) se comprobaron con los resultados que se presentan en el artículo “Predicción de Dureza de las Aleaciones Cu-Zn-Al” [8] y de la tesis “Efecto de la Composición Química y Microestructuras sobre las Propiedades Mecánicas en Aleaciones Zn-Al-Cu” [9]. La gráfica mostrada en la figura 7 presenta el error R^2 .

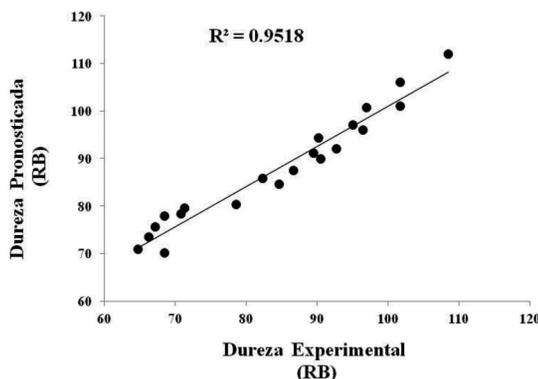


Figura 5: Error cuadrático R^2 entre la dureza experimental y la pronosticada por la ecuación (7)

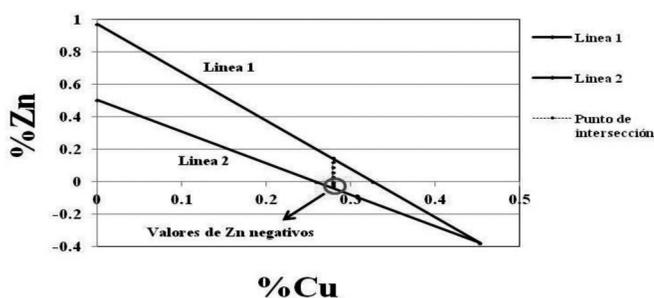


Figura 6: Gráfico de la fracción atómica donde se interceptan las ecuaciones de dureza en donde se muestra que existen ciertos porcentajes de Zn que serían negativos, en las aleaciones templadas

$$HRB = 94.14807 - (10.8995) \ln(0.18218) - (-13.751) \ln\{-0.27042(-2.9632) - 0.3764\} + (10.8995) \ln(0.0254) + (-13.751) \ln(0.8895) \\ = 62.5143 \text{ RB}$$

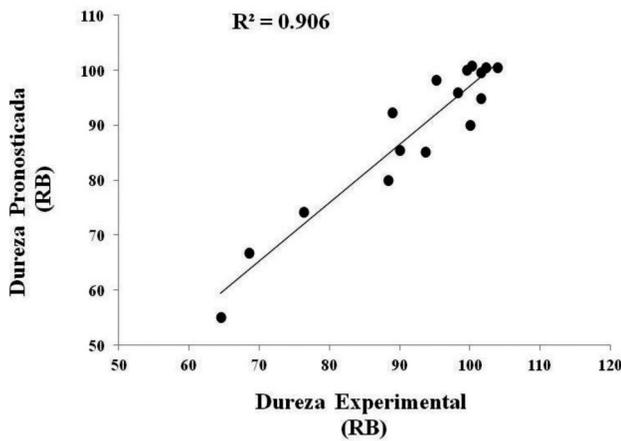


Figura 7: Error cuadrático R^2 entre la dureza experimental y la pronosticada por las ecuaciones (8) y (9), en el caso de la dureza de templado

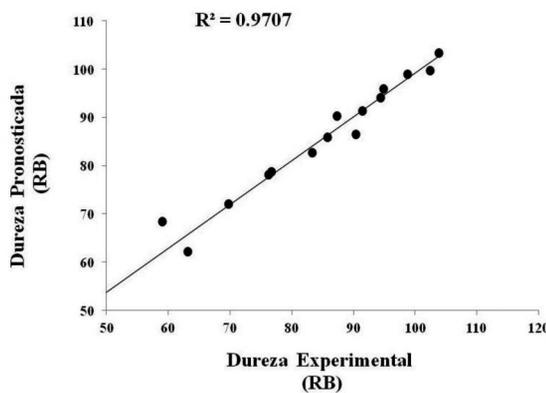


Figura 8: Error cuadrático R^2 entre la dureza experimental y la pronosticada por la ecuación (10), en el caso de la dureza después del proceso de homogeneizado

Por último en el caso de la dureza después del proceso de homogeneizado se tiene la ecuación (10):

$$m = \frac{X_3 + 0.3764}{X_1 - 0.4526}, \quad B = -13.5869m - 12.7102 \quad \text{y} \quad C = -1.9644m - 8.6984$$

Los resultados de esta también se comparan con los artículos ya mencionados.

Con estas ecuaciones es posible desarrollar un programa que pronostique la dureza de cada aleación que este dentro de las líneas de control y que tengan el proceso térmico de colada, homogeneizado o templado.

Desarrollo de la Ecuación Modelo

Ahora se establecerá la función objetivo, con sus respectivas restricciones, del proceso de elaboración de las aleaciones comerciales de Zn: No. 5, No. 2, No. 13, ZA8 y ZA12, para minimizar el

costo de aleado de las mismas a una dureza determinada.

Las variables del proceso son: X_1 = Fracción atómica de Cu, X_2 = Fracción atómica de Al, X_3 = Fracción atómica de Zn.

La función objetivo es:

$$6.872 \left\{ \frac{X_1 65.536}{X_1 65.536 + X_2 26.98154 + X_3 65.409} \right\} + 1.99 \left\{ \frac{X_2 26.9154}{X_1 65.536 + X_2 26.98154 + X_3 65.409} \right\} + 2.29 \left\{ \frac{X_3 65.409}{X_1 65.536 + X_2 26.98154 + X_3 65.409} \right\} = \text{Min}Z$$

Donde $\left\{ \frac{X_1 65.536}{X_1 65.536 + X_2 26.98154 + X_3 65.409} \right\}$ es la conversión de fracción atómica a fracción en peso para el Cu y así para cada elemento.

Los costos se obtuvieron considerando un precio a nivel internacional (www.indexmundi.com) se tiene que el Cu tiene un valor de 5.823 Euros/kg, el Zn de 1.94 dólares/kg y 1.67 dólares/kg.

Una de sus restricciones es la dureza mínima requerida por el cliente, en este caso las aleaciones las venden en estado de colada por lo cual se debe ocupar la ecuación de dureza (7), la cual se escribiría:

$$94.14807 - B \ln(0.18218) - C \ln\{-0.27042m - 0.3764\} + B \ln(X_1) + C \ln(X_3) \geq \text{HBrequerida}$$

La segunda restricción, que la aleación esté dentro de las líneas de control, se escribe:

$$-2.982 \leq \left(\frac{X_1 + 0.37643}{X_3 - 0.45261} \right) \leq -1.9438$$

Por último, la tercera restricción que incluye la información del aluminio, se escribe:

$$X_2 = 1 - X_1 + X_3$$

El programa que resuelve este problema se escribió en lenguaje Visual, para que los resultados sean mostrados en una hoja de Excel. La Figura 9 muestra el programa elaborado para obtener los porcentajes óptimos de los elementos Cu, Zn y Al, de la aleación de zinc No. 2, con dureza de 59.25 RB.

Si se desea realizar otra corrida con otra aleación, se debe cambiar el valor de la variable p (valor mínimo de dureza), así como la fracción en peso máxima y mínima del Cu y Al, representadas por las variables cup y alp.

Las variables b, c y hb, no cambian cuando se calcula otra aleación, a menos que se trate de otro proceso térmico como homogeneizado o templado. En este trabajo se analizaron aleaciones comerciales en estado de colada, por lo que siempre se utilizó el programa de la Figura 9.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 10 muestra la evolución metalográfica de las muestras de línea 1, en donde se puede apreciar la variación en el tamaño de partículas así como el cambio microestructural de las muestras, después del proceso de homogeneizado y templado.

```

PrivateSub CommandButton1_Click()
Dim i As Integer 'Contador para el Cu'
Dim j As Integer 'Contador para el Zn'
Dim k As Double 'Fracción atomica del Cu'
Dim l As Double 'Fracción atomica del Zn'
Dim o As Double 'Pendiente en la ecuación se conoce como m'
Dim b As Double 'Valor de la variable B'
Dim c As Double 'Valor de la variable C'
Dim hb As Double 'Valor de la dureza'
Dim p As Double 'Valor de la dureza mínima que se desea alcanzar'
Dim q As Double 'Contador para llevar un orden en la entrega de resultados'
Dim r As Double 'Contador consecutivo de los datos'
Dim al As Double 'Fracción atómica del Al'
Dim costo As Double 'Costo de obtenido'
Dim cup As Double 'Fracción en peso del Cu'
Dim alp As Double 'Fracción en peso del Al'
Worksheets(1).Cells(1, 1).Value = "Dureza en RB"
Worksheets(1).Cells(1, 2).Value = "Costo"
Worksheets(1).Cells(1, 3).Value = "Fracción en peso de Cu"
Worksheets(1).Cells(1, 4).Value = "Fracción en peso del Al"
p = 59.25 'Este es el valor mínimo que requerimos de dureza'
q = 1
For i = 1 To 999
For j = 1 To 999
l = j / 1000
k = i / 1000
al = 1 - l - k
o = (1 + 0.37643) / (k - 0.45261)
cup = k * 65.536 / (k * 65.536 + al * 26.98154 + l * 65.409) 'Cambio de la fracción atomica de Cu a peso'
alp = al * 26.98154 / (k * 65.536 + al * 26.98154 + l * 65.409) 'Cambio de la fracción atomica de Al a peso'
If o <= -1.9438 Then 'Lineas de control'
If o >= -2.982 Then 'Lineas de control'
If cup >= 0.026 Then 'Rango mínimo de Cu para la aleación comercial No. 2'
If cup <= 0.033 Then 'Rango máximo de Cu para la aleación comercial No. 2'
If alp >= 0.037 Then 'Rango mínimo de Al para la aleación comercial No. 2'
If alp <= 0.043 Then 'Rango máximo de Al para la aleación comercial No. 2'
b = -5.4791 * o - 5.3302
c = 8.8397 * o + 12.4426
hb = 94.14807 - b * Log(-0.18218) - c * Log(-0.27042 * o - 0.3764) + b * Log(k) + c * Log(l)
If hb >= p Then
r = q + 1
costo = 6.872 * ((k * 65.536) / (k * 65.536 + al * 26.98154 + l * 65.409)) + 1.99 * ((al * 26.98154) / (k * 65.536 + al * 26.98154 + l * 65.409)) + 2.29 * ((l * 65.409) / (k * 65.536 + al * 26.98154 + l * 65.409))
Worksheets(1).Cells(r, 1).Value = hb
Worksheets(1).Cells(r, 2).Value = costo
Worksheets(1).Cells(r, 3).Value = cup
Worksheets(1).Cells(r, 4).Value = alp
q = r
End If

Next
Next
End Sub

```

Figura 9: Programa en Visual para obtener los porcentajes óptimos de Cu, Zn y Al para la aleación comercial de Zn No. 2, a una dureza de 59.25 RB

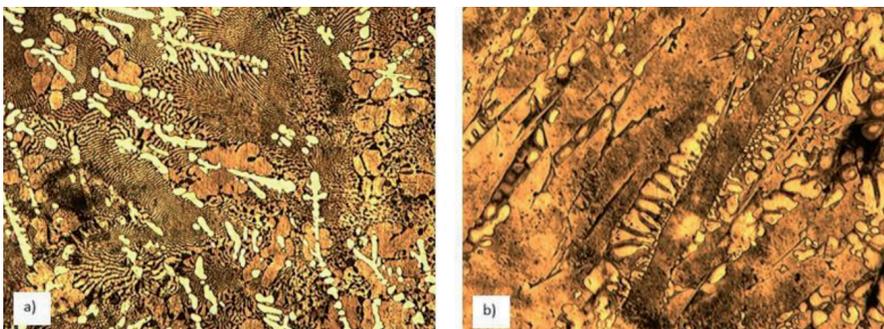


Figura 10: Comparativo del tamaño de dendrítico de las muestras a 50 aumentos, a) muestra a 5% en peso de Cu y b) muestra a 35% peso de Cu.

Aunque no es el objetivo de este trabajo determinar el cambio en la microestructura y las fases presentes de las mismas, se puede apreciar en la figura 10 el cambio en el tamaño de las dendritas de una muestra con 5% peso de Cu y la muestra con 35% en peso de Cu. El tamaño de las dendritas aumenta conforme se incrementa la cantidad de Cu y Al y por lo tanto existirán cambios en sus porcentajes de fase presentes y de ahí en sus propiedades mecánicas, de una manera directamente proporcional.

Los resultados que arroja el programa presentado se pueden observar tal como se presenta en la Figura 11.

El programa arroja la dureza más cercana a la que debe tener al menor costo posible, teniendo en cuenta que en este caso se habla de una carga de tan solo un kilogramo y el costo es en dólares. La dureza de la aleación No. 2 debe ser por lo menos de 59.25 RB, de acuerdo a los proveedores, la dureza que se obtiene al costo más bajo es de 62.79 RB, la cual es un poco mayor, requiriéndose 2.66 % en peso de Cu, 4.29% de Al y resto de Zn y demás elementos.

Al analizar el costo que pueden tener los proveedores utilizando la máxima cantidad de Cu y Al, de acuerdo a la Tabla 1 el costo puede ser de 2.44 dólares, que comparado con los 2.40 dólares que arroja el programa, se tiene una reducción de 1.64%, que quizás no parece mucho, pero en una industria tan competitiva como la metalúrgica, en donde se manejan miles de toneladas de metal, el ahorro es bastante significativo.

La Tabla 4 presenta la dureza que los proveedores manejan de cada aleación, así como la dureza obtenida y el porcentaje de reducción de los costos de acuerdo al programa empleado.

Como se observa en la Tabla 4 el pronóstico que arroja el programa es muy bueno comparándolo con la dureza que tienen estas aleaciones comerciales y el ahorro aunque parece poco es muy significativo debido a que es un ahorro directo en el producto final.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló una ecuación en base a la simplificación y mejora de una metodología, obtenida de otra investigación, la cual se plasmó en

	A	B	C
1	Dureza en RB	Costo	Fracción en peso de
2	62.79962052	2.39890991	0.02657
3	62.76387234	2.39897329	0.02656
4	62.72812624	2.39903659	0.02657

Figura 11: Resultados arrojados por el programa

Aleación	Dureza (Rockwell B)	Dureza Pronosticada (Rockwell B)	% de error de la dureza	% de reducción en costo
No. 2	59.25	62.8	5.65286624	1.64
No. 5	52.7	53.66	1.78904212	0.43
No. 13	64.74	64.93	0.29262282	1.62
ZA8	56.2	55.95	0.44483986	1.28
ZA12	62.3	60.28	3.2423756	0.85
Error promedio =			2.28434933	1.164

Tabla 4: Dureza, proporcionada por los proveedores, de las aleaciones de zinc estudiadas en el presente trabajo, comparada con la dureza pronosticada y el porcentaje en la reducción del costo calculados con el programa desarrollado aquí

un programa que permite obtener el costo mínimo para elaborar aleaciones comerciales de zinc a una dureza determinada, optimizando el contenido de los elementos químicos constituyentes, siempre que la composición de la aleación se localice dentro de dos líneas de control establecidas en su diagrama de fases. El porcentaje de ahorro promedio que se obtiene al utilizar este programa es de 1.164% lo cual es relativamente pequeño, pero considerando que este tipo de industrias gasta de miles de millones de dólares, en la compra de materia prima, este porcentaje de ahorro se torna realmente atractivo, por lo que representa un nicho en que el industrial disminuye el costo de manufactura de las aleaciones Al-Cu-Zn. Una ventaja adicional del programa desarrollado aquí es su sencillez, economía y versatilidad.

Por otra parte el programa presentado lo puede utilizar cualquier empresario por muy pequeña que sea su empresa sin pago de licencias, este programa a su vez puede ser modificado para desarrollar aleaciones a una dureza determinada, esto es crear aleaciones a la medida,

lo cual le da una ventaja al microempresario el cual sin mucha tecnología puede competir en crear aleaciones a la medida.

Por último, este procedimiento se puede aplicar en aleaciones de diferente composición en las cuales sería necesario obtener las líneas de control de las zonas de interés de los respectivos diagramas de fases, y la utilidad que se le puede dar a esto es la creación de materiales con características especiales, que utilicen elementos metálicos caros o muy raros de conseguir.

PARA SABER MÁS

[1] Savas M. A., Altintas S., "The microstructural control of cast and mechanical properties of Zn-aluminium alloys", Journal of Materials Science, April 1993, Vol. 28, p. 1775-1780, DOI: 10.1007/BF00595744.

[2] R.J. Marczak, R. Ciach, "Tribological properties of concentrated Al-Zn alloys", in: Proceedings of the 1st

Europe Tribology Congress, London, 1973, pp. 223-227.

[3] Zhu Y. H., Goodwin F. E., "Influence of rare earth element additions on phase transformations in the Zn-27% Al alloy", Journal of Materials Research, 1993, Vol. 8, Número 11, pp. 3043-3049.

[4] Abreu M., Grinevich, V., Kitson, M., Savona, M. "Policies to enhance the 'hidden innovation' in services: evidence and lessons from the UK." The Service Industries Journal, (2010), Vol. 30 No. 1, pp. 99-118 (DOI: 10.1080/02642060802236160).

[5] Kitson M., Martin R., Tyler P. "The geographies of austerity" Cambridge Journal of Regions, Economy and Society, 2011, Vol. 4, No. 3, pp. 289-302, (DOI: 10.1093/cjres/rsr030).

[6] Wayne L. "Investigación de Operaciones aplicaciones y algoritmos", edit. CENGAGE Learning, 2005, Edic. 1era., México.

[7] Villegas J. D., Hirata V. M., De Ita A., Saucedo M. L., "Assessment of Hardness in As-Cast and Homogenized Zn-Al-Cu Alloys" Materials Transactions, 2011, Vol. 52, No. 8, pp. 1581-1584.

[8] Villegas J. D., Saucedo M. L., Hirata V. M., Dorantes H. J., "Predicción de la dureza de aleaciones Al-Cu-Zn en estado de colada y templado" Revista de Metalurgia, 2014, vol. 50, No. 2, pp. 15-25.

[9] Villegas Cárdenas J. D. (2012) "Efecto de la composición química y microestructura sobre las propiedades mecánicas en aleaciones Zn-Al-Cu", IPN, México.