

Cleanliness analysis of molten aluminum for high pressure die casting process

Análisis de limpieza de aluminio fundido para proceso de inyección a alta presión

Efraín Lara-Vizcarra^{1,2} and José Luis Camacho-Martínez^{*3}

¹ Posgrado CIATEQ, A.C.,

Circuito Aguascalientes Norte 135, Parque Industrial del Valle de Aguascalientes, San Francisco de los Romo, Ags., México, C.P. 20358.

² Nissan Motor Co., Ltd.

³ Independiente

efra_200@hotmail.com, jolucenator@gmail.com

Abstract

In the present work it was made the evaluation at full scale of the cleaning process for aluminum alloy ADC-12Z, for the manufacture of automotive parts by High Pressure Die Casting. This process basically consists of fluxes application in two stages of the melting process, melting furnace and transfer ladle during degassing. The effectiveness of the cleaning and two designs of rotors for degassing, as well as the process in its different stages, were evaluated. They were analyzed using semiquantitative techniques such as the K-Mold and the reduced pressure test (RPT). The main results were as follows: the most effective process for the elimination of inclusions and dissolved hydrogen is degassing with the fluxes application. It is here where the most significant reductions in the contents of both contaminants were obtained. The two rotor designs for degassing were effective in reducing the content of dissolved hydrogen in the alloy, and the most important conclusion, is that the current cleaning processes in the plant are effective and sufficient to obtain metal with the required quality by the internal standards, in terms of the maximum permissible contents of inclusions and dissolved hydrogen.

Keywords— Aluminum Cleanliness, K-Mold, RPT

Resumen

En el presente trabajo se realizó la evaluación a escala completa del proceso de limpieza para aleación de aluminio ADC-12Z, para la manufactura de piezas automotrices por inyección a alta presión. Dicho proceso consiste básicamente en aplicación de fundentes en dos etapas del proceso de fusión: horno de fusión y olla de traslado durante la desgasificación. Se realizó la evaluación de la efectividad de la limpieza y dos diseños de rotores para desgasificación, así como del proceso en sus diferentes etapas. Se analizaron utilizando técnicas semicuantitativas como lo son: el Molde K y la prueba de presión reducida (PPR). Los resultados principales fueron los siguientes: el proceso más efectivo para la eliminación de inclusiones e hidrógeno disuelto es la desgasificación con aplicación de fundentes, es aquí donde se tuvieron las reducciones más significativas de los contenidos de ambos contaminantes. Los dos diseños de rotores para desgasificación resultaron efectivos para reducir el contenido de hidrógeno disuelto en la aleación, y la conclusión más importante es que los procesos actuales de limpieza en la planta son efectivos y suficientes para obtener el metal con la calidad requerida en los estándares internos, en cuanto a los contenidos máximos permisibles de inclusiones y de hidrógeno disuelto.

Palabras clave— Limpieza del aluminio, Molde K, PPR

* Autor de correspondencia

I. Introducción

Uno de los procesos importantes en la manufactura de partes que se utilizan de manera creciente en la industria automotriz, es la inyección a alta presión o High Pressure Die Casting (HPDC), siendo utilizadas aleaciones de aluminio. En los últimos años se ha tenido una creciente demanda de piezas para componentes estructurales y de motores de combustión interna, obtenidas por este proceso con estándares de calidad cada vez más elevados, lo que implica producir piezas cada vez con mejores propiedades mecánicas, libres de defectos y excelente maquinabilidad.

Para lograr los estándares de calidad es imprescindible que las fundiciones de aluminio brinden piezas con el menor número de defectos posibles, es por ello que se han incrementado los controles de calidad para que las aleaciones fundidas conformen partes con reducidos elementos como óxidos e inclusiones, los cuales afectan la maquinabilidad y la funcionabilidad.

Los tratamientos de limpieza han formado parte de estos procesos de Die Casting, donde se hace el uso de fundentes sólidos y tratamientos de desgasificado, los cuales ayudan a obtener aleaciones listas para ser moldeadas. Con el uso de herramientas semicuantitativas como lo son el Molde K y la prueba de presión reducida (PPR) o reduced pressure test (RPT), se ha podido evaluar si los procesos de limpieza son adecuados, si existe alguna contaminación del aluminio fundido y asegurar que las piezas que se van a producir serán de buena calidad [1, 2].

Los defectos de inclusiones ya sean metálicas o no metálicas, afectan directamente a la calidad del producto, ya que reducen la maquinabilidad de la parte y algunas veces dañando el herramental [3]. El origen de las inclusiones es diverso, pero el más común, es la oxidación del propio aluminio y sus aleantes. Las inclusiones se pueden deber a la presencia de fundentes atrapados en el seno del metal líquido, al desprendimiento de escorias de las paredes de los hornos o herramientas; y en ocasiones a la introducción de materiales ajenos provenientes del exterior [4, 5]. Para reducir la aparición de este defecto, en las industrias que producen partes de aluminio generalmente se desarrollan procesos de limpieza, donde se hace el uso de procesos de desgasificado de aluminio con la aplicación de fundentes sólidos, estas operaciones tienen como objetivo disminuir el contenido de impurezas que ocasionan los defectos de porosidad e inclusiones [6, 7].

Las dos herramientas semicuantitativas proporcionan los resultados en un periodo de tiempo muy corto, y con la experiencia del día a día, pueden llegar a ser muy efectivas para el control de calidad del aluminio fundido [8]. Para alcanzar un nivel de control efectivo y consistente

es necesario definir con precisión las condiciones y fundentes a utilizar durante dichas operaciones de limpieza [5, 9, 10]. Las operaciones como el desgasificado con uso de fundentes sólidos pueden dar un buen resultado en la reducción de las inclusiones.

II. Metodología

Se realizó una serie de experimentos a escala completa para evaluar el proceso de limpieza de la aleación de aluminio ADC-12Z para la manufactura de piezas automotrices por inyección a alta presión, y determinar si el proceso es adecuado para obtener la calidad del metal líquido requerido por la planta, previo a ser inyectado.

El tratamiento del aluminio fundido consiste en realizar un proceso de desgasificado al metal con la inyección de gas inerte a través de una flecha y rotor dentro del baño metálico y el uso de fundentes sólidos. La evaluación de la limpieza se desarrolló de manera indirecta, realizando pruebas de contenido de inclusiones e hidrógeno disuelto con las técnicas del Molde K y presión reducida (PPR) respectivamente.

La aleación utilizada para la experimentación fue la ADC-12Z, que es una aleación para inyección a presión de acuerdo a la Japanese Industrial Standards (JIS). La experimentación se llevó a cabo en una planta de fundición que principalmente realiza la manufactura de bloques de cilindros para motores de combustión interna para vehículos ligeros, en la Tabla 1 se muestra la composición química de la aleación.

Tabla 1: Composición química de la aleación utilizada en la experimentación

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Sn	Al
Mínimo	9.6	-	1.5	-	0.18	-	-	-	Balance
Máximo	12.0	1.3	3.5	0.5	0.34	3.0	0.50	0.3	

II.1. Desgasificado de metal

En los estándares existentes en planta, se tiene establecido que todo el metal fundido previo a inyectarse debe ser desgasificado directamente en las ollas de transferencia con capacidad de 600 kg, en donde se hace uso de una unidad desgasificadora marca Pyrotek que tiene una flecha y un rotor de grafito. La desgasificación consiste en sumergir la flecha con el rotor en el metal fundido y hacerlos girar a 350 rpm, al tiempo que se realiza la inyección de nitrógeno de uso industrial grado 4.8 (pureza del 99.998 %) como gas inerte, con un flujo de 25 l/min durante 5 minutos. En la Figura 1 se muestra una unidad desgasificadora.

Antes de iniciar el ciclo, se le agregan manualmente sobre la superficie del metal fundido 100 g de fundente

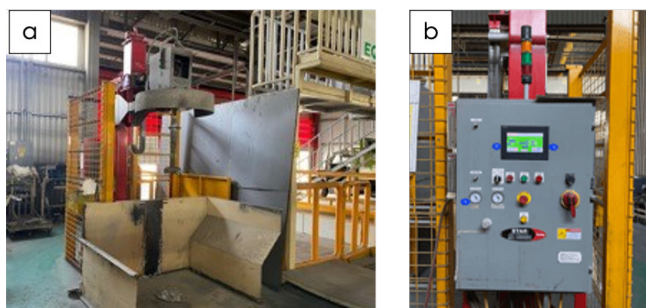


Figura 1: Unidad desgasificadora para aluminio fundido; a) unidad Pyrotek y b) tablero de programación

sólido catalogado como fundente de limpieza (fundente A). Al terminar el ciclo de desgasificado, el operador extrae la escoria de la superficie del aluminio generada por el proceso de desgasificado, para lo que utilizan herramientas manuales. En la Figura 2 se aprecia el proceso de desgasificado con impulsor rotatorio y la aplicación de fundentes sólidos.

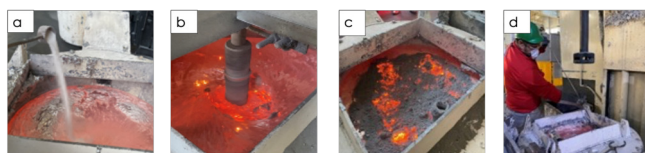


Figura 2: Operación de desgasificado con aplicación de fundente: a) aplicación de fundente, b) inyección de gas con el desgasificador, c) reposo después de desgasificado y d) retiro de la escoria

II.2. Evaluación semicuantitativa del contenido de inclusiones con la prueba Molde K

Los contenidos de inclusiones en el metal fundido fueron determinados mediante la prueba Molde K, que consiste en vaciar una muestra de aluminio en un molde conocido como K; de aquí se obtiene una tableta de aluminio con muescas las cuales actúan como punto de fractura al ser golpeadas con una herramienta de mano, se generan 7 probetas de cada tableta. Las zonas de la fractura se analizan visualmente o con el apoyo de un dispositivo para amplificar la imagen, y así poder identificar y cuantificar mejor las inclusiones en la probeta [11]. En el presente trabajo se utilizó una amplificación de 10X, con esto se logró mejorar la detección de inclusiones. El resultado de la evaluación se identificó como $K10$, para indicar que se realizó a 10 aumentos.

Basándose en el número de inclusiones observadas, el valor de $K10$ puede ser utilizado como una medición semicuantitativa de la cantidad de inclusiones presentes en el metal. El valor de $K10$ se puede obtener por la Ecuación (1) [12].

$$K10 = \frac{S}{n} \quad (1)$$

Donde:

S es el número total de inclusiones encontradas en todas las caras de la muestra.

n es el número de caras analizadas.

Para obtener un resultado más representativo, la cuantificación se realizó por triplicado y el valor obtenido del promedio de las mediciones se identificó como $K3$, que es el promedio de 3 muestras $K10$. Para determinar el efecto de las variables en cada prueba se realizó una comparación de los valores de $K3$, obtenidos antes y después de los tratamientos. Donde $K3_a$ es el valor de $K3$ antes del tratamiento del metal fundido y $K3_d$ es el valor que se obtiene después del tratamiento del metal. En la Figura 3 se muestra la secuencia de la obtención de muestras de Molde K.



Figura 3: Obtención de muestras para análisis de Molde K: a) Molde K y tabletas de aluminio, b) vaciado de metal en Molde K y c) probetas identificadas obtenidas por la fractura de la tableta

De acuerdo con los criterios establecidos por la organización, el valor del índice final $K3$ debe ser menor a 2.5, para considerar que el tratamiento de limpieza ha sido adecuado y se puede mantener una calidad consistente en las piezas inyectadas.

II.3. Pruebas de presión reducida (PPR)

Otra herramienta comparativa para la evaluar la calidad del metal es la prueba de presión reducida. La PPR se puede utilizar para estimar con una buena aproximación el nivel de hidrógeno disuelto en el fundido previo a ser vaciado, esta medición se realiza vaciando una probeta bajo condiciones de vacío en un recipiente cónico de acero [8, 13]. Esta prueba se utiliza extensamente en las fundiciones, normalmente se mide la densidad de las muestras obtenidas con el equipo de presión reducida y se correlaciona con la concentración de hidrógeno en el metal fundido [13, 14, 15, 16].

Como estándar de planta, se tiene como valor mínimo de 2.51 g/cc, que equivale aproximadamente a un contenido de gas disuelto de 0.22 cc/100 g de Al, para la aleación ADC-12Z. Valores superiores a 2.51 g/cc de densidad se consideran adecuados para liberar la carga y proceder a la inyección.

En el presente trabajo las muestras para la RPT fueron vaciadas en un crisol de acero precalentado, el cual se precalentó vaciando 3 veces metal y manteniéndolo durante 5 segundos. Las muestras se obtuvieron antes y después del tratamiento con fundente e igualmente en la desgasificación del baño metálico. La presión de la cámara de vacío del equipo fue de 0.0072 MPa (54 mmHg) y las muestras permanecieron bajo esta condición por 5 minutos. La densidad de las muestras se obtuvo con una balanza instrumentada que opera utilizando el principio de Arquímedes y los cálculos se realizaron utilizando la Ecuación (2) [8].

$$SG_{RPT} = \frac{m_{aire}}{(m_{aire} - m_{agua})} \quad (2)$$

Donde:

SG_{RPT} = densidad de la muestra RPT (g/cc).

m_{aire} = masa de la muestra en aire (g).

m_{agua} = masa de la muestra en agua (g).

En la Figura 4 se muestran las imágenes del equipo para la prueba de presión reducida, RPT, y el proceso de obtención de las muestras de aluminio.

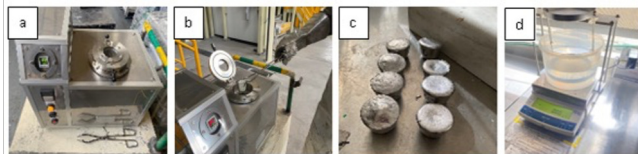


Figura 4: Pruebas RPT: a) Equipo para la RPT, b) crisol metálico en cámara de vacío, c) muestras RPT obtenidas (lado izquierdo, muestras previas a tratamiento y lado derecho son muestras después de tratamiento) y d) balanza instrumentada para obtención de densidad de las muestras

III. Experimentación

III.1. Exploración

Todas las actividades realizadas en el presente trabajo fueron realizadas rigurosamente de acuerdo con la norma ISO 45001 y los equipos de protección personal para manejo de materiales a altas temperaturas.

Las primeras corridas de exploración se realizaron tomando únicamente de probetas del Molde K, esto por su tiempo de respuesta tan corto, su fácil realización en piso y que se puede obtener una primera aproximación de que tan sucio está el metal en cada etapa del proceso de limpieza.

Se realizó por duplicado en 4 puntos del proceso:

1. Horno de fusión.
2. Olla de transferencia (previo al desgasificado).
3. Olla de transferencia (posterior al desgasificado).
4. Horno de sostenimiento de máquina de moldeo.

III.2. Evaluación del efecto de la cantidad de fundente aplicado durante el desgasificado

De acuerdo a la literatura, existen autores que mencionan que la aplicación de fundentes depende de la limpieza del material de partida del fundido [2], se recomienda utilizar del 0.05 % al 0.2 % del peso del metal a tratar [4]. Tomando en cuenta los resultados de la revisión del estado del arte, lo establecido en la hoja de procesos y los antecedentes de la planta, se definió utilizar: 100 g, 200 g, 300 g y 400 g de fundente.

Durante las corridas experimentales se tomaron 3 muestras de Molde K y una prueba de presión reducida antes y después del desgasificado.

III.3. Evaluación del efecto de diseño del rotor para el equipo de desgasificado

En el proceso de desgasificado con rotor inyector, normalmente fabricados con grafito, la función de estos elementos es agitar el baño de metal fundido e inyectar un gas inerte. El diseño del rotor es importante porque de este depende el tamaño y distribución de las burbujas en el baño metálico, entre más pequeñas y mejor distribuidas estén las burbujas en el baño, es más eficiente el desgasificado [5]. Los diseños de los rotores son muy variados y generalmente los proveedores de estos, basados en sus propios estudios, presumen tener el mejor diseño de rotor para desgasificado, que logra eliminar la mayor cantidad de hidrógeno disuelto, logrando una mayor calidad en las piezas al estar libres de porosidades e inclusiones.

Se realizó una prueba comparativa de dos diseños diferentes de rotor, uno con figura cuadrada y otro redondo conocido como rotor "impulsor", además, se probaron dos fundentes diferentes (fundente A y fundente B), aplicando una cantidad de 300 g en cada corrida. En la Figura 5 se muestran los dos rotores ensamblados a las flechas.



Figura 5: Flechas y rotores para desgasificación ensamblados

Para esta prueba se hizo uso de la técnica del Molde K y la prueba de presión reducida (PPR), antes y después del proceso de desgasificado, para comprobar la efectividad en la limpieza y desgasificación de cada uno de los rotores evaluados.

IV. Resultados

IV.1. Exploración

Los valores de K_3 obtenidos en la primera corrida exploratoria se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Valores de K_3 obtenidos en diferentes puntos del proceso en la primera corrida exploratoria

	Horno fusor	Sangrado a olla	Desgasificado	Horno de máquina
1	2.64	0.28	1.71	0.35
2	8.14	0.71	1.07	0.28
3	7.14	0.21	0.21	0.42

Como se puede observar, en el horno fusor se obtuvieron valores de K muy elevados, lo que indica que el baño metálico contiene muchas inclusiones. En la Figura 6 se muestra una fotografía de la probeta de Molde K , que presentó mayor cantidad de macro inclusiones de escoria y óxidos de aluminio en el muestreo hecho en el horno fusor.



Figura 6: Probeta de Molde K con inclusiones

En la Tabla 3 se muestran los valores de K_3 obtenidos en la segunda corrida exploratoria.

Tabla 3: Resultados de segunda corrida exploratoria

	Horno fusor	Sangrado a olla	Desgasificado	Horno de máquina
1	0.57	0.28	0.42	0.5
2	0.42	0.28	0.21	0.42
3	0.21	0.21	0.42	0.5

Comparando los resultados obtenidos en las corridas exploratorias, se puede apreciar que existen diferencias muy grandes entre los valores K_3 obtenidos de las probetas de metal extraído del horno fusor, los cuales en la segunda corrida fueron mucho menores. Esto se atribuye a que la toma de las muestras K_3 del baño metálico en la primera corrida fueron realizadas sin antes hacer el

retiro de la escoria de la superficie, actividad programada cada 12 horas de trabajo.

También se puede apreciar una disminución de los valores de K en el metal fundido al ser sangrado (vertido) a la olla de transferencia. Los valores obtenidos después del proceso de desgasificado se esperarían que fueran menores, sin embargo, en ambas corridas se observó un ligero aumento. Finalmente, al vaciar el metal transportado al horno de sostenimiento, que cuenta ya con aluminio de previas cargas debido a que este se va relleno según el requerimiento del metal; los valores en la primera corrida presentan un decremento y en la segunda se mantienen sin mucha variación.

IV.2. Evaluación del efecto de la cantidad de fundente aplicado durante el desgasificado

En la Figura 7 se muestran los resultados de las pruebas variando la cantidad de fundentes sólidos durante el proceso de desgasificado.

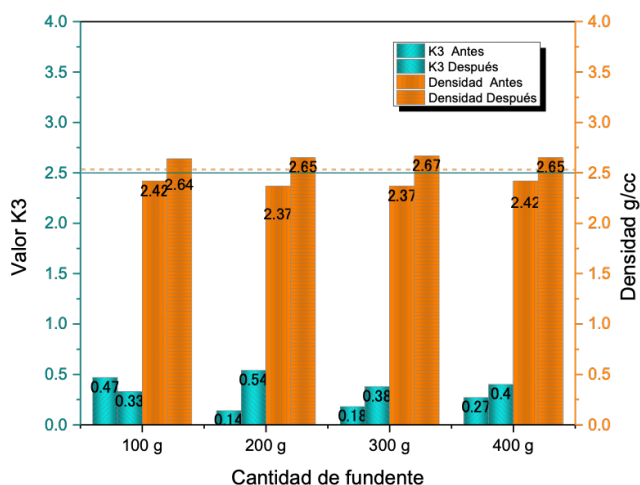


Figura 7: Gráfico comparativo de prueba variando cantidad de fundente

Los valores obtenidos después del proceso de desgasificación con aplicación de fundentes, en todos los casos quedan dentro de lo establecido como estándar de la planta, valores menores de 2.5 para K_3 y valores superiores a 2.51 g/cc para la densidad de las muestras de PPR.

Sin embargo, como se puede observar en la gráfica, de las 4 corridas que se llevaron a cabo en 3 se notó un incremento de inclusiones, de acuerdo con los resultados de las pruebas del Molde K , lo cual coincide con lo observado en las pruebas exploratorias. Estas observaciones llevaron a la conclusión de que se estaba contaminado el metal líquido durante la desgasificación.

Al realizar la revisión de los elementos que interactúan en ese proceso, se observó que la olla de transferencia

tenía suciedad adherida en las paredes de refractario, y se dedujo que, durante la operación, algunas de las partículas de óxidos y escorias se desprendieron e incorporaron al baño metálico. En la Figura 8 se aprecian fotografías de la olla de transferencia y la suciedad en el refractario.



Figura 8: Equipo para traslado de metal fundido, a) montacargas con olla de transferencia, b) olla de transferencia de metal fundido, c) interior de olla y d) suciedad desprendida de paredes refractario

El mejor valor de densidad obtenido, 2.67 g/cc, se logró con la aplicación de 300 g de fundente. Con estos resultados se puede concluir que la cantidad actual establecida de 100 gramos de fundente para el proceso de desgasificado para 600 kg de metal son insuficientes. Considerando los resultados de la revisión de la literatura especializada y los resultados de esta prueba, se concluye que la aplicación de 300 g de fundente en la olla de 600 kg de metal es la opción más adecuada para obtener un metal de buena calidad.

Como resultado de las observaciones, se realizó una limpieza de la olla previo a realizar las siguientes pruebas.

Prueba con limpieza de olla de transferencia

Se realizaron 2 corridas después de aplicar la limpieza de la olla, para validar los resultados de las pruebas anteriores, donde aplicaron 100 y 400 gramos de fundente sólido y utilizando solo la técnica de Molde K para medición de inclusiones. En la Figura 9 se muestra la gráfica de los datos agrupados de la prueba.

Como puede observarse en la Figura 9, en ambos casos se redujo la cantidad de inclusiones presentes en el metal después del tratamiento de desgasificación, que es un resultado congruente, dado a que el tratamiento se realiza con ese objetivo y refuerza la conclusión de que, en las corridas anteriores, el metal se contaminó con la suciedad de la olla de transferencia.

IV.3. Evaluación de efecto del diseño del rotor de desgasificado

En la Figura 10 se muestran los valores de K_3 y las densidades obtenidas en las pruebas comparativas del efecto del diseño de dos rotores para desgasificado, utilizando dos fundentes diferentes A y B.

Como puede observarse, no hay una diferencia significativa en los resultados obtenidos con los dos rotores y con los dos fundentes; ambos rotores y ambos fundentes

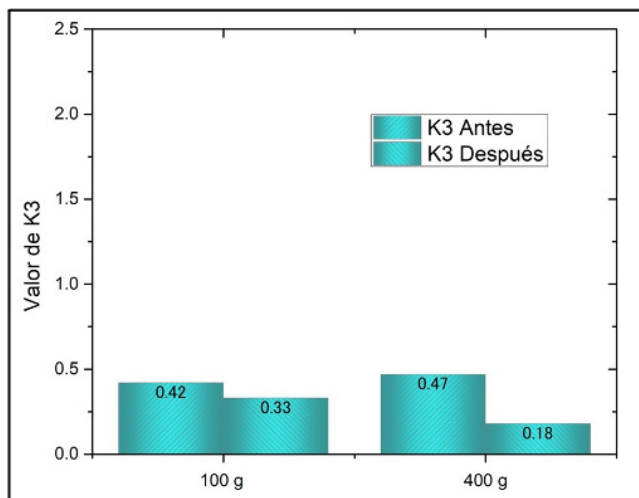


Figura 9: Gráfica de resultados de desgasificado con limpieza de olla

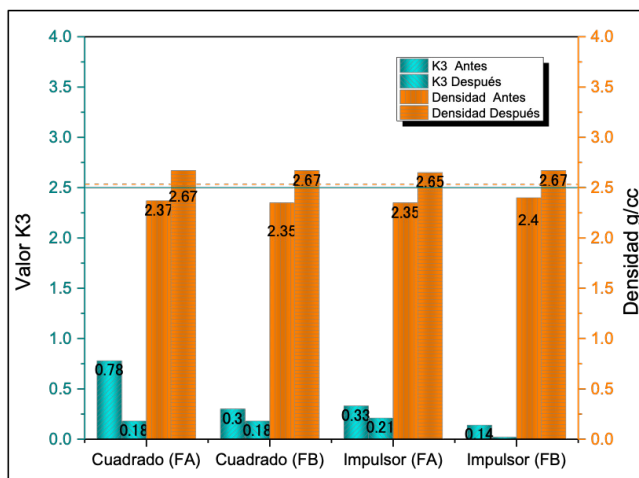


Figura 10: Gráfica comparativa de resultados de rotor cuadrado y rotor impulsor

se desempeñan adecuadamente para obtener un metal limpio, de acuerdo con los estándares de la planta, ya que los valores de K_3 están muy por debajo del establecido (2.5), y los valores de la densidad están muy por encima del establecido (2.51 g/cc). Al no haber diferencia en el desempeño, se revisará el aspecto económico la razón del costo-durabilidad para notar un beneficio y tomar una decisión que otorgue valor a la organización.

En el caso de los fundentes, el fundente A con el rotor cuadrado tuvo un buen decremento en el valor K, con una reducción de más del 300 % del valor inicial antes del desgasificado, de igual manera, en todas las corridas siguientes se aprecia una reducción en este valor, sin embargo, no se obtiene un resultado que dé un valor consistente de reducción, ya que desde el inicio de las corridas el metal fundido tenía valores muy pequeños,

lo que significa que el aluminio contaba con una buena condición de limpieza desde el inicio.

V. Conclusiones

El proceso de limpieza que se utiliza actualmente en la planta es suficiente para cumplir de manera consistente con los estándares de valores de K_3 y densidad establecidos.

Para mantener una calidad consistente y adecuada del metal fundido, previo a la operación de inyección a presión, es necesario realizar pruebas confiables en piso, que indiquen de manera suficientemente precisa el nivel de limpieza del metal.

La técnica del Molde K y la prueba de presión reducida, son pruebas de piso confiables para determinar y evaluar la limpieza del metal fundido; la primera para las inclusiones y la segunda para el hidrógeno disuelto.

La ubicación del orificio de sangrado del horno de fusión, en la parte inferior de este, de acuerdo con los valores de K_3 es correcta, dado que el metal está más limpio en esa zona que en la superficie.

La limpieza periódica de paredes de refractarios de hornos y ollas de traslado son imprescindibles para una calidad de metal con bajo nivel de inclusiones, dado que pueden convertirse en fuentes de contaminación para el metal fundido.

Para determinar la cantidad adecuada de fundente a utilizar en el proceso de desgasificado de aleaciones de aluminio, es necesario realizar más estudios comparando los resultados de varias corridas, ya que la limpieza final depende de muchas variables (procedencia del metal de partida, la composición de la aleación, cantidad de metal a desgasificar, variables de unidad desgasificadora, etc.)

No hay diferencias significativas en calidad del metal por efecto del diseño de los rotores probados, en ambos casos los resultados, en cuanto a la densidad de la muestra en la prueba de presión reducida, fueron muy similares y por encima del estándar de la planta.

Los resultados obtenidos al utilizar los fundentes A y B en la operación de desgasificado fueron similares y muy buenos, no identificándose diferencias significativas en su desempeño.

Con una mayor cantidad de pruebas y análisis de resultados, utilizando otras técnicas de caracterización directa, es posible optimizar los procesos de limpieza y elevar los estándares de calidad del metal líquido en la planta.

Aportaciones

Con los resultados de este trabajo de investigación se demostró la importancia de realizar experimentaciones en el piso de planta basadas en el método científico. Con las cuales se pueden obtener conclusiones internas sobre

los productos que ofrecen los proveedores de insumos. También se destacó la importancia que tiene la limpieza de los contenedores del metal fundido, son imprescindibles para no tener contaminaciones con partículas ajenas a las aleaciones fundidas.

Agradecimientos

Al CONACYT por su apoyo financiero y a la compañía Nissan Motor Co. Ltd. (Nissan Mexicana S.A. de C.V.) por facilitar el uso de sus instalaciones y equipos.

Referencias

- [1] Rafael Gallo. «Differentiating Inclusions in Molten Aluminium Baths and in Castings». En: *Pyrotek Inc. OH, USA* 493 (2017).
- [2] W Hufnagel. *Manual del aluminio*. Reverté, 1992.
- [3] Hua Gao et al. «A cluster of inclusions on Al–Si–Cu die casting cylinder block». En: *Engineering Failure Analysis* 55 (2015), págs. 370-375.
- [4] S Shivkumar, L Wang y D Apelian. «Molten metal processing of advanced cast aluminum alloys». En: *JOM* 43 (1991), págs. 26-32.
- [5] John E Gruzleski y Bernard M Closset. *The treatment of liquid aluminum-silicon alloys*. Amer Foundry Society, 1990.
- [6] R Gallo. «I Have Inclusions! Get Me the Cheapest and Best Flux for Cleaning My Melt!—Is This the Best Driven, Cost-Saving Approach by a Foundry». En: *Proceedings of the 121st Metalcasting Congress of the American Foundry Society*. 2017, págs. 17-105.
- [7] David V Neff. «Improving die casting melt quality and casting results with melt quality analysis and filtration». En: *WWW. Saatavissa (Viitattu 5.3. 2017): <https://www.dykast.com/user/products/5689-pdfs-1-file.pdf>* (2014).
- [8] Lori Parmenter, D Apelian y F Jensen. «Development of a Statistically Optimized Test Method for the Reduced Pressure Test (98-18)». En: *Transactions of the American Foundrymen's Society* 106 (1998), págs. 439-452.
- [9] O Gursoy et al. «Archives of Foundry Engineering». En: *Archives of Foundry* 2013 (2014), pág. 2012.
- [10] Gábor Gyarmati et al. «The effects of rotary degassing treatments on the melt quality of an Al–Si casting alloy». En: *International Journal of Metalcasting* 15.1 (2021), págs. 141-151.
- [11] S Kitaoka. «Evaluation of the melt cleanliness by K-Mold test». En: *Light Metals* (2001), págs. 26-29.

- [12] J Wannasin, D Schwam y JF Wallace. «Evaluation of methods for metal cleanliness assessment in die casting». En: *Journal of materials processing technology* 191.1-3 (2007), págs. 242-246.
- [13] H Mulazimoglu, N Handiak y JE Gruzleski. «Some observations on the reduced pressure test and the hydrogen concentration of modified A356 alloy». En: *Transactions of the American Foundrymen's Society* (1990), pág. 225.
- [14] Muhammet Uludağ et al. «On the interpretation of melt quality assessment of A356 aluminum alloy by the reduced pressure test: the bifilm index and its physical meaning». En: *International Journal of Metalcasting* 12 (2018), págs. 853-860.
- [15] D Dispinar y J Campbell. «Use of bifilm index as an assessment of liquid metal quality». En: *International Journal of Cast Metals research* 19.1 (2006), págs. 5-17.
- [16] Murat Tiryakioğlu. «The effect of hydrogen on pore formation in aluminum alloy castings: myth versus reality». En: *Metals* 10.3 (2020), pág. 368.