

Pruebas de densidad en vacío en muestras de aluminio obtenido a partir de latas para bebidas carbonatadas

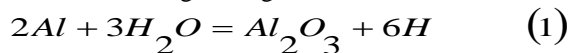
Carlos Ernesto Rivas, Manuel Amador Pineda, Julio Emilio Argüello, Gustavo Alberto Mejía.

Resumen—El aluminio en estado líquido tiene la tendencia a absorber el hidrógeno que se encuentra en la humedad del aire. Cuando el líquido se enfría y pasa a la fase sólida, la solubilidad del hidrógeno disuelto en él se reduce drásticamente causando la formación de poros en el metal con el consecuente deterioro de sus propiedades mecánicas. La absorción natural del hidrógeno por parte del aluminio líquido hace que en los procesos de fundición con este metal sea necesario retirar el hidrógeno disuelto mientras el metal se encuentra en estado líquido, proceso que recibe el nombre de desgasificación. Existen varias técnicas para desgasificar al aluminio líquido así como también existen varias técnicas comerciales para corroborar la efectividad de la desgasificación. El presente artículo describe el diseño, fabricación y prueba de un dispositivo sencillo y de bajo costo que permite la solidificación de una muestra de aluminio a una presión de vacío de modo que la presencia de hidrógeno en el metal pueda ser magnificada y apreciada a simple vista. También describe las pruebas realizadas para determinar la efectividad del uso de gas nitrógeno para eliminar el hidrógeno disuelto en el aluminio líquido.

Palabras clave—Fundición de aluminio, porosidad, contaminación por hidrógeno, solidificación en vacío, desgasificación con nitrógeno.

I. INTRODUCCIÓN

EL Aluminio en estado líquido tiene una tendencia muy fuerte a absorber gas hidrógeno del medio ambiente. La fuente más común de contaminación por hidrógeno es la humedad del aire, la cual al entrar en contacto con la superficie caliente del metal fundido reacciona produciendo óxido de aluminio e hidrógeno según la ecuación:



El hidrógeno resultante es absorbido fácilmente por el metal caliente manteniéndose en solución mientras el aluminio se

encuentra en la fase líquida. Cuando el metal pasa al estado sólido, la solubilidad del hidrógeno disminuye significativamente por lo que éste tiende a formar pequeñas burbujas o poros en el interior de la pieza de aluminio, deteriorando sus propiedades mecánicas y disminuyendo por tanto la calidad del material. Uno de los retos importantes de cualquier empresa que se dedique a la fundición de aluminio es eliminar el hidrógeno disuelto en el metal líquido de modo que una vez que la pieza solidifique, ésta quede libre de los defectos causados por la contaminación por hidrógeno.

Comercialmente existen varias técnicas para remover al hidrógeno disuelto en el aluminio líquido, procedimiento que recibe el nombre de desgasificación. También existen varias técnicas utilizadas para medir el nivel de hidrógeno disuelto en el metal y validar la efectividad de la técnica de desgasificación empleada. Uno de los métodos más utilizados para determinar la presencia de hidrógeno en el aluminio es la prueba de presión reducida (Reduced Pressure Test), también conocido como prueba de densidad en vacío (Vacuum Density Test), prueba de solidificación en vacío (Vacuum Solidification Test) o prueba de Straube-Pfieffer [1]. Esta prueba es sumamente sencilla y consiste en dejar solidificar una muestra de aluminio líquido dentro de un depósito a una presión inferior a la atmosférica. Si el aluminio líquido posee hidrógeno disuelto, la presión de vacío propicia que el hidrógeno forme burbujas de tamaño considerable antes que el metal solidifique. Estas burbujas se observan a simple vista como porosidad en la pieza sólida.

El trabajo se dividió en dos etapas. En la primera etapa se fabricó y probó un aparato sencillo y de bajo costo que permitió generar el vacío requerido en la muestra de aluminio para revelar su porosidad aparente. Se define como porosidad aparente a la cantidad de poros generados artificialmente por la presión reducida a la que es sometido el metal líquido. En la segunda etapa se hicieron pruebas inyectando gas nitrógeno en una cierta cantidad de aluminio líquido y verificando la variación de su porosidad aparente en función de la cantidad de nitrógeno inyectada. A partir de los datos recopilados se determinó la densidad de las muestras que solidificaron a presión reducida y se elaboró una gráfica que relaciona dicha densidad con el tiempo de inyección de nitrógeno. A partir de esta gráfica es posible determinar el tiempo óptimo de inyección de nitrógeno para obtener una pieza de aluminio libre de contaminación por hidrógeno.

Este trabajo fue financiado por el Fondo de Investigación de Educación Superior (FIES) del Ministerio de Educación de El Salvador.

Carlos Ernesto Rivas es profesor del Departamento de Mecánica Estructural de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (e-mail: crivas@ing.uca.edu.sv).

Manuel Amador Pineda es profesor del Departamento de Mecánica Estructural de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (e-mail: mapineda@ing.uca.edu.sv).

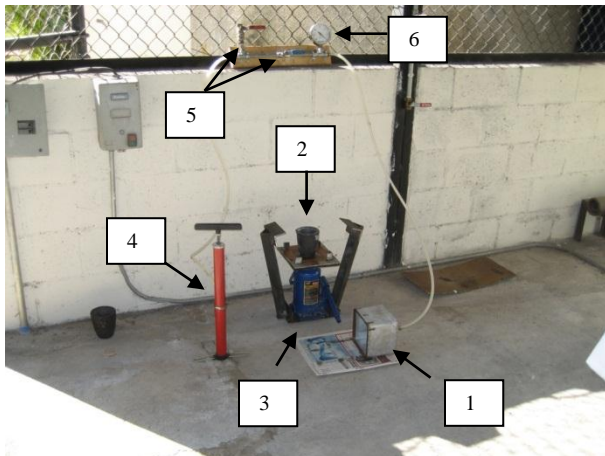
Julio Argüello es Ingeniero Mecánico graduado de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas.

Gustavo Mejía es estudiante de último año de Ingeniería Mecánica de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas.

II. METODOLOGÍA

A. El sistema de vacío.

Uno de los objetivos del trabajo es proponer y probar un diseño funcional y de bajo costo para generar el vacío requerido para revelar la presencia de hidrógeno. El diseño teórico de dicho sistema se desarrolló con el software Inventor de Autodesk y se hicieron simulaciones utilizando el software de elementos finitos ALGOR, también de Autodesk. Una vez se obtuvo un diseño teórico apropiado se construyeron, evaluaron y modificaron varios prototipos hasta obtener uno funcional. Las partes que conforman al sistema de vacío construido se muestran en la fotografía 1.



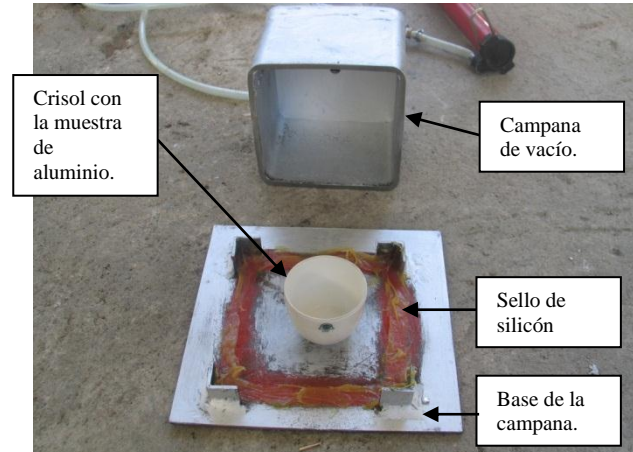
Fotografía 1. Componentes del sistema de vacío.

Las partes principales de este sistema están numeradas en la fotografía 1 y se describen a continuación:

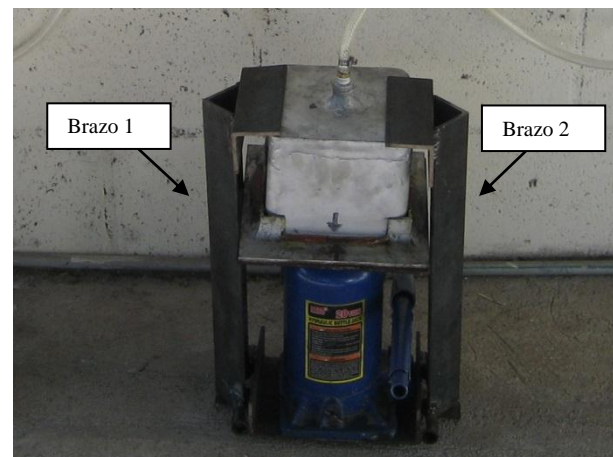
1. Campana de vacío. En su interior se coloca un crisol de grafito con la muestra de aluminio líquido que se desea solidificar a presión reducida.
2. Crisol de grafito.
3. Mica hidráulica. Se utiliza para presionar la campana contra su base y crear un sello suficientemente hermético para no perder el vacío generado durante la prueba.
4. Bomba de aire manual. Permite extraer el aire de la campana para generar el vacío en su interior. Se modificó una bomba para inflar llantas de bicicleta de modo que funcione como bomba de vacío.
5. Válvulas de bola. Permiten controlar el flujo de aire hacia la campana de vacío.
6. Manómetro de vacío. Permite medir la magnitud del vacío generado en el interior de la campana.

La campana de vacío se fabricó a partir de un tubo cuadrado de acero. El vacío se genera en su interior extrayendo el aire por medio de la bomba manual modificada. La campana de vacío se apoya en una placa de acero sobre la cual se ha fabricado un sello de silicón de alta temperatura. En la fotografía 2 se muestra la campana, la placa de apoyo y el sello de silicón. La fotografía 2 también muestra un crisol de porcelana utilizado en las primeras pruebas realizadas y

luego reemplazado por el crisol de grafito. Para mejorar el sello entre la campana y su base se aplica una fuerza en compresión por medio de la mica hidráulica, tal como se muestra en la fotografía 3. La magnitud del vacío alcanzado se mide por medio de un manómetro de vacío, el cual se muestra en la fotografía 4.

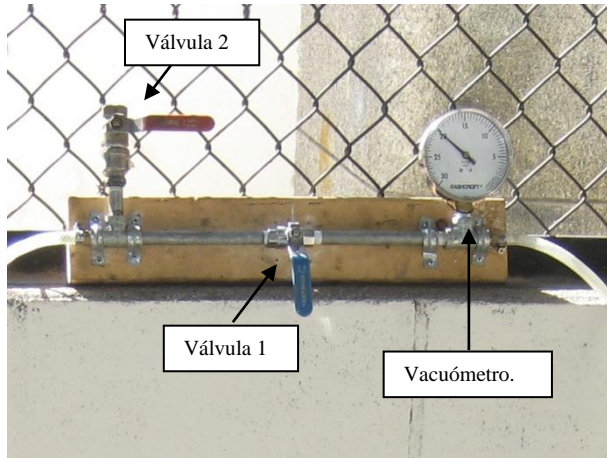


Fotografía 2. Detalle de la campana de vacío, la placa base y el sello.



Fotografía 3. La campana se presiona contra su base para lograr un buen sello y mantener el vacío.

El vacío más grande alcanzado con este dispositivo es de 20 pulgadas de mercurio. Una vez la muestra de aluminio ha solidificado, es necesario presurizar la campana de vacío para poder separarla de su base ya que aun cuando se retira la fuerza ejercida por la mica hidráulica, la presión atmosférica mantiene a ambas partes pegadas entre sí. Para eliminar el vacío del interior de la cámara se utilizan las dos válvulas que también se muestran en la fotografía 4. El sistema también cuenta con una válvula check o antirretorno que permite extraer el aire de la campana y evita que éste regrese mientras se opera la bomba de vacío.



Fotografía 4. Sistema de válvulas que permite controlar la entrada y salida de aire de la campana de vacío.

B. Prueba de funcionamiento del sistema.

Para probar el funcionamiento del sistema se fundió suficiente aluminio para llenar dos crisoles de grafito. El aluminio líquido se vierte en los dos crisoles y uno de ellos se introduce en la campana de vacío para que el metal solidifique a presión reducida mientras que el metal en el otro crisol solidifica a presión atmosférica. Ambos crisoles se precalentaron a 500°C para favorecer el enfriamiento lento del metal. Una vez el aluminio en ambos crisoles solidificó y enfrió, se sacaron las piezas obtenidas y se cortaron por mitad para observar su interior. La fotografía 5 muestra las dos piezas obtenidas antes de cortarlas. La pieza mostrada a la izquierda en la fotografía 5 es la que solidificó dentro de la campana a presión reducida mientras que la pieza de la derecha solidificó a la presión atmosférica.



Fotografía 5. Comparación entre la pieza obtenida a presión reducida y la pieza solidificada a presión atmosférica.

A primera vista se observa que la presión reducida ha tenido un efecto visible sobre la superficie libre del aluminio líquido. La superficie libre de la muestra que solidificó a presión reducida presenta un aspecto rugoso e irregular. La

muestra que solidificó a presión atmosférica presenta una superficie libre lisa y suave. En la fotografía 6 se observa la sección transversal de la muestra que solidificó dentro de la campana de vacío. Note que la presencia de poros causados por el hidrógeno disuelto en el metal es evidente. La fotografía 7 presenta la sección transversal de la muestra que solidificó a presión atmosférica. Dado que ambas piezas provienen del mismo volumen de aluminio fundido, ambas deben poseer la misma cantidad de hidrógeno disuelto sin embargo en la muestra que solidificó a presión normal no es posible observar directamente los efectos de dicha contaminación.

De las observaciones descritas se concluye que el sistema de vacío construido es capaz de revelar la presencia del hidrógeno disuelto en el aluminio. Se ha comprobado cualitativamente que el vacío generado con este sistema es suficiente para generar burbujas de hidrógeno de suficiente tamaño para ser observadas a simple vista en el interior del metal.



Fotografía 6. Sección transversal interna de la muestra que solidificó a presión reducida. Se observan a simple vista los poros causados por la presencia de hidrógeno.



Fotografía 7. Sección transversal interna de la muestra que solidificó a presión normal. Aún cuando esta muestra está contaminada con hidrógeno, su presencia no es evidente.

C. Determinación de la densidad en vacío.

Una vez el sistema de presión reducida funcionó satisfactoriamente se procedió a realizar pruebas de inyección de nitrógeno en el aluminio fundido. El procedimiento ejecutado se describe a continuación:

1. Se fabricaron por fundición 24 muestras utilizando 15 libras de latas de bebidas para cada una. En total se fundieron 360 libras de latas de aluminio.
2. Se eliminó la escoria superficial de cada una de las muestras utilizando una mezcla de cloruro de sodio con cloruro de potasio.
3. Se inyectó nitrógeno gaseoso a un flujo de 6 litros por minuto. El tiempo de inyección de nitrógeno se varió según se muestra en la tabla 1. La fotografía 8 ilustra el momento en que se está inyectando vacío dentro del metal líquido por medio de una lanza de acero inoxidable fabricada para tal fin.
4. Las muestras se colocaron en el sistema de vacío y se dejaron solidificar.
5. Una vez en estado sólido, cada muestra fue cortada por la mitad para analizar la porosidad causada por las burbujas de hidrógeno formadas por la presión reducida.
6. Se tomó una de las mitades de cada muestra, se midió su masa en una balanza así como su volumen por medio de desplazamiento de agua.
7. Se calculó la densidad a presión reducida de cada muestra. Entre menor sea el valor de esta densidad, mayor es el número de burbujas causadas por el hidrógeno que posee la muestra.
8. Se tomó una muestra de aluminio importado y se determinó su densidad utilizando el mismo método empleado en las muestras de presión reducida. Esta densidad se toma como referencia.
9. Se calculó el cociente entre la densidad a presión reducida de cada muestra y la densidad de referencia. Se graficaron los valores obtenidos para visualizar la variación del contenido de hidrógeno presente en las muestras contra el tiempo de desgasificación.



Fotografía 8. El nitrógeno se inyecta en el metal líquido por medio de una lanza fabricada con acero inoxidable.

III. RESULTADOS

Si el metal está contaminado con hidrógeno, la presión reducida genera poros y burbujas que provocan que la densidad del material sea menor que su valor real, ya que hay menos masa ocupando el mismo volumen. Debido a ello, al dividir la densidad a presión reducida de las muestras entre la densidad de referencia obtenida para el aluminio importado se obtienen valores menores que la unidad. Cuando la densidad en vacío es igual que la densidad de referencia se interpreta que el hidrógeno ha sido totalmente eliminado del aluminio. Entre menor sea el cociente entre la densidad a presión reducida y la densidad de referencia, se interpreta que la contaminación con hidrógeno del metal es mayor. El gráfico 1 muestra la variación de la densidad promedio a presión reducida de las muestras en función del tiempo de inyección de nitrógeno utilizado. El valor graficado es el promedio de los cocientes de las tres muestras que se desgasificaron con el mismo tiempo de inyección de nitrógeno. De este gráfico se observa que la densidad en vacío de las muestras se aproxima a la densidad de referencia del aluminio para un tiempo de inyección de 20 segundos.

Tabla 1. Tiempo de inyección de nitrógeno en muestras de aluminio fundido.

Muestra	Tiempo de inyección de nitrógeno
1, 2 y 3	No se inyectó nitrógeno.
4, 5 y 6	2 segundos.
7, 8 y 9	4 segundos.
10, 11 y 12	10 segundos.
13, 14 y 15	20 segundos.
16, 17 y 18	30 segundos.
19, 20 y 21	60 segundos.
22, 23 y 24	180 segundos.

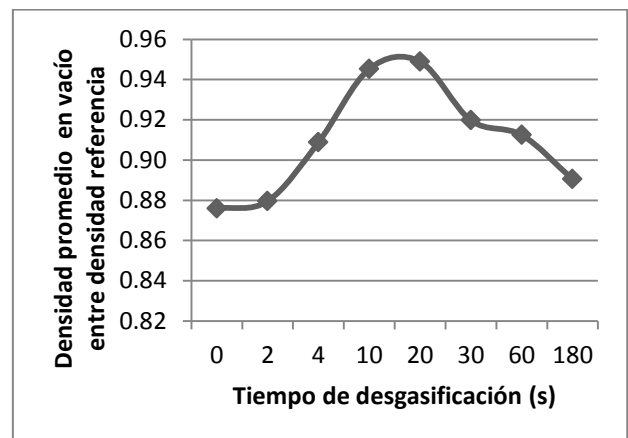


Gráfico 1. Variación de la densidad promedio en vacío con respecto al tiempo de inyección de nitrógeno en el aluminio.

IV. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El gráfico de densidad relativa a presión reducida contra tiempo de desgasificación presenta un valor máximo para 20 segundos de nitrógeno. Este dato es válido únicamente para el crisol del horno de fundición del laboratorio de la UCA y para la cantidad de aluminio que se fundió en las pruebas de desgasificación. Partiendo de $t=0$ segundos, la densidad en vacío se aproxima a la densidad de referencia a medida el tiempo de inyección aumenta, lo cual es el resultado esperado ya que a mayor cantidad de nitrógeno inyectado se espera que la remoción de hidrógeno sea mayor. Sin embargo, después de 20 segundos de desgasificación la densidad a presión reducida vuelve a disminuir indicando que la contaminación por hidrógeno aumenta. Esto indica que si se inyecta nitrógeno en exceso en el metal la eficiencia de este gas para eliminar la contaminación por hidrógeno disminuye. En este momento no se tienen datos experimentales que permitan entender por qué el exceso de nitrógeno inyectado causa un incremento en la contaminación por hidrógeno del aluminio fundido, sin embargo es posible plantear algunas hipótesis teóricas que expliquen este comportamiento. Se realizó una prueba de inyección de nitrógeno en agua dentro de un recipiente transparente para visualizar la forma de las burbujas de nitrógeno y la manera como se forman dentro de un líquido. La fotografía 9 muestra la prueba realizada. En ella se observó que las burbujas generadas por la lanza de inyección son de tamaño relativamente grande y que al llegar a la superficie libre del líquido la perturban formando turbulencia significativa. Si se realiza el ejercicio mental de sustituir al agua por aluminio líquido, se esperaría que en la superficie libre del aluminio se genere una capa de óxido que lo protege del contacto con el medio ambiente. Las burbujas causadas por la inyección de nitrógeno perturban dicha capa de óxido aislante y favorecen el contacto del metal con la humedad del ambiente. La hipótesis teórica que explicaría el incremento de la contaminación por hidrógeno al incrementar el tiempo de desgasificación es la siguiente: durante los primeros 20 segundos de inyección el nitrógeno es capaz de eliminar al hidrógeno del metal líquido. Sin embargo, la capa de óxido superficial es dañada por el constante burbujeo del nitrógeno en la superficie libre. Después de 20 segundos la capa de óxido se ha dañado al grado que un mayor volumen del metal líquido que está por debajo de ella queda expuesto al medio ambiente, absorbiendo más hidrógeno que el nitrógeno es capaz de eliminar. A partir de este punto la cantidad de hidrógeno que entra al metal por la ruptura de la capa de óxido es mayor que la que el nitrógeno es capaz de eliminar, incrementándose la concentración de hidrógeno en el metal, generando porosidad aparente y reduciendo el valor de su densidad a presión reducida. La turbulencia causada por las burbujas de nitrógeno llegando a la superficie del metal se ve incrementada por el diámetro pequeño del crisol del horno de fundición UCA y por el hecho que la lanza se agitó levemente durante la desgasificación para procurar que un mayor volumen de aluminio estuviera en contacto con el nitrógeno que se inyecta. Esta agitación leve se suma a la turbulencia causada por las burbujas deteriorando aún más la capa de óxido superficial y favoreciendo la contaminación del metal.



Fotografía 9. Burbujas generadas por el nitrógeno cuando se inyecta en agua.

El siguiente paso en este trabajo consiste en fundir aluminio en un horno de mayor tamaño y verificar si los resultados obtenidos en el horno de laboratorio pueden extrapolarse a un volumen mayor de aluminio líquido. A la fecha de elaboración de este artículo, dicha prueba no se ha realizado.

A partir de los datos recopilados se ha comprobado que la inyección de gas nitrógeno es capaz de eliminar al hidrógeno disuelto en el aluminio líquido y que para el crisol del horno de fundición UCA el tiempo óptimo de desgasificación es de 20 segundos. Para crisoles de mayor tamaño se debe encontrar experimentalmente el tiempo de desgasificación óptimo, mantener estática la lanza de inyección para evitar romper la capa de óxido de aluminio que se forma en la superficie del metal y procurar que las burbujas de nitrógeno perturben lo menos posible la superficie del metal fundido.

V. REFERENCIAS

- [1] C. E. Eckert, "RPT gauges aluminum porosity: the rising demand for top quality aluminum metal castings puts emphasis on reducing test variables to improve accuracy", Modern Casting. Available: <http://www.allbusiness.com/manufacturing/fabricated-metal-product-manufacturing/293356-1.html>