

**Incorporación de vidrio reciclado en mezclas de arenas de moldeo para fundición no
ferrosa**

Carlos Alberto Zafra Díaz, Yeiver Alexis Castillo Molina

Trabajo de Grado para Optar por el título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Pedro Luis Delvasto Angarita

Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

Dedico este libro a mi madre Eva Díaz Pinto, a mis abuelos, y a mi tío Ramón, gracias a su ejemplo de esfuerzo y tenacidad, logro completar esta etapa de mi vida.

A mi compañero y amigo, Yeiver Alexis, por ser un complemento perfecto para los momentos de crisis y de vagancia. Gracias por este año y medio de trabajo.

Al profesor Pedro Luis Delvasto Angarita, por su dedicación, consejo y apoyo durante la realización de nuestro proyecto de grado.

A mis socios y compañeros en esta segunda oportunidad de vida Mario, Yeilly, Cristian Rodríguez, Yeral, Andreita, Macareo, "El viejito", Jhon y Giovanni. Su compañía hizo que la decisión de estudiar Ingeniería Metalúrgica me llene de orgullo.

A Dagriton, Urumita y Jean Carlo, su guía en los momentos de crisis fue fundamental, para reorientar mi academia y aprender que cada sitio es el lugar perfecto.

La locura y el desorden a cargo de Michel, Willi, Iván y Osquitar, me permitieron relajarme de la tensión y los problemas de la academia. Gracias por tantos comentarios "Tóxicos".

Carlos A. Zafra Díaz

Dedicatoria

A dios por guiarme y colocar en mi vida personas tan maravillosas personas.

A mi madre Martha Isabel Molina Gómez, por siempre encaminarme en la búsqueda del conocimiento y apoyarme incondicionalmente en cada proyecto emprendido.

A mis abuelos José Ángel Molina y Cruz Delina Gómez Hernández, por su lucha incansable en hacer de "ese muchachito" alguien de bien. Por cada madrugada, corrección, consejo y amor infinito.

A Geraldine Alarcón por estar en mi vida desde mis primeros pasos.

A mi tío Robin, Ligia Flórez e hijos, por ser un motor adicional en la búsqueda del éxito.

A mi tía Liliana por su sabiduría infinita, sus consejos, por ser un modelo a seguir de persona y enseñarme con su ejemplo la importancia de la familia.

A Andrea Carolina Urbina Velandía, por ser mi luz en momentos oscuros, regalarme esa sonrisa que alegra mis días, apoyo incondicional y motivarme a dar siempre lo mejor.

A mi compañero de proyecto y amigo Carlos Alberto Zafra Díaz, por su paciencia, alegría, espontaneidad y manera de enseñarme a ver la vida, por hacer de este proyecto no un requisito, sino una aventura.

A Belén González y Modesta Reyes por abrirme las puertas de sus hogares y corazones.

A mis amigos Duván Gómez, Iván Padilla, Aldair Pabón, Degwith Castellanos, Victor Infante, Manuel Rueda, Breyner Parada, Yeilly Buitrago, Ana Laura Escobar, Edgardo Saavedra y Geraldí Cogollo por su amistad y apoyo a lo largo de esta carrera.

A todos los docentes que han estado presente en mi formación académica y profesional a lo largo de mi vida. Especialmente a Omaira Rodríguez, Oscar Hernández y Pedro Delvasto, por todo su apoyo.

Yeiver Alexis Castillo Molina

Agradecimientos

A los técnicos de la planta de aceros: Ambrosio, Mario Alfonso, Javier y Domingo, por su acompañamiento, paciencia y consejos, durante este año de trabajo.

Al grupo Q/MAT, en cabeza de la Doctora Eley María Córdoba, por permitirnos usar su microscopio confocal para hallar los perfiles de rugosidad.

Al laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido por realizar las micrografías SEM de las muestras de arena natural y arena vítrea.

Al laboratorio de Espectroscopía de Emisión óptica por excitación por chispa, a cargo del Doctor Pedro Luis Delvasto Angarita, por la caracterización química de la aleación fundida.

A nuestros amigos y familiares que se sumaron a la causa del reciclaje del vidrio, colaborando con la materia prima para la realización de este proyecto.

A la Escuela de Diseño Industrial, en especial al técnico Mauricio Jaraba, por prestarnos su laboratorio de maderas y permitirnos realizar la placa modelo.

Al técnico Gonzalo de Ingeniería mecánica, por ayudarnos con el mecanizado de la placa modelo.

Contenido

	Pág.
Introducción	16
1. Objetivos	17
1.1 Objetivo General	17
1.2 Objetivos Específicos	17
2. Antecedentes	18
2.1 Reciclaje de vidrio	19
2.1.1 Reciclaje convencional del vidrio	19
2.1.2 Reciclaje no convencional del vidrio	20
2.2 Mezclas de moldeo utilizadas en fundición	20
3. Metodología Experimental	22
3.1 Recolección de los recipientes de vidrio tipo soda-lime	22
3.2 Producción de la arena vítrea a partir de vidrio reciclado de tipo soda-lime	22
3.3 Cálculo del consumo energético para la molienda de vidrio soda-lime	24
3.4 Preparación y caracterización de las mezclas de moldeo de arena natural y vítrea	26
3.4.1 Preparación de la mezcla patrón a partir de arena natural.	26
3.4.2 Preparación de las mezclas de moldeo a partir de arena natural y vítrea.	26
3.5 Fabricación de moldes en verde y fundición de la aleación de aluminio	29

3.6 Medición de la rugosidad de las piezas de la aleación de aluminio fundidas en los moldes de arena natural y vítrea.....	31
3.7 Análisis estadístico de los resultados.....	32
4. Resultados y discusión.....	33
4.1 Propiedades generales de las arenas de tipo natural y vítrea.....	33
4.2 Mezclas de moldeo.....	36
4.2.1 Pruebas de calibración de las mezclas de moldeo formuladas a partir de arena natural.	36
4.3 Propiedades de las mezclas compuestas por arena natural y vítrea.....	39
4.4 Valores de Rugosidad en función del contenido de arena natural en la mezcla.....	41
5. Conclusiones.....	42
6. Recomendaciones.....	43
Referencias Bibliográficas.....	44
Apéndices.....	47

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Clasificación por tamaños del material a la salida del molino de bolas.</i>	23
Tabla 2. <i>Mezclas de arena de moldeo en verde preparadas a partir de arena sílice y vítrea.</i>	27
Tabla 3. <i>Distribución de las distintas mezclas de arena de contacto preparadas a partir de arena natural y vítrea.</i>	30
Tabla 4. <i>Propiedades físicas de la arena natural y vítrea implementadas en las mezclas de moldeo.</i>	33

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Diagrama de flujo del proceso de reducción de tamaños y clasificación de la arena vítrea.	24
<i>Figura 2.</i> Molde en arena elaborado con dos tipos de mezclas, a) Ramal izquierdo; b) Ramal derecho.	29
<i>Figura 3.</i> Diagrama de flujo del proceso de moldeo en verde y fundición.	31
<i>Figura 4.</i> Micrografías de SEM con su respectivo análisis elemental obtenido por EDS. a) arena natural a 100x; b) arena vítrea 100x.	34
<i>Figura 5.</i> Diagrama de cajas y bigotes del factor de circularidad. a) arena natural; b) arena vítrea.	35
<i>Figura 6.</i> Propiedades de las mezclas de arena natural en función del contenido de arcilla y humedad. a) Resistencia a la compresión en verde (PSI); b) Permeabilidad AFS; c) % Compactabilidad	37
<i>Figura 7.</i> Propiedades exhibidas por las mezclas de arena de moldeo fabricadas con un 10% de bentonita y un contenido de humedad de 4,5%. a) Resistencia a la compresión en verde; b) Compactabilidad; c) Permeabilidad en verde. Las barras de error indican una desviación estándar por encima y por debajo del promedio.	40

Figura 8. Diagrama de cajas y bigotes: Rugosidad de las piezas fundidas en función del contenido de arena natural en el molde en el cual fueron elaboradas..... 41

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Propiedades físicas: Tabla de datos para la obtención de densidades para la arena natural y vítrea.	47
Apéndice B. Resultados de la determinación del tiempo óptimo de molienda del vidrio reciclado.	49
Apéndice C. Porcentaje de Arcilla AFS en la arena natural.	51
Apéndice D. Distribución granulométrica e índice de finura de la arena natural y vítrea.	52
Apéndice E. Micrografías de la arena vítrea y natural captadas mediante SEM.	55
Apéndice F. Índice de trabajo y energía consumida en el proceso de reducción de tamaño del vidrio reciclado.	57
Apéndice G. Calculo factores de circularidad (Fc) para la arena natural y el vidrio vítrea.	60
Apéndice H. Espectroscopia de emisión óptica por excitación por chispa de la aleación de aluminio colada en arena natural-vítrea a un 10% de bentonita.	61
Apéndice I. Metalografías de la aleación de aluminio-cobre-silicio colada en arena natural-vítrea a un 10% de bentonita.	62
Apéndice J. Valores de rugosidad obtenidos para las mezclas de moldeo arena natural-vítrea. ..	63
Apéndice K. Análisis de significancia estadística para las diferentes mezclas de arenas de moldeo natural-vítrea.	66

Resumen

Título: incorporación de vidrio reciclado en mezclas de arenas de moldeo para fundición no ferrosa*

Autores: Yeiver Alexis Castillo Molina**
Carlos Alberto Zafra Díaz

Palabras claves: arena vítrea, mezclas de moldeo, reducción de tamaño, fundición

Descripción:

Las arenas silíceas son las más utilizadas por la industria de la fundición como arenas de contacto en moldes refractarios; sin embargo, la sobreexplotación de este recurso, impulsa la búsqueda de materiales sustitutos con una relación costo beneficio más favorable. Siguiendo dicha búsqueda, se planteó la implementación de una arena artificial, nombrada en adelante como arena vítrea, como sustituto a la arena natural o silícea.

Para la fabricación de la arena vítrea, se emplearon botellas de vidrio reciclado tipo soda-lime, sometidas a procesos de reducción y clasificación por tamaños, considerándose útil el material con un tamaño entre 88-210 μm . Este material presenta un índice de finura AFS de 88,46; densidad de 2,417 g/cm^3 ; factor de circularidad de 0,57 y un índice de trabajo de 12,94 Kwh/Ton-c.

Posteriormente se elaboraron cinco formulaciones de moldeo, a partir de arena vítrea y arena natural. Siendo definidos previamente, el contenido adecuado de arcilla y humedad, a partir de la experimentación de estas variables en una mezcla de arena natural. Con estas mezclas, se fabricaron moldes sobre los cuales se realizó la colada de aleación de aluminio, fundida a 750°C.

Una vez solidificado el metal, se realizó el desmoldeo, observándose, un buen acabado superficial y buena precisión dimensional de las piezas fundidas. Luego de esto, se clasificaron según la formulación del molde en el que fueron fundidas. Después de lo cual, se analizó la rugosidad media, obteniéndose, valores estadísticamente similares, independientemente del tipo de mezcla utilizado.

* Trabajo de grado

** Facultad de Físicoquímicas. Escuela de ingeniería metalúrgica y ciencia de materiales. Director: Pedro Luis Delvasto Angarita, Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales

Abstract

Title: Incorporation of Recycled Glass in Molding Sand Mixtures for Non-Ferrous Foundry*

Authors: Yeiver Alexis Castillo Molina**
Carlos Alberto Zafra Diaz

Key words: Vitreous Sand, Molding Mixes, Size Reduction, Foundry

Description:

Siliceous sands are the most used by the foundry industry as contact sands in refractory molds; However, the overexploitation of this resource drives the search for substitute materials with a more favorable cost-benefit ratio. In this work, the implementation of artificial sand, hereinafter referred to as vitreous sand, was proposed as a substitute for natural or siliceous sand.

For the manufacture of vitreous sand, recycled soda-lime-type glass bottles were used, subject to size reduction and classification processes. The material obtained with a size between 88-210 μm was considered useful. This material had an AFS fineness index of 88.46; a density of 2,417 g / cm^3 ; circularity factor of 0.57 and a work index of 12.94 Kwh / Ton-c.

Subsequently, five molding formulations were made, from vitreous sand and natural sand. Being previously defined, the adequate content of clay and moisture, from the experimentation of these variables in a reference mixture of natural sand. With these mixtures, molds were manufactured on which the casting of aluminum alloy, cast at 760 ° C, was performed.

Once the metal solidified, the demolding was carried out, observing a good surface finish and good dimensional precision of the castings. After this, they were classified according to the formulation of the mold in which they were cast. After which, the average roughness was analyzed, obtaining statistically similar values, regardless of the type of mixture used.

* Degree work

** Faculty of Physicochemicals. School of metallurgical engineering and materials science. Director: Pedro Luis Delvasto Angarita, Doctor of Materials Science and Technology

Introducción

La arena es un material granular, resultado de los procesos de erosión y transporte que sufren las rocas del planeta durante miles de años. Este material granular es relevante para el equilibrio de los ecosistemas marinos y ribereños, además de ser la materia prima indispensable en la industria de la construcción, para la elaboración de concreto.

El consumo exacerbado de este recurso, pone en riesgo los suministros a mediano y largo plazo, para mitigar este impacto negativo, el servicio mundial de alerta ambiental (GEAS), dependiente de la ONU, sugiere la incorporación de materiales reciclados en la construcción de edificios y carreteras.

La segunda industria que reporta más consumo de arena sílice es la del vidrio. Aquí la arena sílice se mezcla con óxidos y vidrio reciclado, para fundirse nuevamente en forma de botellas con una composición de entre 71-75% SiO_2 , el cual es el componente principal de la arena natural (Shelby, J., 2005).

La industria de la fundición emplea la arena natural, como materia prima para el moldeo en arena en verde, (Kalpakjian & Schmid, 2006). Esta arena se deja enfriar y se regeneran sus propiedades mediante la adición de arcilla y agua, sin embargo, luego de varios procesos de moldeo es necesario utilizar nueva arena para garantizar la calidad del molde. (Zalensas, 1997)

Por tanto, en el presente trabajo, se estudia la viabilidad de implementar, arena vítrea como sustituto de la arena sílice natural, teniendo como materia prima de dicha arena, botellas y envases de tipo soda lime transparentes, reciclados por los propios autores en la ciudad de Bucaramanga, Colombia.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Incorporar vidrio reciclado de tipo soda-lime en mezclas de arena de contacto como la utilizada en moldes para fundición no ferrosa.

1.2 Objetivos Específicos

1. Realizar el proceso de conminución (trituración y molienda) de los recipientes de vidrio grado alimenticio (soda-lime) hasta obtener una granulometría adecuada para fundición no ferrosa.
2. Caracterizar la funcionalidad del vidrio molido obtenido como material para moldeo, implementando los ensayos estipulados por la American Foundry Society (AFS).
3. Elaborar moldes para piezas de estudio, utilizando diferentes relaciones de porcentaje en peso de arena de vidrio y arena silícea, para evaluar el acabado superficial de las piezas metálicas producidas en metales no ferrosos.

2. Antecedentes

El problema medioambiental del consumo excesivo de arena ya ha sido tratado en anteriores proyectos aplicados a la industria de la fundición. Los materiales sustitutos que se han evaluado tienen en común un contenido elevado de sílice que garantiza buenas propiedades refractarias.

Como primer ejemplo, se destaca la utilización de cenizas de biomasa, para la producción de moldes en verde, para fundición de aluminio (Srinivasan, Siddharth, Arun, & Thenarasu, 2018), resaltándose el ahorro de combustible y disminución de emisiones de CO₂, en virtud de que la arena natural no tendría que ser transportada desde la mina, ubicada a 141 Km de la ciudad de Coimbatore donde se ubica la planta de fundición. Ahorrando mensualmente 28 300 dólares y dejando de emitir 15 millones de toneladas de CO₂.

Tratando de mitigar el impacto medio ambiental de los residuos generados por diversas industrias, se ha estudiado la posibilidad de fabricar moldes para fundición de aleaciones de aluminio, utilizando residuos de proceso como: cenizas volantes (Srinivasa & Kumar, 2017) y escorias de alto horno. (Narasimha & Babu, 2018)

Incluso, en otro intento de sustituir la arena natural, se realizaron pruebas, para comprobar la viabilidad de usar rocas de esquistos, subproductos de minería, como arena de moldeo para piezas de fundición de bronce. (Duran, Montoya, P., & Peralbo, 2014)

Finalmente, como antecedente directo del presente trabajo, se destaca la elaboración de machos para fundición de hierro, descrito en la patente americana (Attridge & Werling, 2012), en esta, se fabricó una mezcla para machos basada en vidrio, óxido de hierro y arena natural, mejorando los problemas de venas en las piezas fundidas. Dicha mezcla se fabricó utilizando un

25% de vidrio, siendo este vidrio de dos tipos: borosilicato y soda-lime. Este último es típicamente utilizado para empaquetar alimentos y bebidas, teniendo una composición de entre 70% a 75% de SiO_2 , principal óxido componente de la arena de moldeo, con un punto de fusión de 1700°C .

2.1 Reciclaje de vidrio

2.1.1 Reciclaje convencional del vidrio. El tipo de vidrio más importante es el soda-lime, que consiste principalmente en dióxido de silicio (71-75%), óxido de sodio (12-16%), y óxido de calcio (10-15%) (Attridge & Werling, 2012). Este tipo de vidrio es empleado por la industria de los alimentos, ya que el envase de vidrio no altera las propiedades de olor y sabor de las bebidas. Para la fabricación de botellas de vidrio se consumen cantidades significativas de recursos naturales no renovables, energía y materias primas. Por ejemplo, los fabricantes europeos de vidrio liberaron 570 Kg de CO_2 por kilogramo de vidrio producido en 2007. (Jamshidi & Igarashi, 2016)

Para mitigar el impacto ambiental, es una práctica habitual entre los fabricantes de vidrio el agregar, junto con la carga de materias primas vírgenes (Arena sílice de alta pureza, óxido de sodio y óxido de calcio), una carga de vidrio reciclado. Se ha establecido que la incorporación de un 10% de vidrio reciclado en la producción de vidrio, disminuye el consumo promedio de energía en un 2,5%. El reciclaje convencional de vidrio disminuye el requerimiento de energía en un 40%, en comparación a una producción de vidrio basada en el uso de arena sílice y materias vírgenes en la carga a fundir. (Jamshidi & Igarashi, 2016)

2.1.2 Reciclaje no convencional del vidrio. Por su alto contenido en sílice, el vidrio reciclado es utilizado como sustituto en sectores como la construcción (Zubaid, Muttar, & Aynoor, 2017); la fabricación de ladrillos refractarios (Bay, y otros, 2014) y como sedimento para recuperar porciones de playas erosionadas. (Edge, Cruz, & Orville, 2002)

Estudios previos han informado sobre el uso del polvo de vidrio residual como material agregado para asfalto, pavimentos de hormigón y losas de aceras (Disfani, Arulrajah, Bo, & Hankour, 2010). También se sabe que, el polvo fino de sílice se puede usar para mejorar las propiedades mecánicas del cemento, dado su contenido de alrededor del 72% de sílice, cercano al contenido de sílice en la arena (entre un 89 y 96% de sílice). Debido a esto, los residuos de vidrio se han investigado como un sustituto parcial y prometedor, para la arena en el concreto. (Pahlevani & Sahajwalla, 2018)

2.2 Mezclas de moldeo utilizadas en fundición

La técnica de moldeo en verde implica como mínimo la mezcla de tres ingredientes principales: arena, arcilla y agua. (Groover, 2007)

Las partículas de arena, por sí solas, no tienen la cohesión suficiente para mantener la forma del modelo en el molde, por esta razón, se utilizan arcillas que, al hincharse por la adición de agua a la mezcla, actúan como material aglomerante, aportando resistencia y plasticidad, siempre y cuando hayan sido activadas por un adecuado contenido de agua y un tiempo adecuado en el mezclador. (Frink, 2004)

Las arenas silíceas, contienen desde el yacimiento materiales arcillosos, los cuales actúan como aglomerante, en tales casos las mezclas de moldeo, realizadas con estas arenas, solo

necesitan la adición de agua y mezclado. El contenido de arcilla varía de un yacimiento a otro y afecta la reproducibilidad de una mezcla de moldeo en su aplicación industrial. Por esta variación las empresas de fundiciones empezaron a utilizar arena lavada, con un contenido máximo de 1,5% de arcillas naturales (Quintero, 1998). Estas arenas se aglomeran adicionando un valor controlado de arcillas montmorilloníticas, conocidas comercialmente como bentonitas, que pueden ser del tipo sódico o cálcico. (Zalensas, 1997)

El agua aportada a la mezcla de arena y arcilla actúa como un activador de esta última, para desarrollar propiedades plásticas en la mezcla. Se debe tener precaución en su adición ya que, de ser insuficiente, se fabricará una arena de moldeo quebradiza difícil de moldear, que será fácilmente arrastrada por el metal colado en el molde, generando defectos de fundición como veteados, incrustaciones y arrastres de arena. (Frink, 2004)

El exceso de agua también resulta negativo en el moldeo en arena, ya que al vaciar el metal fundido se formarán vapores en el interior del molde que, de no ser expulsados por este hacia la superficie, ocasionarán porosidad severa en las piezas metálicas (Frink, 2004). Para las fundiciones de aluminio la AFS recomienda contenidos de agua entre 1,5% y 5,5%, respecto al peso total de la mezcla. (Zalensas, 1997)

Para determinar el punto óptimo de humedad, se requieren de ensayos de arenas. En éstos, se adiciona humedad a la mezcla, verificándose su resistencia a la compresión, permeabilidad y compactabilidad. Estas propiedades, aumentan hasta alcanzar un punto de saturación de agua conocido como punto de temple, luego del cual disminuyen. (Zalensas, 1997)

3. Metodología Experimental

3.1 Recolección de los recipientes de vidrio tipo soda-lime

En el presente proyecto se utilizaron botellas de vidrio soda-lime de tonalidad transparente, para mantener una composición química homogénea. Se removieron las etiquetas y tapas de las botellas recolectadas, para posteriormente someterlas a lavado con agua y jabón, eliminando suciedad, pegamento de etiquetas y restos de alimentos. El secado se realizó a temperatura ambiente durante 1 día.

3.2 Producción de la arena vítrea a partir de vidrio reciclado de tipo soda-lime

Se pasaron las botellas de vidrio a través de una trituradora de mandíbulas marca RESTCH, con una abertura de set de 2 mm. El material triturado se tamizó usando una malla Tyler # 10 (2000 μm) como corte, siendo recirculado el material retenido en esta malla. El material pasante fue alimentado a un molino de bolas con un diámetro de 12" y una potencia de 172 HP, siendo clasificado a la salida del molino como se indica en la tabla 1.

Tabla 1. *Clasificación por tamaños del material a la salida del molino de bolas.*

Clasificación	Tamaño [μm]
Grueso	> 210
Arena vítrea	210 a 88
Finos	<88

La arena vítrea usada como arena de contacto en los moldes para fundición de aluminio, tiene un tamaño entre el pasante malla Tyler 70 (210 μm) y retenido malla Tyler 170 (88 μm) (Attridge & Werling, 2012)

El material grueso se recircula al proceso de molienda, mientras que el material fino no puede emplearse para este trabajo, ya que la permeabilidad de los moldes disminuirá como lo menciona (Zalensas, 1997). No obstante, un material con estas características se podría emplear para fabricar morteros para construcción civil. (Zubaid, Muttar, & Aynoor, 2017)

Para la molienda de 200 g de vidrio triturado se empleó un tiempo de 10 minutos y 12 bolas de acero como cuerpos moledores. Este tiempo fue previamente definido mediante la experimentación con el molino disponible en el laboratorio, moliendo una masa constante de material, utilizando 3 tiempos de molienda: 5, 10 y 15 minutos (ver Apéndice B). Los porcentajes de recuperación de arena de vidrio, además de los porcentajes de producción de material grueso y fino se muestran en el Apéndice B. El diagrama de flujo del proceso de fabricación de arena vítrea se presenta a continuación:

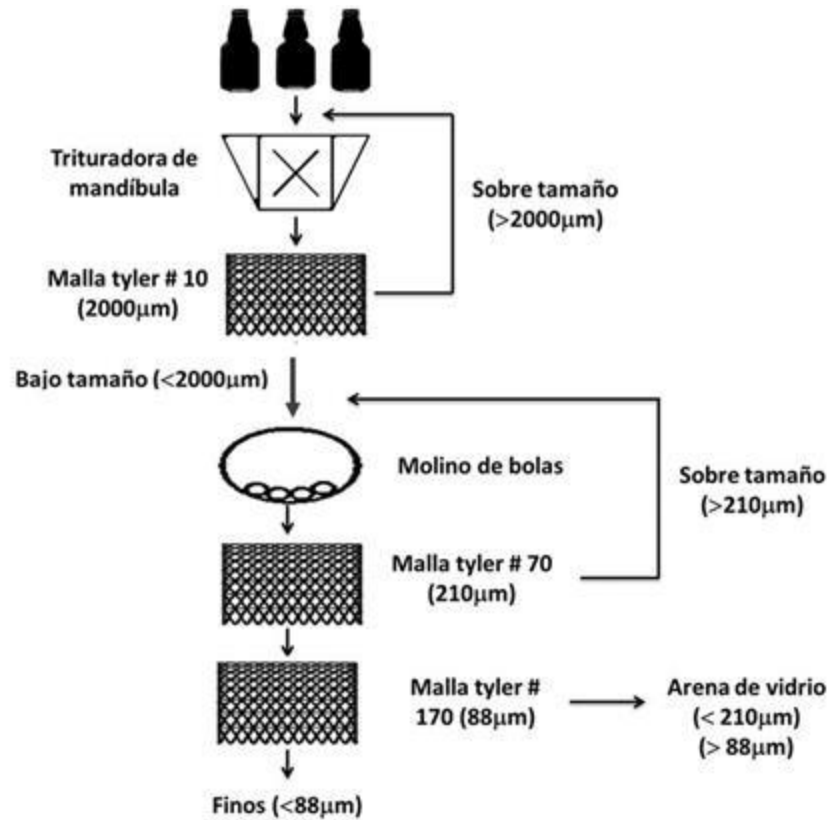


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de reducción de tamaños y clasificación de la arena vítrea.

3.3 Cálculo del consumo energético para la molienda de vidrio soda-lime

La molienda en seco de la arena sintética de vidrio se realizó en un molino de bolas cilíndrico de 12" de diámetro y 12" de longitud marca EDEMET. El diámetro y el número de bolas de acero utilizadas como cuerpos molidores se presentan en el Apéndice F.

$$W_i = \frac{44,5}{P_i^{0,23} * GBP^{0,82} \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \left[\frac{\text{Kwh}}{\text{Ton} - \text{c}} \right] \quad (1)$$

$$E_{ee} = W = W_i * 10 * \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad (2)$$

El índice de molienda de la arena sintética de vidrio se calculó siguiendo la teoría de Fred Bond para molinos de bolas (Menendez, 2017). Siendo W_i el índice de trabajo del material dado en Kwh/Ton-c; P_{100} es la abertura en micras de la malla de corte (se usó malla Tyler #100 cuya abertura es de $150 \mu\text{m}$); G_{bp} que es el índice de molturabilidad dado en gramos por revolución; F_{80} que es el tamaño en Micrómetros del 80% del material pasante en la alimentación fresca al molino; P_{80} corresponde al tamaño en Micrómetros del 80% del material pasante en los finos producidos por el molino. Ver cálculo tipo en el Apéndice F.

La energía consumida en el proceso se calculó a partir del valor del índice de trabajo como se muestra en la ecuación 2 (Santamaría, 2018). Como P_{80} se tomó el tamaño de malla por el cual pasa el 80% de la arena de vidrio producida por molienda en la etapa de reducción de tamaño de las botellas de tipo soda-lime.

3.4 Preparación y caracterización de las mezclas de moldeo de arena natural y vítrea

3.4.1 Preparación de la mezcla patrón a partir de arena natural. El porcentaje de bentonita y de humedad adecuado para la elaboración de las mezclas de arena de moldeo, fue hallado mediante la preparación de varias arenas de calibración basadas en arena sílice convencional de origen comercial*(El proveedor afirma vender arena de río muy fina), aglomeradas con bentonita sódica y agua. Se estudiaron las propiedades de resistencia a la compresión, compactibilidad y permeabilidad en verde de las mezclas, manteniendo constante el contenido de arcilla a medida que se incrementaba la humedad en una unidad desde 1,5% hasta 5,5% (en peso) (Zalensas, 1997). Este procedimiento se repitió para 4 contenidos de arcilla, a saber: 4, 6, 8 y 10%.

3.4.2 Preparación de las mezclas de moldeo a partir de arena natural y vítrea. Basado en los resultados de la arena de calibración; se prepararon las mezclas de arena natural y arena vítrea utilizando 10% de bentonita sódica y un 4,5 % humedad, con un tiempo de mezclado de 4 minutos.

Se prepararon 5 mezclas de arenas para moldeo en verde, variando el contenido de vidrio como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. *Mezclas de arena de moldeo en verde preparadas a partir de arena sílice y vítrea.*

Mezcla	% Arena sílice	% Arena de vidrio
A	0	100
B	25	75
C	50	50
D	75	25
E	100	0

3.4.2.1 Contenido de arcilla. El contenido de arcilla natural presente en la arena sílice comercial suministrada por el proveedor, se determinó mediante la diferencia en peso de una muestra seca de arena de aproximadamente 50 g, respecto del peso de la misma arena luego de ser sometida a proceso de lavado y secado siguiendo lo estipulado en el procedimiento AFS 2110-04-S. Método para la determinación del contenido de arcilla.

3.4.2.2 Distribución de tamaño de grano y Número de finura de grano AFS GFN. Una muestra seca de cada material se tamizó durante 15 minutos a través del juego de 12 tamices AFS. Luego de esto, se pesó el contenido de cada tamiz siendo reportada esta información en un diagrama de barras. El índice de finura de la arena natural y vítrea se realizó siguiendo el procedimiento AFS 1105-00-s (AFS, 2004). Análisis granulométrico (determinación del tamaño de partícula de la arena) y el procedimiento AFS 1106-00-S. Cálculo del número de finura de grano, AFS.

3.4.2.3 Determinación del factor de circularidad de los granos de arena natural y vítrea. Se montó en resina fría una muestra de arena natural y una muestra de arena vítrea. Estas probetas de resina fueron lijadas y pulidas según la norma *ASTM E3. Guía Estándar para la Preparación de Muestras Metalográficas*, para ver la morfología de los granos de ambos materiales a 50, 100 y 200 aumentos usando un microscopio marca Olympus.

Usando el software de análisis de imagen “Digimizer”, se determinó el área superficial, el perímetro de 100 granos para cada material. Calculando el factor de circularidad de las muestras de arena natural y vítrea siguiendo la ecuación 3. (Herrera, Hernandez, Peregrina, Manriquez, & Terralobos, 2013)

$$\text{Factor de circularidad} = \left(\frac{4 * \pi * \text{área}}{\text{perímetro}^2} \right) \quad (3)$$

3.4.2.4 Determinación de la densidad de la arena natural y vítrea. La densidad de la arena vítrea y la arena natural comercial fue hallada mediante principio de Arquímedes (ecuación 4), siguiendo lo estipulado en la norma *ASTM C 128 -04a. Método de Ensayo Normalizado para Determinar la Densidad, la Densidad Relativa (Gravedad Específica), y la Absorción de Agregados Finos*. En una balanza se pesó el picnómetro vacío de $10 \pm 0,1$ ml, y el mismo picnómetro lleno con agua destilada, posteriormente, se agregó al picnómetro 2 gramos de material, desplazando cierta cantidad de agua, registrando este nuevo valor de peso. Para ver las ecuaciones completas junto con el cálculo tipo, dirigirse al Apéndice A.

$$\rho = \frac{M}{V_{\text{sólido}}} \quad (4)$$

ρ = Densidad del material sólido M = Masa del material sólido $V_{\text{sólido}}$ = Volumen del material sólido

3.5 Fabricación de moldes en verde y fundición de la aleación de aluminio

Se construyó una placa modelo usando una lámina de aluminio como base y madera de cedro para los lingotes, ataques y canales de alimentación. En cada molde se pusieron dos tipos de mezclas, un tipo de mezcla en el ramal izquierdo de la placa y otro tipo en el ramal derecho, como se muestra en la figura 2, aprovechando la simetría de la placa modelo. Los tipos de mezcla se colocaron en las cajas de manera aleatoria utilizando una herramienta online de (Random.Org.).

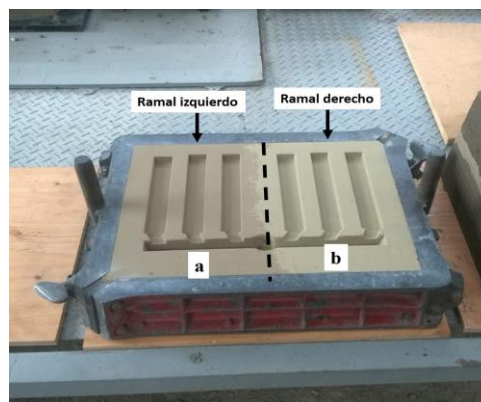


Figura 2. Molde en arena elaborado con dos tipos de mezclas, a) Ramal izquierdo; b) Ramal derecho.

Se fabricaron 5 moldes de arena en verde utilizando una caja metálica y una máquina apisonadora por golpes INDECO, con una presión de 50 PSI. Se marcó cada tipo de arena de contacto empleada en los moldes, usando buriles metálicos con números de 0 a 9. Como se muestra en la tabla 3. Los moldes se dejaron secar a temperatura ambiente durante 8 días.

Tabla 3. *Distribución de las distintas mezclas de arena de contacto preparadas a partir de arena natural y vítrea.*

Molde	Ramal izquierdo		Ramal derecho	
	Buril #	% de arena	Buril #	% de arena
A	1	100	2	25
B	3	100	4	0
C	5	25	6	50
D	7	75	8	50
E	9	0	0	75

Se fundió una aleación de aluminio (disponible en el laboratorio) a 750 °C en un horno tipo crisol. La altura de vaciado del metal a los moldes fue de 10 cm y el tiempo de llenado fue de 10 segundos. El desmoldeo se realizó a los 10 minutos de haber realizado la colada, dejando enfriar las piezas hasta temperatura ambiente, antes de realizar la limpieza de estas con cepillo y brocha.

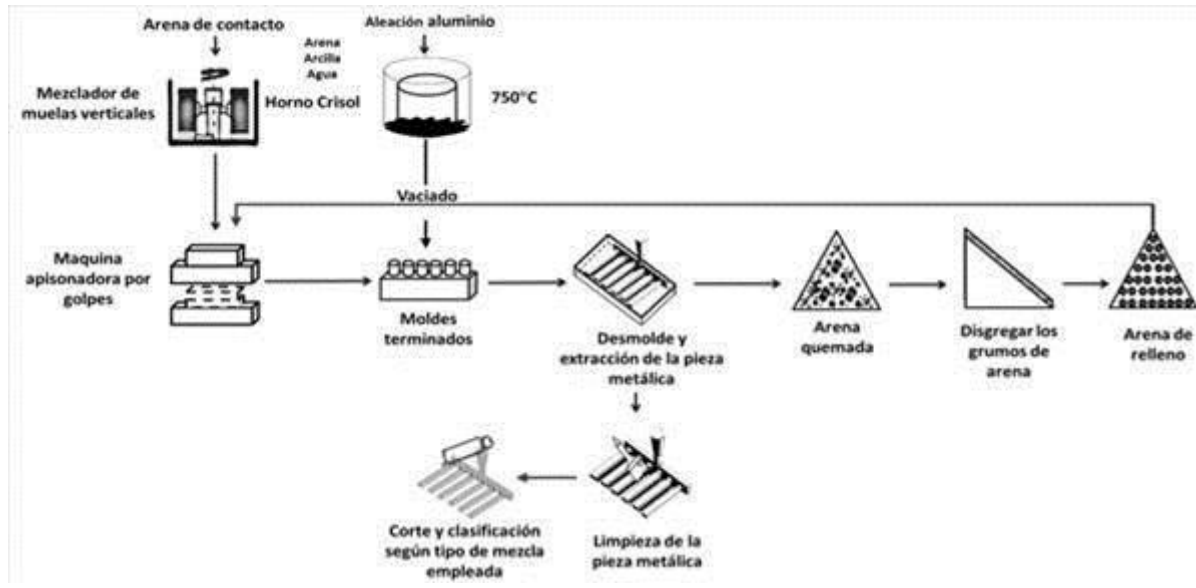


Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de moldeo en verde y fundición.

3.6 Medición de la rugosidad de las piezas de la aleación de aluminio fundidas en los moldes de arena natural y vítrea.

Una vez removido el canal de alimentación, los ataques y bebederos de las piezas fundidas, se tomó un lingote por cada numeración de mezcla, se cortó una probeta de 2 cm de largo por 2,6 cm de ancho, este corte se realizó a 4 cm de longitud respecto al extremo inferior. Utilizando un microscopio Hirox confocal, se analizó la rugosidad en 3 puntos en línea diagonal para cada probeta, obteniendo patrones de rugosidad de las superficies en dos y tres dimensiones. Para determinar los valores de las áreas de los patrones de rugosidad fue empleado el software Digimizer. La rugosidad promedio de cada superficie fundida, se determinó como muestra la ecuación 5.

$$R_a = \frac{\sum \text{Área}_{\text{superior}} + \sum \text{Área}_{\text{inferior}}}{I_n} \quad (5)$$

R_a = Rugosidad media $\sum \text{Área}_{\text{inferior}}$ = área de valles entre el perfil de rugosidad y

I_n

$\sum \text{Área}_{\text{superior}}$ = Área de crestas entre el perfil de rugosidad y I_n I_n = longitud del área
analizada

3.7 Análisis estadístico de los resultados

Los resultados de las propiedades de moldeo de las 5 mezclas realizadas, junto con el factor de circularidad de los granos de arena (tanto natural como vítrea) y el valor de la rugosidad media de las piezas metálicas, fueron analizados estadísticamente usando dos métodos: Dunnett y Tukey, mediante el programa Anova, esto con el fin de determinar, si hubo cambios estadísticamente significativos en los ensayos realizados al agregar arena vítrea a la mezcla de moldeo.

4. Resultados y discusión

4.1 Propiedades generales de las arenas de tipo natural y vítrea

Para utilizar una arena de moldeo en fundición, se hace necesario caracterizar las propiedades físicas de la arena como se muestra en 1la tabla 4. Realizando estos análisis, se verificó que las materias primas cumplen con las exigencias de la AFS, para el proceso de moldeo en verde para la fabricación de piezas de aluminio.

Tabla 4. *Propiedades físicas de la arena natural y vítrea implementadas en las mezclas de moldeo.*

Propiedad física	Arena natural	Arena vítrea
Densidad (g/cm ³)	2,43	2,417
Arcilla AFS	0,93	0
Factor circularidad	0,64	0,57
GFN AFS	95,81	87,54

En las micrografías de los granos de la arena natural y vítrea, obtenidas mediante SEM (ver figura 4), se observan diferencias en la distribución de tamaño de los granos, siendo la arena natural la más homogénea, ya que su distribución granulométrica se concentra en tres tamices adyacentes de Mallas # 100, 140 y 170 (Apéndice D). A diferencia de lo anterior, la distribución de tamaño de los granos en la arena vítrea es más amplia, concentrándose en cuatro mallas adyacentes #70, 100, 140, 200 (Apéndice D).

El análisis químico elemental determinó al silicio y al oxígeno como los componentes mayoritarios de ambas arenas analizadas; sin embargo, se diferencian los resultados, por la presencia de elementos como Mg, Na, Ca y Al en la arena vítrea, siendo estos elementos típicos de la composición del vidrio soda-lime, materia prima de este producto.

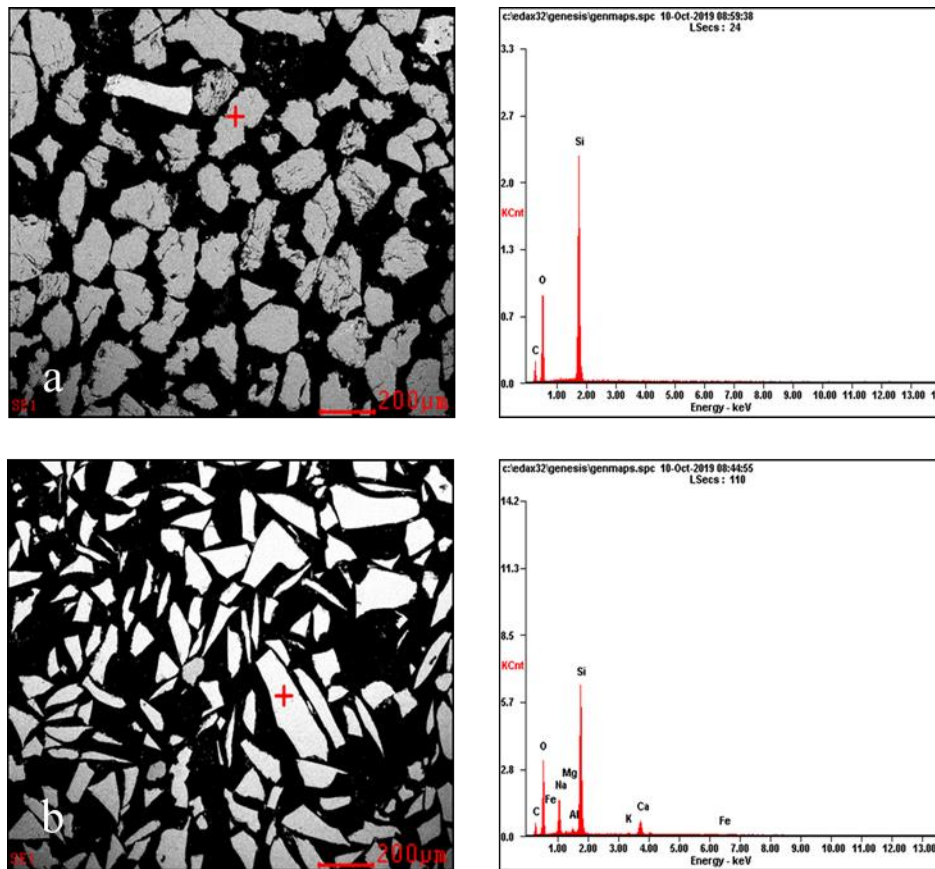


Figura 4. Micrografías de SEM con su respectivo análisis elemental obtenido por EDS. a) arena natural a 100x; b) arena vítrea 100x.

La comparación del factor de circularidad de ambas arenas se realizó en base al diagrama de cajas y bigotes mostrando en la figura 5, resultando en un mayor valor para la arena natural en comparación con la arena vítrea, siendo este resultado es consistente con el origen ribereño de la

arena natural utilizada en este proyecto, ya que los procesos de sedimentación y transporte tienden a redondear los bordes de grano de las partículas arrastradas (Quintero, 1998). Sin embargo, se observa una mayor dispersión en los datos de la gráfica del factor de circularidad de la arena vítrea (figura 5b). Por otra parte, al ser el vidrio un material amorfo, (Groover, 2007) no tiene un plano de falla preferencial, fragmentándose en granos de formas irregulares, como puede observarse en la figura 4b.

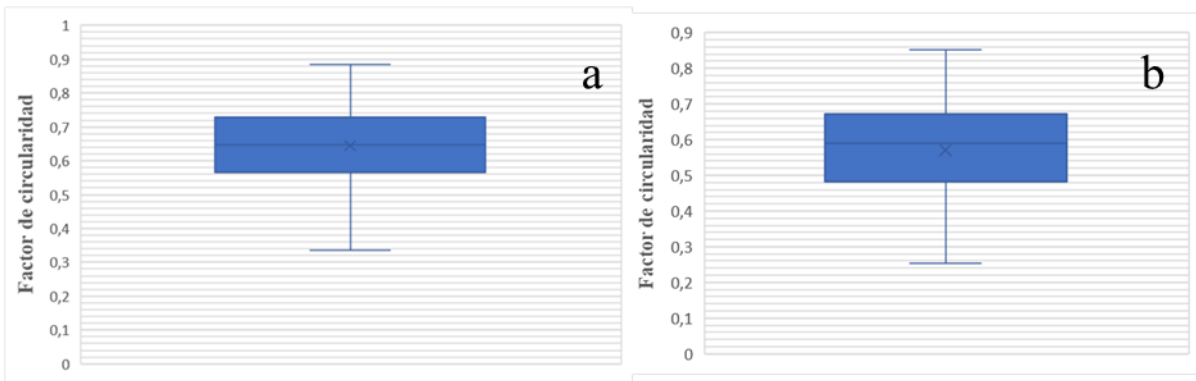


Figura 5. Diagrama de cajas y bigotes del factor de circularidad. a) arena natural; b) arena vítrea.

El índice de finura AFS, mostrado en la tabla 4, es inversamente proporcional al tamaño de los granos del material (Frink, 2004), en base a esto como la arena vítrea presenta el menor valor de esta propiedad, su tamaño de grano medio será más grueso que el de la arena natural. Esta variación, es consecuencia de una mayor cantidad de granos retenidos en las mallas # 50 y 70, en la distribución granulométrica de la arena vítrea, en comparación a la presentada por la arena natural, como puede observarse en el Apéndice D.

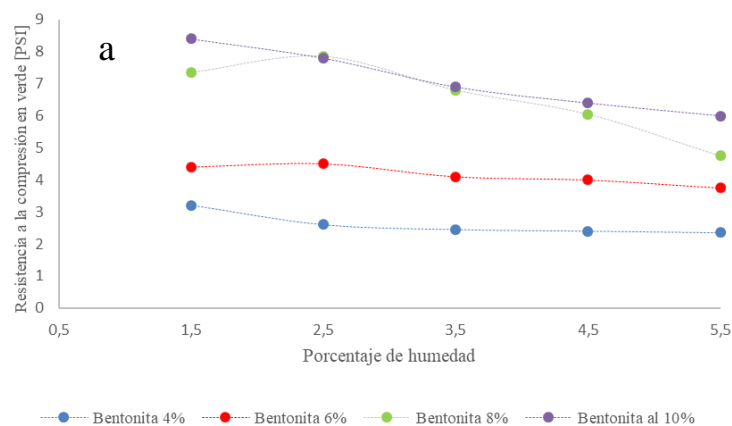
Por su valor de índice de finura AFS de 87,54, la arena vítrea se clasifica dentro del rango de arena “fina” (Zalensas, 1997), pudiendo usarse para fundiciones de aleaciones de aluminio y aleaciones base cobre.

El valor de la densidad de los dos tipos de arenas en estudio, vítrea y natural, reportado en la tabla 4, es muy similar, siendo menor la densidad de la arena vítrea, por aproximadamente 0,01 g/cm³. En consecuencia, un molde elaborado con arena vítrea tendría un peso similar al mismo molde fabricado a partir de arena natural.

4.2 Mezclas de moldeo

4.2.1 Pruebas de calibración de las mezclas de moldeo formuladas a partir de arena natural. Para determinar el contenido adecuado de bentonita y humedad en las mezclas, se estudiaron las propiedades de resistencia a la compresión, compactabilidad y permeabilidad, en mezclas de arena natural, variando el porcentaje de los componentes inicialmente mencionados.

A partir de los anteriores resultados, se elaboraron los diagramas a, b y c de la figura 6, mostrada a continuación, donde se observa el comportamiento de la resistencia, la compactabilidad y la permeabilidad de la arena natural en función del contenido de arcilla (bentonita) y agua adicionadas a la mezcla.



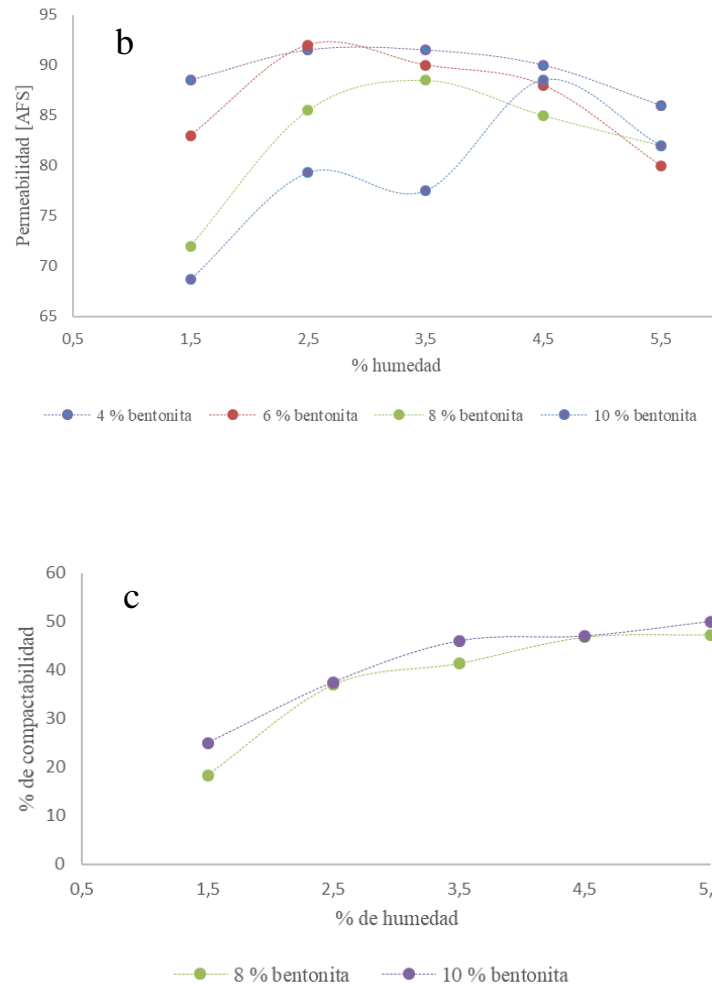


Figura 6. Propiedades de las mezclas de arena natural en función del contenido de arcilla y humedad. a) Resistencia a la compresión en verde (PSI); b) Permeabilidad AFS; c) % Compactabilidad

En la figura 6-a, se evidencia que el contenido de arcilla es directamente proporcional a la resistencia a la compresión en verde, presentándose los mayores valores de esta propiedad, para la arena natural con un contenido fijo de 10% bentonita, mientras se incrementaba el contenido de agua, explicándose este comportamiento, porque a un mayor contenido de arcilla se recubren más granos de arena, formando más puntos de contacto entre granos, dándole a la mezcla mayor

cohesión (Frink, 2004). Sin embargo, se deben seguir las recomendaciones de la AFS, ya que un exceso en la cantidad de arcilla, ocasionará problemas en el desmoldeo y limpieza de las piezas. (Frink, 2004)

Otra tendencia observada en la figura 6-a, corresponde a la disminución de la resistencia a la compresión en verde a medida que se incrementa el contenido de agua en la mezcla, esto debido a que los granos de arcilla se saturan con agua hasta cierto punto (punto de temple), después del cual el agua agregada, permanece en forma libre, debilitando el mecanismo de adherencia entre los granos. (Frink, 2004)

La permeabilidad AFS (figura 6-b), disminuye a medida que se incrementa el contenido de arcilla en la mezcla, lo anterior ocurre por la acumulación de arcilla en los espacios intersticiales del molde. Sin embargo, los valores de permeabilidad obtenidos para los distintos porcentajes de arcilla están por encima de los requerimientos de la AFS para el moldeo en verde para fundición de aluminio (Zalensas, 1997). Por otra parte, la permeabilidad en función del contenido de humedad aumento hasta un valor máximo, luego del cual empezó a decaer, explicándose esto, por el agua en exceso alojada en los poros del molde que dificultan la evacuación de los gases desde el interior del mismo. (Zalensas, 1997)

Por otra parte, la compactibilidad AFS (figura 6-c), realizada para los contenidos de arcilla con mejores resistencias a la compresión en verde (8 y 10%), exhiben los mejores valores, para el porcentaje de 10% bentonita, estando estos en el intervalo de 45 a 55 % recomendado por AFS (Frink, 2004). Por otra parte, también se observa un crecimiento proporcional de la compactibilidad en función del contenido de agua en la mezcla, explicándose esto por el desarrollo de plasticidad de las arcillas en la mezcla, gracias a un adecuado contenido de agua.

En general la mezcla de 10% de arcilla y 4,5 % de agua presentó un equilibrio de propiedades, (Resistencia en verde de 6,4 PSI; Permeabilidad de 88,5 y Compactabilidad 47%) con respecto a los demás porcentajes de composición en esta sección. De acuerdo con esto, se elaboraron las combinaciones de arena vítrea y arena natural, motivo de esta investigación.

4.3 Propiedades de las mezclas compuestas por arena natural y vítrea

La figura 7, muestra el diagrama de barras obtenido para cada una de las propiedades de las mezclas estudiadas, a saber resistencia en verde (7-a), permeabilidad(7-b) y compactabilidad (7-c), los valores de dichas propiedades, se analizaron estadísticamente con las pruebas de Dunnet y Tukey, (Apéndice K), encontrando que los valores obtenidos son estadísticamente diferentes respecto a la muestra de control,(arena natural), pero solo se evidencia una tendencia marcada, para la permeabilidad (figura 7-b), según la cual, disminuye a medida que se incrementa el contenido de arena vítrea en la mezcla. Este comportamiento se explica por la forma de los granos de la arena vítrea, cuyo factor de circularidad es menor en comparación con el obtenido para la arena natural, conociéndose (Frink, 2004), que entre más angular sea un grano, generara mayor resistencia al flujo de gas a través de los intersticios del molde.

En general, los valores promedio de resistencia, compactabilidad y permeabilidad de las mezclas, fueron adecuados para obtener moldes viables para la fundición de aluminio, como consta en la práctica.

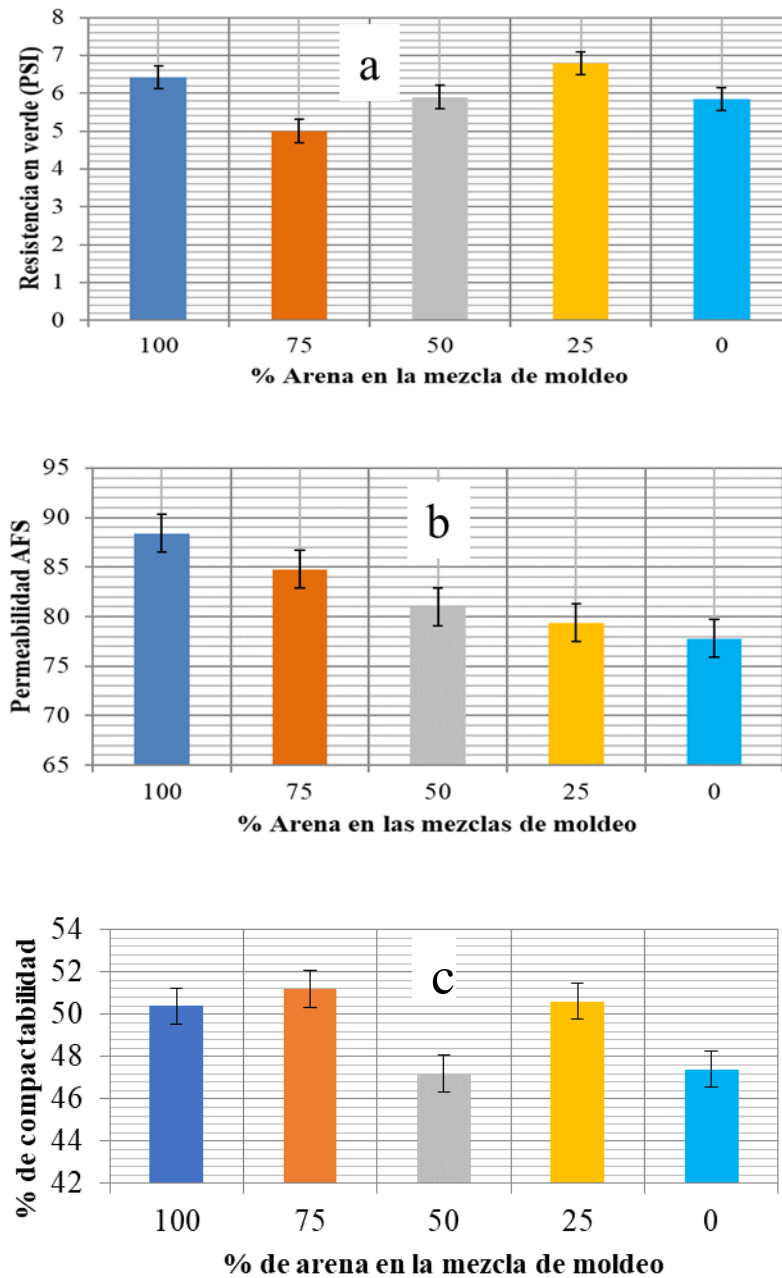


Figura 7. Propiedades exhibidas por las mezclas de arena de moldeo fabricadas con un 10% de bentonita y un contenido de humedad de 4,5%. a) Resistencia a la compresión en verde; b) Compactabilidad; c) Permeabilidad en verde. Las barras de error indican una desviación estándar por encima y por debajo del promedio.

4.4 Valores de Rugosidad en función del contenido de arena natural en la mezcla

Comparando los valores de rugosidad promedio de la figura 8, se observa para las mezclas de 25, 50, y 75 % de arena natural, una reducción inversamente proporcional al contenido de arena vítrea en la mezcla, lo anterior, debido a la heterogeneidad en la forma de los granos, presentándose la mayor rugosidad (58,3 μm) en la mezcla de moldeo de 25% arena natural (75% arena vítrea). Por otra parte, relacionando los resultados de rugosidad, para los moldes elaborados en único tipo de arena, se observa que la arena natural tiene un mejor acabado superficial que la arena vítrea, ocurriendo esto porque el índice de finura de la arena natural era mayor.

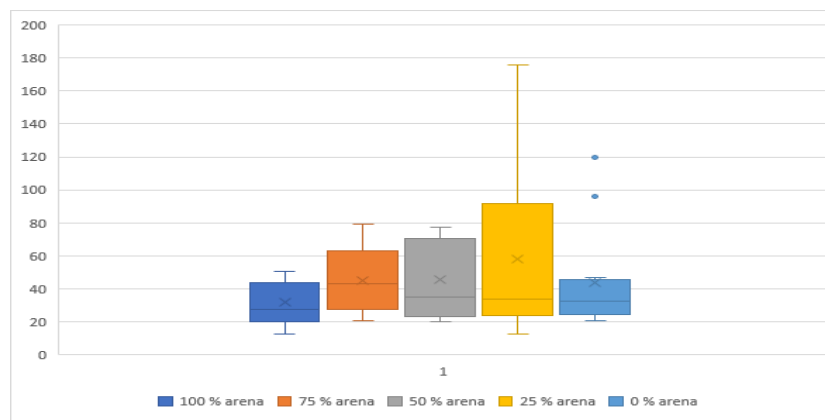


Figura 8. Diagrama de cajas y bigotes: Rugosidad de las piezas fundidas en función del contenido de arena natural en el molde en el cual fueron elaboradas.

La superficie de la pieza de aluminio obtenida en el molde de 0% arena, 100% vidrio mostró un valor de rugosidad de 43,8 μm , siendo este el segundo valor más bajo. El buen acabado superficial producido por esta mezcla se debe a la homogeneidad en la forma del grano.

Para la preparación de las mezclas de arena y vidrio a nivel industrial se recomienda la mezcla 50% arena, 50% vidrio ya que las piezas fundidas sobre el molde de esta arena exhiben una rugosidad promedio de 45,4 μm . Además, esta mezcla exhibe propiedades de resistencia (5,9 PSI), permeabilidad (81) y compactibilidad (47,2%) adecuadas para el proceso de moldeo de arena en verde para aluminio. (Zalensas, 1997)

5. Conclusiones

- Gracias al proceso de trituración, molienda y clasificación por tamaño, llevado a cabo en el presente trabajo se obtuvo un producto artificial, al que se denominó arena vítrea, el cual presentó las siguientes características: Factor de circularidad 0,57; Índice de finura AFS de 87,54; densidad de 2,417 g/cm^3 ; e índice de molienda de 12,94wh/Ton-c.
- Al implementar esta arena vítrea en las mezclas de moldeo para fundición de aluminio, la misma se comportó de forma similar a la arena natural, tanto en las etapas de mezclado y moldeo, como de vaciado del metal; Aunque mostró valores de permeabilidad 12 % más bajos que la arena natural.
- No se observa una correlación clara entre el contenido de arena vítrea, adicionado a la mezcla de moldeo, y las propiedades de resistencia a la compresión en verde y compactibilidad desarrolladas por esta.
- La homogeneidad en la forma del grano repercute en el valor de rugosidad superficial de las piezas coladas, por esto los mejores acabados superficiales se dan en las piezas fundidas en

los moldes de composición única. Sin embargo, las mezclas de arena natural-vítrea pueden ser utilizadas en la fabricación de moldes para fundición de aluminio, dado que las variaciones de rugosidad de las mezclas no son estadísticamente significativas entre sí. Además, sus propiedades de resistencia a la compresión en verde, permeabilidad y compactabilidad, cumplen con los valores estipulados por la American Foundry Society.

6. Recomendaciones

- Esta investigación se puede complementar con un estudio, donde se revise la conductividad térmica de las mezclas de moldeo, elaboradas a partir de arena natural y vítrea, para analizar su influencia sobre la microestructura durante la solidificación de las piezas metálicas.
- Para dar continuidad a la implementación de vidrio reciclado en la fundición de piezas de aleaciones de aluminio, se recomienda colar piezas de geometrías más complejas, utilizando como arena de contacto las mezclas de arenas natural y vítrea desarrolladas durante esta investigación.
- Revisar la viabilidad de fabricar moldes a partir de los materiales finos de tamaños inferiores a 88 μm , obtenidos como subproductos del proceso de trituración y molienda. Dando así, una aplicación metalúrgica a este material.

Referencias Bibliográficas

- Attridge, J. H. y Werling, J. H. (2012). EE.UU. *Patente No 8.122.936 B2. Antiveining agent for metal casting*. New York. USA.
- Bay, J; Yang, X; S,Xu; Jing, W; Yang; J. (2014). *Preparation of foam glass from waste glass and fly ash*. *Materials letters*. 136, 52-54.
<http://www.researchgate.net/publication/265016385>.
- Disfani, M; Arulrajah, A; Bo, W & Hankour, R. (2010). *Recycled crushed glass in road work applications*. *Waste Management*. Vol 31 issue 11. Pages 2341-2351.
- Duran, A; Montoya, J; Silva. P y Peralbo, R. (2014). *Validación de nuevos materiales cerámicos a partir de rocas de desecho de minería: Propiedades Mecánicas*. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. Vol 53,6, 279-288. <http://dx.doi.org/10.3989/cyv.3420>.
- Edge, B; Cruz, O; Orville, T. (2002). *Recycled glass for beach Nourishment*. *Coastal engineering 2002, proceedings of the 28th International conference*. 3630-3641. Doi: 10.1142/9789812791306_0303.
- Frink, K; (2004). *Principles of sand control*. American Foundry Society. Illinois. USA.
- González, G.; Menéndez, J.; Velásquez, J. (2016). *Eficiencia energética en la molienda de minerales de wolframio: funciones características del índice de trabajo*. Universidad de Oviedo; España.
- Groover, M. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. Tercera Edición. Mc Graw Hill. México. 218.

- Herrera, A.; Hernández, H.; Peregrina, H.; Manríquez, F. & Terralobos, I; (2013). *A new measure of circularity based on distribution of the radius*. Computación y sistemas. Vol 17, p 515-526. <http://redalyc.org/articulo.oa?id=61529295006>.
- Hinojosa, M. (2001). *La rugosidad de las superficies: Topometría*. Ingenierías. Vol 4 #11. <http://www.researchgate.net/publication/279751735>.
- Jamshidi, A y Igarashi, T. (2016). *Performance of pavements incorporating waste glass: The current state of the art*. Renewable and sustainable energy reviews. Vol 64.p 211-236. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.012>.
- Kalpakjian, S; Schmid, S. R. (2006). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. 5ta Edición. México. Pearson Education. 289-292.
- Menéndez, J. (2017). *Determinación de la molturabilidad para molinos de bolas mediante la metodología de Bond*. Universidad de Oviedo. España. 7,13-17.
- Narasimha, I y Babu, J. (2018); *Nondestructive evaluation of A 356 alloy casting made in sand and granulated blast furnace slag moulds*. Materials today proceedings. Vol 5. P 168-174.
- Pahlevani, H; Sahajwalla, V. (2018); *From waste glass to building materials an innovate sustainable solution for waste glass*. Journal of cleaner production. Vol 191.p 192-206.
- Quintero, O. (1998). *Principios de la tecnología de la fundición*. Universidad Simón Bolívar. Editorial Equinoccio. Venezuela. 34.
- Santamaría, Y. (2018). *Modelo geo metalúrgico de un depósito de metal polimetálico ubicado en el municipio de california Santander*. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Colombia. 35-40.
- Srinivasa, P y Kumar, A. (2017). *Effect of mechanical properties with addition of molasses and fly ash and green sand moulding*. Materials today: Proceedings. Vol 4. p 1186-1192.

Srinivasan, K; Siddharth, K; Arun, L; Thenarasu, M. (2018). *Evaluation of mechanical properties. Economic and Environmental Benefits of partially Replacing silica sand with biomass ash for aluminum casting.* Materials today: proceeding. Vol 5. p 12984 -12992.

Zalensas, L. (1997). *Aluminum Casting Technology.* 2da edición. AFS. USA.

Zubaid, B.; Muttar, K.; Aynoor, I. (2017). *Study the effect of recycled glass on the mechanical properties of green concrete.* Energy procedia. Vol 119. P 680-692.

Apéndices

Apéndice A. Propiedades físicas: Tabla de datos para la obtención de densidades para la arena natural y vítrea.

Densidad de la arena natural obtenida en el laboratorio

Prueba	M	M1	M2	M3	m H2O	m H2O desp	Vsolido	ρ
1	2,002	13,692	24,063	25,281	9,587	0,784	0,78647	2,546
3	2,001	13,756	24,019	25,277	9,52	0,743	0,74534	2,685
4	2,001	13,763	23,992	25,197	9,433	0,796	0,79851	2,506
5	2,003	13,726	23,977	25,159	9,43	0,821	0,82359	2,432
6	2,002	13,763	23,928	25,16	9,395	0,77	0,77243	2,592
7	2	13,74	23,955	25,073	9,333	0,882	0,88478	2,260
8	2,001	13,746	23,978	25,108	9,361	0,871	0,87374	2,290
9	2,001	13,711	24,013	25,191	9,479	0,823	0,82559	2,424
10	2,002	13,736	24,019	25,086	9,348	0,935	0,93795	2,134

Densidad de la arena natural

Promedio (g/cm³) 2,430

Varianza 0,031

Desviación 0,175

Densidad de la arena vítrea obtenida en el laboratorio

Prueba	M	M1	M2	M3	m H2O	m H2O desp	Vsólido	ρ
1	2	13,717	24,023	25,29	9,573	0,733	0,73530887	2,719945
2	2	13,71	24,028	25,2	9,49	0,828	0,83060811	2,407874
3	2,001	13,704	24,077	24,851	9,146	1,227	1,23086492	1,625686
4	2,002	13,721	23,955	25,248	9,525	0,709	0,71123327	2,814829
5	2,003	13,723	24,06	25,179	9,453	0,884	0,8867845	2,258722
6	2	13,72	24,048	25,307	9,587	0,741	0,74333407	2,69058
7	2,003	13,709	24,052	25,224	9,512	0,831	0,83361756	2,40278
8	2,003	13,716	24,026	25,218	9,499	0,811	0,81355456	2,462035
9	2,003	13,716	24,085	25,223	9,504	0,865	0,86772466	2,308336
10	2,002	13,713	24,017	25,214	9,499	0,805	0,80753566	2,479147
11	2,001	13,725	24,071	25,247	9,521	0,825	0,82759866	2,417839

Densidad de la arena vítrea	
Promedio (g/cm ³)	2,417
Varianza	0,099
Desviación	0,332

Cálculo tipo para el primer valor de la densidad de la arena sílice:

$$m_{H_2O} = M_3 - M - M_1 = 25,29 \text{ g} - 2\text{g} - 13,717\text{g} = 9,573 \text{ g}$$

$$m_{H_2O\text{desplazada}} = M_2 - M_1 - m_{H_2O} = 24,023 \text{ g} - 13,717\text{g} - 9,573\text{g} = 0,733\text{g}$$

$$V_{\text{sólido}} = \frac{m_{H_2O \text{ desplazada}}}{\rho_{\text{agua destilada a } 27^\circ \text{C}}} = \frac{0,733 \text{ g}}{0,99686 \text{ g/cm}^3} = 0,735 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{\text{sólido}} = \frac{M}{V_{\text{sólido}}} = \frac{2 \text{ g}}{0,735 \text{ cm}^3} = 2,72 \text{ g/cm}^3$$

Apéndice B. Resultados de la determinación del tiempo óptimo de molienda del vidrio reciclado.

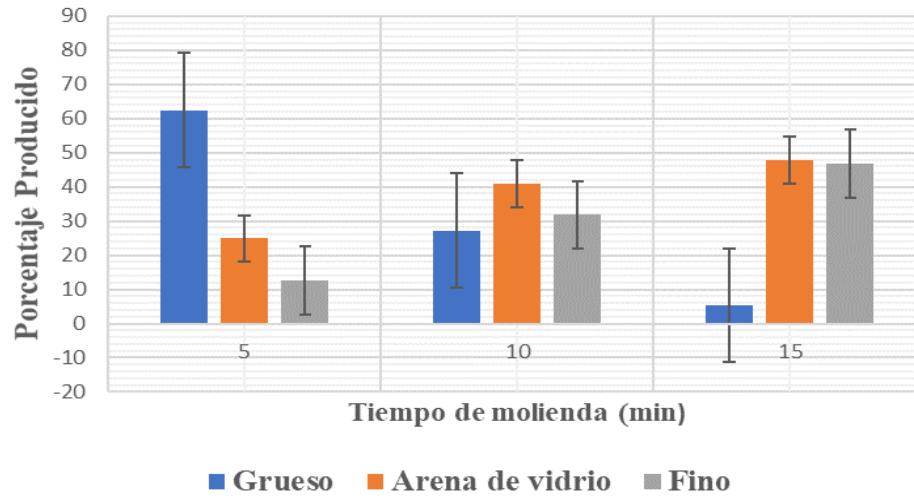
Tamaño del vidrio reciclado transcurridos 5, 10 y 15 minutos de molienda.

Malla Tyler	Tiempo de molienda (min)		
	5	10	15
< 70	124,87	54,54	10,75
< 170	49,74	81,82	95,69
> 170	25,2	63,62	93,55
Total	199,81	199,98	199,99

Porcentaje de producción de arena vítrea respecto al tiempo de molienda.

Tiempo de molienda (min)	Porcentaje de producción en peso		
	Grueso	Arena de vidrio	Fino
5	62,49	24,89	12,61
10	27,27	40,91	31,81
15	5,38	47,85	46,78

Porcentaje de producción de la arena vítrea respecto al tiempo de molienda.



Apéndice C. Porcentaje de Arcilla AFS en la arena natural.

Resultados de la determinación del contenido de arcilla procedimiento AFS 2110-04-s.

Prueba	Arena seca (g)	Arena lavada (g)	% Arcilla AFS	% Arcilla AFS	
1	50,04	49,56	0,96		
2	50,04	49,5	1,08	Promedio	0,930
3	50,04	49,53	1,02	Varianza	0,020
4	51,03	50,6	0,84	Desviación	0,130
5	50,99	50,6	0,76		

Cálculo tipo para el primer valor del porcentaje de contenido de arcilla AFS.

$$\% \text{ de arcilla AFS} = \frac{\text{Warena seca} - \text{Warena lavada}}{\text{Warena seca}} * 100$$

$$\% \text{ de arcilla AFS} = \frac{50,04 \text{ g} - 49,59 \text{ g}}{50,04 \text{ g}}$$

$$\% \text{ de arcilla AFS} = 0,96$$

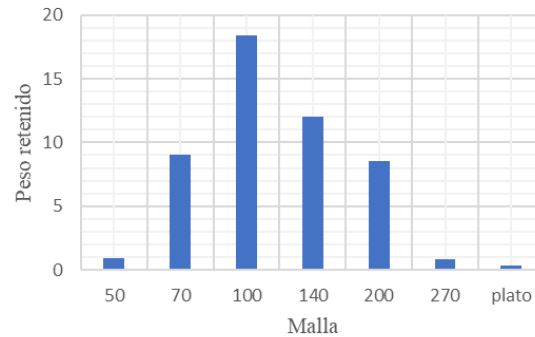
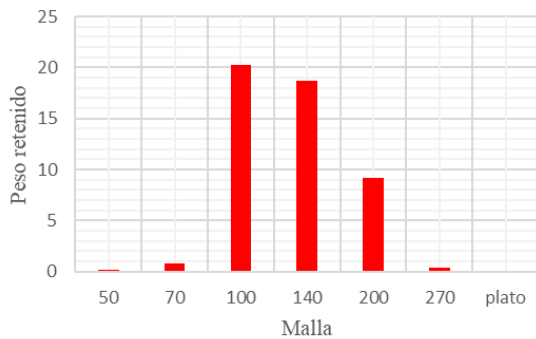
Apéndice D. Distribución granulométrica e índice de finura de la arena natural y vítrea.*Distribución granulométrica e índice de finura de la arena natural.*

Malla	K	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido*k
6	3	0	0,000	0,000
12	5	0	0,000	0,000
20	10	0	0,000	0,000
30	20	0	0,000	0,000
40	30	0	0,000	0,000
50	40	0,2	0,402	16,097
70	50	0,8	1,610	80,483
100	70	20,3	40,845	2859,155
140	100	18,7	37,626	3762,575
200	140	9,2	18,511	2591,549
270	200	0,4	0,805	160,966
Plato	300	0,1	0,201	60,362
Sumatoria		49,7	100,000	9531,187

Distribución granulométrica e índice de finura de la arena vítrea.

Malla	K	Peso retenido (g)	% Retenido	%Retenido*k
6	3	0	0,000	0,000
12	5	0	0,000	0,000
20	10	0	0,000	0,000
30	20	0	0,000	0,000
40	30	0	0,000	0,000
50	40	0,9	1,804	72,144
70	50	9	18,36	901,804
100	70	18,4	36,874	2581,162
140	100	12	24,048	2404,810
200	140	8,5	17,034	2384,770
270	200	0,8	1,603	320,641
Plato	300	0,3	0,601	180,361
Sumatoria		49,9	100,000	8845,691

Análisis Granulométrico: a). arena natural. b). arena vítrea.



Ejemplo del cálculo del índice de finura para el vidrio:

Suma producto = Porcentaje retenido*Factor multiplicador (K)

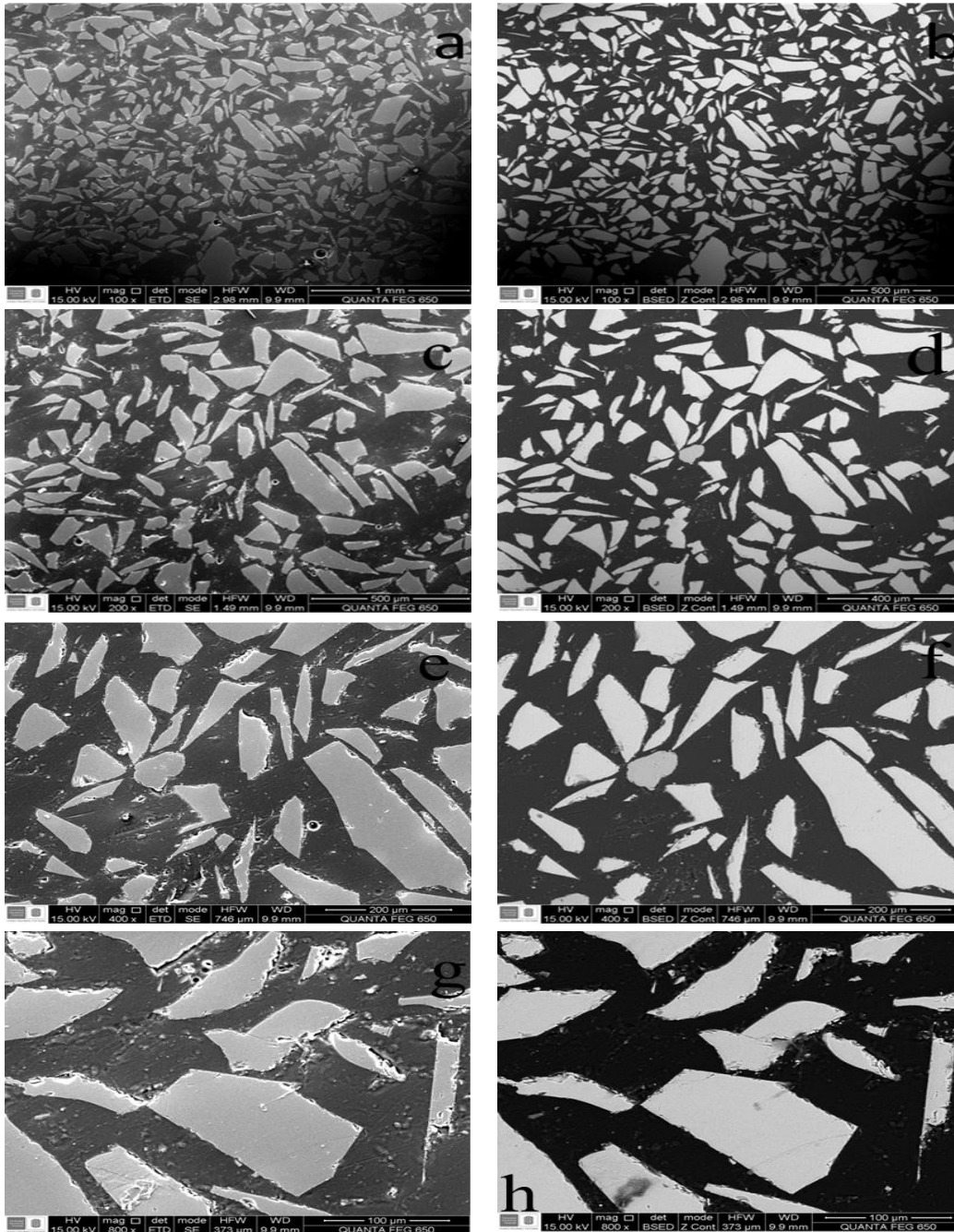
AFS GFN = Suma de producto/Suma % retenido

AFS GFN = 8845,691/100

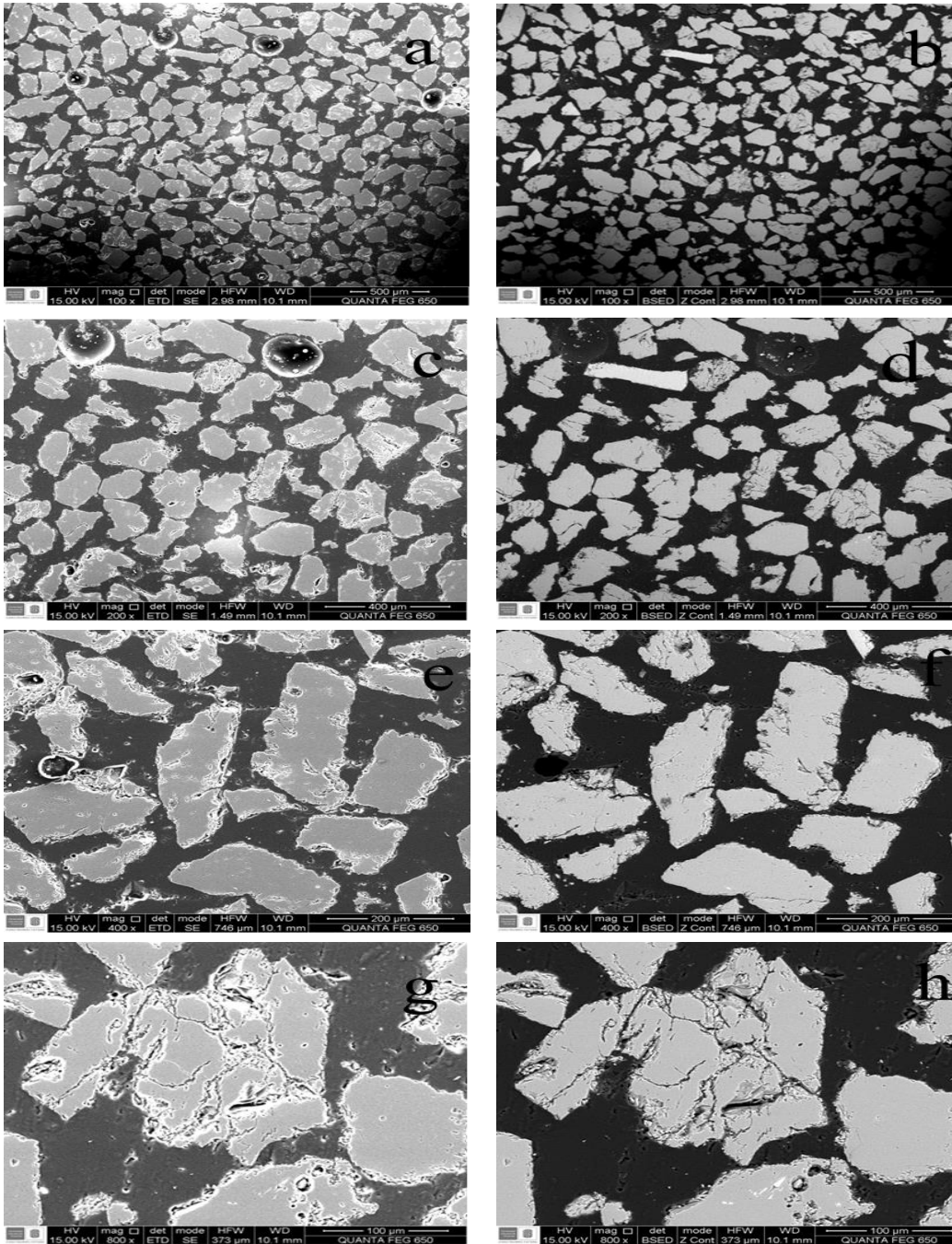
AFS GFN = 88,46

Apéndice E. Micrografías de la arena vítrea y natural captadas mediante SEM.

Micrografías de la arena vítrea captadas mediante SEM: a). 100x; b). 100x; c). 200x; d). 200x; e). 400x; f). 400x; g). 800x; h). 800x.



Micrografías de la arena natural captadas mediante SEM: a). 100x; b). 100x; c). 200x; d). 200x; e). 400x; f). 400x; g). 800x; h). 800x.



Apéndice F. Índice de trabajo y energía consumida en el proceso de reducción de tamaño del vidrio reciclado.

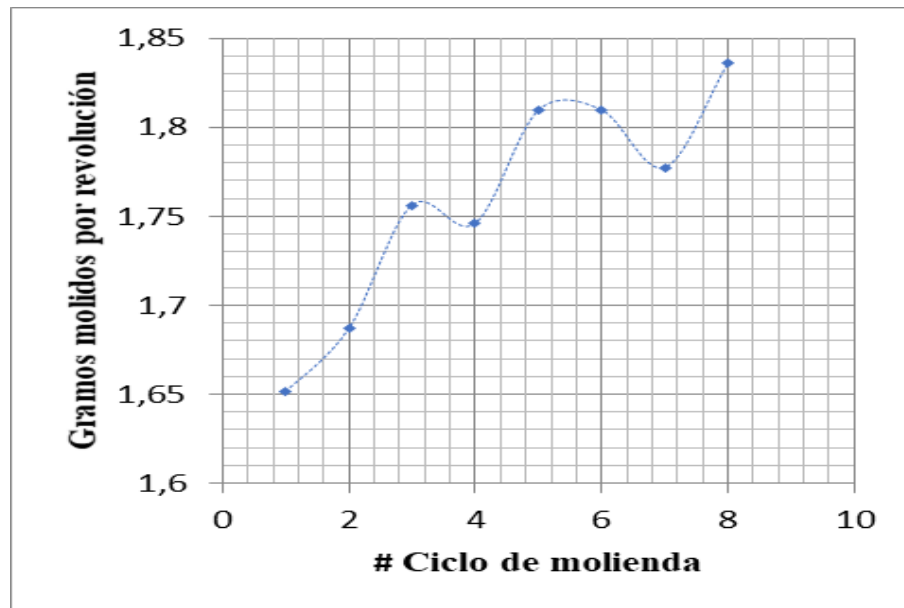
Diámetro y número de cuerpos molidores empleados en el cálculo del índice de trabajo.

Diámetro (in)	Número de bolas de acero
1½	25
1¼	39
1	60
7/8	68
¾	93

Valores para calcular la cantidad de gramos netos finos molidos.

Ciclo	Carga fresca (g)	Pasante malla 100 (g)	Vueltas	Pasante malla 100 (g)		% pasante malla corte	Gbp
				Finos producto	Finos netos		
1	1174,40	163,24	100,00	328,40	165,16	27,96	1,65
2	328,40	45,65	102	218,00	172,35	18,56	1,69
3	218,00	30,30	157	306,50	276,20	26,10	1,76
4	306,50	42,60	172	343,20	300,60	29,22	1,75
5	343,20	47,70	168	352,30	304,60	30,00	1,81
6	352,30	48,97	160	339,10	290,13	28,87	1,81
7	339,10	47,13	159	329,10	281,97	28,02	1,78
8	329,10	45,74	162	342,70	296,96	29,18	1,84

Gramos netos producidos en el proceso de molienda en función del número de ciclos



$$\text{Pasante de malla (g)} = \frac{\text{Carga fresca (g)} * \varphi_f(p_1)}{100} = \frac{328,4 \text{ (g)} * 13,9}{100} = 45,65$$

$$\text{Finos netos} = \text{Finos producto(g)} - \text{Pasante de malla (g)} = 328,4 \text{ g} - 163,24 \text{ g}$$

$$\text{Finos netos} = 165,16 \text{ g}$$

$$\% \text{ Pasante malla de corte} = \frac{\text{Finos producto(g)}}{\text{Carga fresca(g)}} * 100 = \frac{328,40 \text{ g}}{1174,40 \text{ g}} * 100 = 27,96$$

$$G_{bp} = \frac{\text{Finos Netos (g)}}{\text{Número de revoluciones}} = \frac{165,16 \text{ g}}{100} = 1,65 \text{ g/Rev}$$

$$R_2 = \frac{R_1 * (100/3,5)}{\% \text{ Pasante malla de corte}} = \frac{100 \text{ Rev} * (100/3,5)}{27,96} = 102,13 \text{ Rev}$$

$$G_{bp\text{Promedio } 3 \text{ últimos valores}} = \frac{1,81 + 1,78 + 1,84}{3} = 1,81 \text{ g/Rev}$$

$$\text{Indice de trabajo W. I.} = \frac{44,5}{p_1^{0,23} * G_{bp}^{0,82} * \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \text{ (KWh/Ton - c)}$$

$$\text{Indice de trabajo W.I.} = \frac{44,5}{150^{0,23} * 1,81^{0,82} * \left(\frac{10}{\sqrt{114}} - \frac{10}{\sqrt{1382,18}} \right)} \text{ (KWh/Ton - c)}$$

$$\text{Indice de trabajo W.I.} = 12,94 \text{ KWh/Ton - c}$$

$$\text{Indice de trabajo W.I.} = 12,94 \frac{\text{KWh}}{\text{Ton - c}} * \frac{1 \text{ Ton - c}}{0,907185 \text{ Ton}} = 14,26 \text{ Kwh/Ton}$$

$$E = 10 * W_I * \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \text{ (Kwh/Ton)} = 10 * 14,26 \text{ Kwh/Ton} * \left(\frac{1}{\sqrt{755,83}} - \frac{1}{\sqrt{1382,18}} \right)$$

$$E = 1,35 \text{ Kwh/Ton}$$

Apéndice G. Calculo factores de circularidad (Fc) para la arena natural y el vidrio vítrea.

Cálculo tipo para hallar el factor de circularidad para el primer dato de la arena de sílice:

$$F_c = \frac{4 * \pi * A}{P^2} = \frac{4 * \pi * 23138,0 \mu\text{m}^2}{(587,69 \mu\text{m})^2} = 0,84$$

F_c = Factor de circularidad

A = Área del grano de arena(μm)

P = Perímetro del grano (μm)

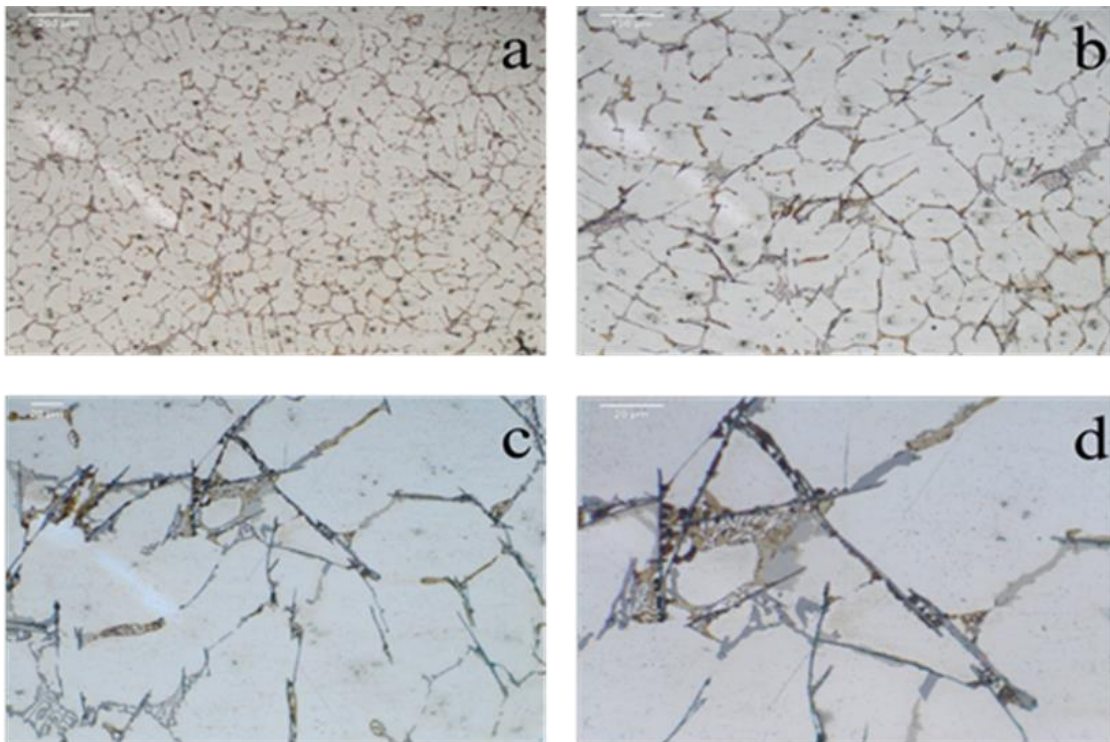
Apéndice H. Espectroscopia de emisión óptica por excitación por chispa de la aleación de aluminio colada en arena natural-vítrea a un 10% de bentonita.

Resultado de composición química elemental obtenida mediante emisión óptica por excitación por chispa de la aleación de aluminio fundida.

Elemento	Al	Cu	Si	Fe	Ni	Zn	otros
%	9,65	4,243	3,063	0,634	0,223	0,123	0,064

Apéndice I. Metalografías de la aleación de aluminio-cobre-silicio colada en arena natural-vítrea a un 10% de bentonita.

Metalografías de la aleación de aluminio-cobre-silicio colada en arena natural-vítrea a un 10% de bentonita. a).100 x; b).200 x, c).500 x y d).1000 x.



Apéndice J. Valores de rugosidad obtenidos para las mezclas de moldeo arena natural-vítrea.

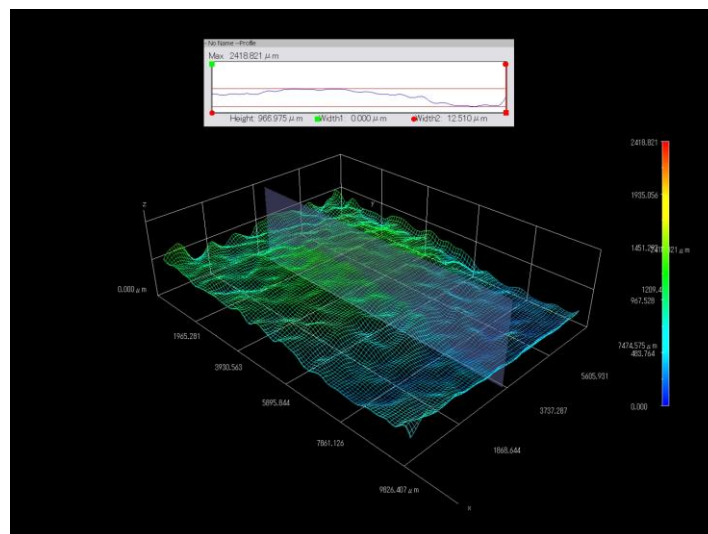
Valores de rugosidad media para las piezas de aleación de aluminio, fundidas en las diferentes formulaciones de arena de moldeo.

Valor	Valores de rugosidad media R_a (μm)				
	100 % arena	75 % arena	50 % arena	25 % arena	0 % arena
1	12,91	36,59	20,30	24,20	24,61
2	19,66	25,33	29,14	34,43	24,26
3	21,12	33,26	31,98	23,48	22,46
4	44,62	20,79	22,10	15,52	96,03
5	19,67	69,30	20,45	97,99	41,98
6	27,24	21,01	27,02	12,52	24,70
7	50,72	65,49	77,04	71,96	20,87
8	48,65	50,79	66,21	69,15	28,41
9	27,32	79,32	72,38	107,85	36,84
10	28,04	40,65	63,51	32,69	120,03
11	40,62	55,08	77,36	175,48	47,08
12	40,06	45,69	37,73	33,76	37,99
Promedio	31,72	45,27	45,44	58,25	43,77

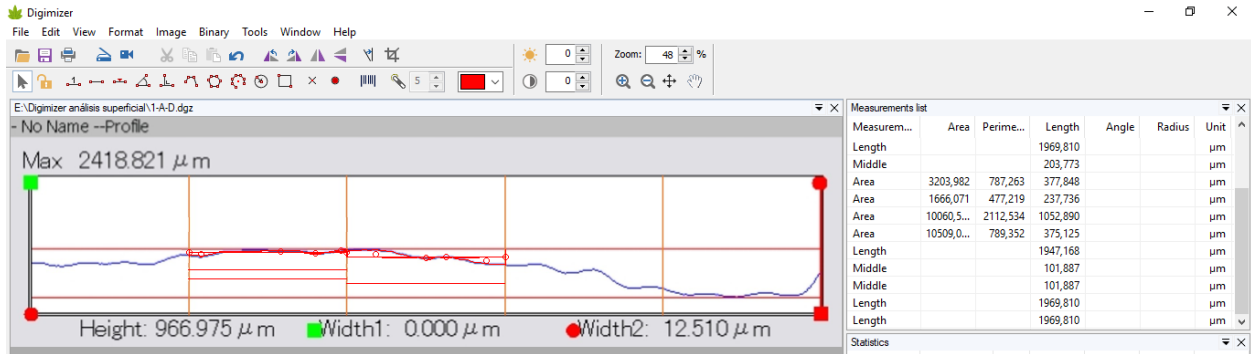
Calculo tipo para hallar el valor de R_a de la pieza de la aleación de aluminio colada:

Se recortó en PowerPoint el perfil de rugosidad bidimensional, obtenido por medio de la técnica de análisis de rugosidad, utilizando el microscopio HIROX confocal, como se muestra en la figura 15. Se dividió en cinco secciones de igual longitud, se guardó el archivo como imagen y

se lleva al programa analizador de imagen digimizer, ver figura 16. Se analizó, la segunda y tercera sección del perfil de rugosidad, dado que la pieza presenta ángulos de inclinación en los extremos, que pueden alterar el valor de rugosidad media. Este análisis se llevó a cabo en el programa tomando una escala patrón, posteriormente, se determinó la longitud de la sección (I_n) y se calcula el área entre I_n y la línea del perfil de rugosidad, siendo el área de las crestas $\Sigma \text{Área}_{\text{superior}}$ y el área de los valles $\Sigma \text{Área}_{\text{inferior}}$. A continuación, se presentará el cálculo para la segunda sección de la imagen, que corresponde al primer valor de Ra de la mezcla 100% arena. Perfil de rugosidad obtenido mediante el microscopio digital 3D Hirox HK-8700 con focal.



Cálculo de la rugosidad media (Ra) utilizando el programa digimazer.



Cálculo de las áreas superior e inferior de las secciones a analizar del perfil de rugosidad mediante el programa analizador de imagen digimazer.

$$R_a = \frac{\sum \text{Área}_{\text{superior}} + \sum \text{Área}_{\text{inferior}}}{I_n}$$

$$R_a = \frac{10060,50 + 3203,98 + 10509,01 + 1666,07}{1969,81}$$

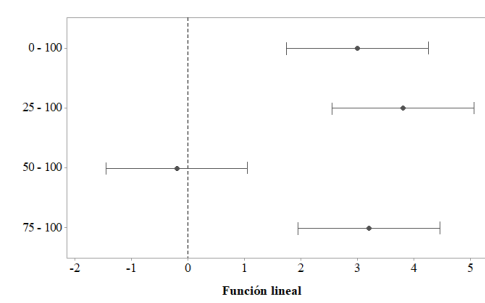
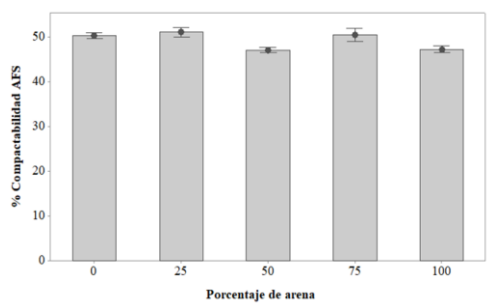
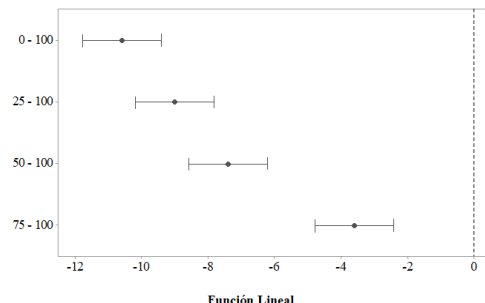
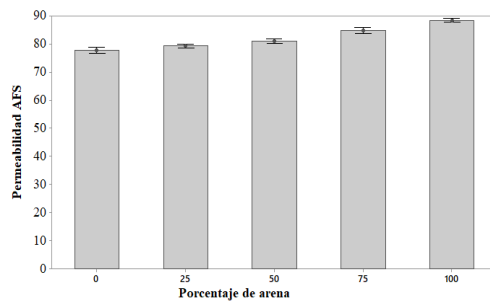
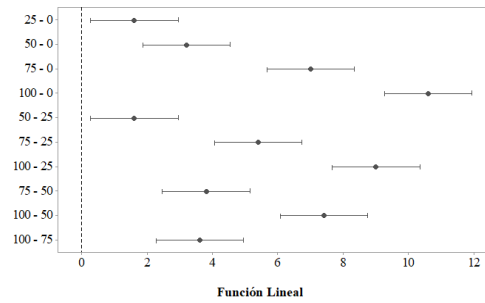
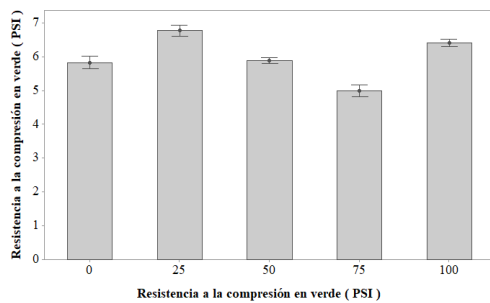
$$R_a = 12,91 \text{ (}\mu\text{m)}$$

Apéndice K. Análisis de significancia estadística para las diferentes mezclas de arenas de moldeo natural-vítrea

Análisis estadístico de Dunnet

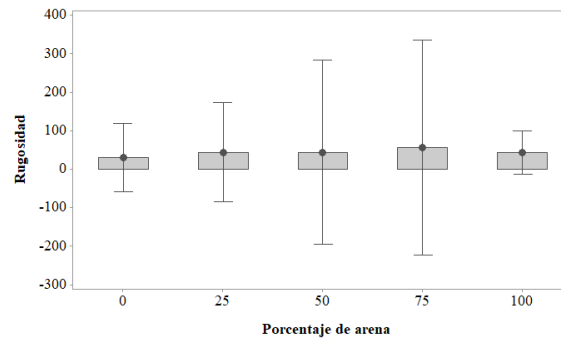
Propiedades de las arenas de moldeo

Análisis estadístico de dunnet aplicado a las propiedades de las mezclas de moldeo: a) Resistencia a la compresión; b) Permeabilidad; c) Compactabilidad.



Rugosidad

Análisis estadístico de Dunet aplicado a los valores de rugosidad de las piezas de la aleación de aluminio coladas en las diferentes mezclas arena natural-vítrea.



El análisis de varianza no identificó diferencias estadísticas significativas (p-value 0.801), sin embargo, este resultado no puede ser tomado como concluyente, ya que se observa gran dispersión de los datos.