

Reciclaje térmico para una arena de fundición

Nora Edith Ceron Arenas¹, José Hugo Gómez Zamarripa²

¹Centro de Capacitación en Ingeniería de Materiales Facultad de Ingeniería UASLP. Av. Dr. Manuel Nava 304, Zona Universitaria, 78210 San Luis Potosí, S.L.P.

²Centro de Capacitación en Ingeniería de Materiales Facultad de Ingeniería UASLP. Av. Av. Dr. Manuel Nava 304, Zona Universitaria, 78210 San Luis Potosí, S.L.P

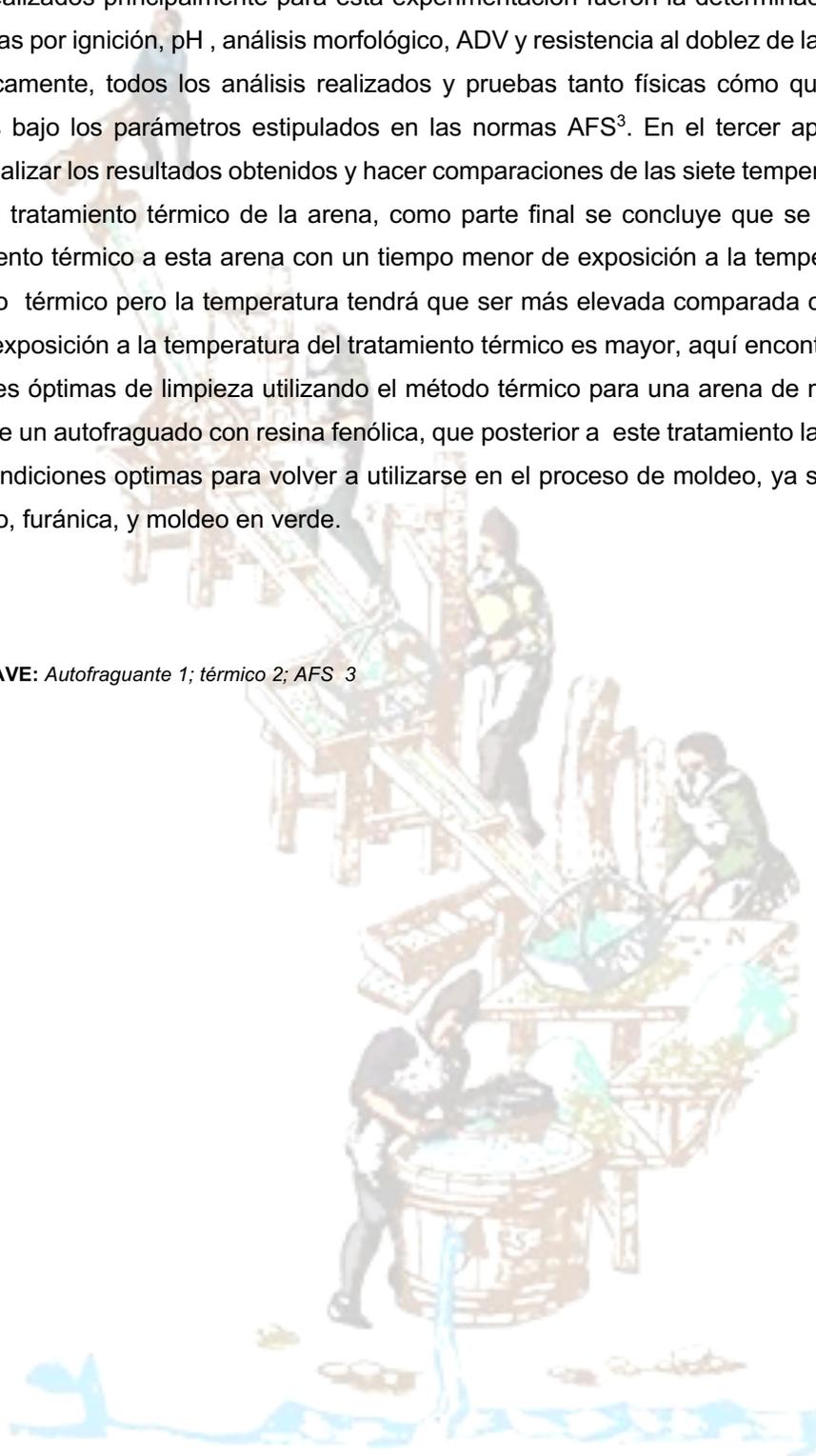
jhgomez745@gmail.com

RESUMEN

Este trabajo muestra cómo es posible realizar un reciclaje de arena sílice de moldeo una vez que ya ha sido utilizada en el proceso de moldeo autofraguante¹ con resinas fenólicas. Los procesos de limpieza para una arena sílice de moldeo reutilizada en los procesos de la manufactura de la fundición pueden ser de tres tipos, de forma muy general por el principio físico son el método térmico, el método mecánico y el método acuoso. El proceso de limpieza para reciclar la arena sílice que se utilizó en esta experimentación fue el método térmico². Como primera parte se incluyen los antecedentes que muestran las teorías básicas del reciclaje de arena sílica de moldeo en un proceso de fundición y sus fundamentos técnicos teóricos, este apartado se complementa incluyendo una justificación reflejada en la acumulación de finos y generación de costos por disposición de residuos, el planteamiento del problema nace cuando en un pequeño taller se han incrementado cantidades que resultan excesivas para almacenar y complicadas en el rehúso para moldear, por último en este apartado de antecedentes se incluye también la hipótesis y los objetivos tanto un objetivo general como objetivos particulares. Como segunda parte se presenta el desarrollo experimental el cual abarca desde una caracterización de la muestra, realizando una evaluación de calidad de la arena hasta la experimentación de limpieza y reciclaje de la arena sílice sometida a un tratamiento térmico nivel laboratorio, este tratamiento térmico se realizó

con siete temperaturas las cuales fueron 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C y 800°C, los análisis realizados principalmente para esta experimentación fueron la determinación de L.O.I o pérdidas por ignición, pH , análisis morfológico, ADV y resistencia al doblé de la arena tratada térmicamente, todos los análisis realizados y pruebas tanto físicas como químicas están regidas bajo los parámetros estipulados en las normas AFS³. En el tercer apartado podemos visualizar los resultados obtenidos y hacer comparaciones de las siete temperaturas diferentes del tratamiento térmico de la arena, como parte final se concluye que se puede hacer tratamiento térmico a esta arena con un tiempo menor de exposición a la temperatura de tratamiento térmico pero la temperatura tendrá que ser más elevada comparada cuando el tiempo de exposición a la temperatura del tratamiento térmico es mayor, aquí encontramos las condiciones óptimas de limpieza utilizando el método térmico para una arena de moldeo proveniente de un autofraguado con resina fenólica, que posterior a este tratamiento la arena queda con condiciones optimas para volver a utilizarse en el proceso de moldeo, ya sea por resina fenólica, furánica, y moldeo en verde.

PALABRAS CLAVE: *Autofraguante 1; térmico 2; AFS 3*



ANTECEDENTES

En la industria de la fundición se utilizan moldes permanentes, semipermanentes o no permanentes para el vaciado de piezas. En particular, los moldes no permanentes son los más utilizados en nuestro país debido a su bajo costo de producción. Este tipo de molde generalmente puede fabricarse en arena verde o arena autofraguante. Una vez que el molde es fabricado, este se utiliza para vaciar el metal líquido que al solidificar obtendrá la forma de la pieza. Cuando termina el proceso de solidificación, el molde de arena es destruido para desmoldar dicha pieza. Generalmente la arena autofraguante, que está recubierta de resinas fenólicas o furánicas, es desechada a tiraderos o depósitos para residuos industriales. Como lo es en Singapur que tradicionalmente utilizan la arena para rellenos en los proyectos de recuperación de tierras o arcillas que han sido excavadas y dejan minas con huecos que posteriormente tienen que ser rellenadas por arenas, quizás las cuales pueden ser de desechos principalmente de la industria fundidora (Subramanian et al., 2023)

Un informe por la ONU en marzo 2014, advierte que el recurso más utilizado aparte del agua, es la arena y grava, además de ser un recurso no renovable. El servicio geológico de estados unidos considera que, por cada tonelada de cemento, la industria de la construcción necesita entre seis y siete veces más de arena, y cada año se producen en el planeta más de 3.7 billones de toneladas de cemento. Ya que la arena es un material no renovable y que produce un importante impacto en los lugares donde se extrae, este estudio supone un paso importante para fomentar la producción y el uso comercial de la arena reciclada. Los estudios que se han realizado acerca del reciclaje de arena tienen sus inicios desde el año 1999, pero en el año 2015 Lucarz nos da un recordatorio con un estudio sobre que es el reciclaje térmico y hace una comparación de un análisis termogravimétrico con el estudio y cálculo del L.O.I (pérdidas por ignición) que se realiza a la arena que es tratada térmicamente a diferentes temperaturas para encontrar el óptimo parámetro para obtener una arena nueva con superficie de grano sin remanentes de resinas (Łuczarski, 2015)

Para el año 2018 ya se catalogaba a una fundición en gran desarrollo cuando implementaba regulaciones ambientales, y si no se seguían estas regulaciones que eran muy restrictivas las fundiciones no se consideraban competitivas, por lo tanto por estas fechas se focalizó la idea de implementar el reciclaje de los desechos de arena de moldeo en el país de Finlandia, donde se realizó reciclaje térmico para dos tipos de arena, para la arena verde el tratamiento por el método térmico los resultados obtenidos no fueron nada satisfactorios comparados con los obtenidos en el tratamiento para la arena con aglomerante fenólico alcalino no-bake (Sappinen et al., 2018)

En un estudio que se habla del reciclaje de arena por el método mecánico, hace una comparación con el método térmico, es entonces que la ventaja del uso del método térmico es que la arena tratada llega a obtener una calidad de arena nueva y que se puede utilizar para cualquier método de moldeo, este método de moldeo puede ser con resina alcalina, resina inorgánico (silicato de sodio), y hasta con bentonita, ya

que en el método mecánico aun quedan residuos de la resina que se utilizó en el moldeo anterior y entonces solo esta arena proveniente de un tratado mecánico solo se puede volver a moldear utilizando la misma resina que se utilizó con anterioridad.(Łucarz et al., 2023)

Recientemente un artículo sobre evaluación de las técnicas de recuperación de arena y de la calidad de la arena en recuperación térmica, expone varios métodos de tratamiento de limpieza de arena como el método de lavado húmedo, seco como el método de criogenización, térmico y exposición en microondas. El tratamiento térmico lo subdividen en etapas de proceso donde la arena se expone a un lecho fluidizado con un combustor y posteriormente a una cama fluidizada de enfriamiento, los resultados de este estudio se compararon con otros estudios de tratamiento térmico y por consiguiente los obtenidos en esta evaluación de calidad resultaron satisfactorios (Rayjadhav et al., 2020)

En el año 2022 en una revista de ingeniería industrial se redacta que la recuperación térmica y mecánica son las técnicas más destacadas del reciclaje de arena, en este artículo se desarrolla una evaluación de la sostenibilidad de la recuperación térmica y mecánica de la arena de cromita utilizada en la fundición, esta recuperación resulta ser muy beneficiosa en términos económicos ya que la arena de cromita tiene un elevado costo comparada con la arena sílice, pero al hacer la evaluación de la sostenibilidad ecológica para ambos procesos de recuperación el tratamiento mecánico es el que más produce daños al ambiente porque llega a producir más partículas finas que el tratamiento térmico (Nyembwe & Kabasele, 2022).

Recientemente en un estudio de reciclaje térmico para una arena, se explora evaluar la calidad de la arena después de el tratamiento térmico y las consideraciones fueron tanto propiedades físicas como químicas en las cuales se incluyen la determinación del tamaño de grano, las perdidas por ignición y principalmente el ADV (Shinde & Mhamane, 2022)

En la actualidad la industria de la fundición ha incluido las impresoras 3D, una herramienta muy versátil para la fabricación de moldes, además de que ayuda a reutilizar arena que se obtenga como desecho en la primera impresión, en la india se desarrolló un estudio con este tipo de fabricación de moldes que resulta ser elevado en costos en comparación con el tipo de moldeo que usan en las fundiciones de la India, pero utilizando un reciclaje térmico para los residuos de arena que se generan en las impresiones iniciales ayudaría a bajar los costos elevados de la impresión 3D, en próximos años este tipo de moldeo 3D llegará a ser muy utilizado (Upadhyay et al., 2024)

Planteamiento del problema

En el laboratorio de fundición perteneciente al Centro de Capacitación en Ingeniería de Materiales de la Facultad de Ingeniería UASLP, se realizan actividades de moldeo y fundición, se han fundido varias aleaciones como de aluminio, cobre, acero, hierro gris entre otras. debido a que se tiene un stock de chatarra de diferentes metales y aleaciones, el espacio de taller es pequeño y a través de los años se había incrementado el uso de moldes auto - fraguantes, esto generó el acumulamiento de arena, además de que

se tenía que comprar arena nueva y algunas veces la arena se confinó con una empresa en Monterrey, esto generaba un costo económico para el laboratorio.

La necesidad de realizar este trabajo se fundamenta en no tener residuos de arena que ocupen espacio y contaminen en un ambiente laboral, debido a que siempre hay presencia de alumnos trabajando en el laboratorio. Los depósitos donde se tenían los residuos de arena estaban muy desgastados que permitían que la arena se disgregará por el piso y siempre había arrastre de esta arena hacia todo el piso del taller, contaminando el ambiente con partículas polvosas en el aire.

Se considera que el reciclaje por el método térmico de arena autofraguante será compatible para un posterior moldeo en arena verde. Las propiedades físicas en una arena tratada se mejoran si las comparamos con las de una arena nueva, como es el tamaño de grano AFS, la rugosidad, permeabilidad, resistencia al dobléz. Las piezas obtenidas por fundición con arena de reciclaje tienen mejor acabado superficial. Por lo que el objetivo del estudio es recuperar arena de moldeo y que sea útil para un reciclaje, específicamente para moldeo con silicato de sodio y arena en verde. Para lo cual se plantea lo siguiente:

- Encontrar parámetros óptimos de temperatura para el tratamiento térmico
- Cuantificar la cantidad exacta de aglutinante para tener un rango de trabajo en las propiedades físicas como son la resistencia a la compresión, la resistencia al dobléz, permeabilidad, estabilidad, y todas las que apliquen para la evaluación de calidad de un molde.
- Cuantificar la cantidad de impurezas en la arena como material inorgánico (L.O.I)

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Descripción del seguimiento experimental

En este capítulo se muestra la metodología experimental para la realización de este trabajo. Todas las pruebas realizadas están basadas en procedimientos estandarizados por la American Foundry Society. El estudio comenzó a partir de una mezcla compleja de arena que ha sido rehusada por varios años en el laboratorio de fundición del CCIM. Esta arena es producto del proceso de fabricación de moldes mediante el sistema autofraguante, en mayor proporción con resina fenólica y en menor proporción con otros residuos de moldeo verde y Shell (mezcla compleja). En la Figura 1 se esquematiza las etapas llevadas a cabo para el desarrollo experimental de este trabajo.

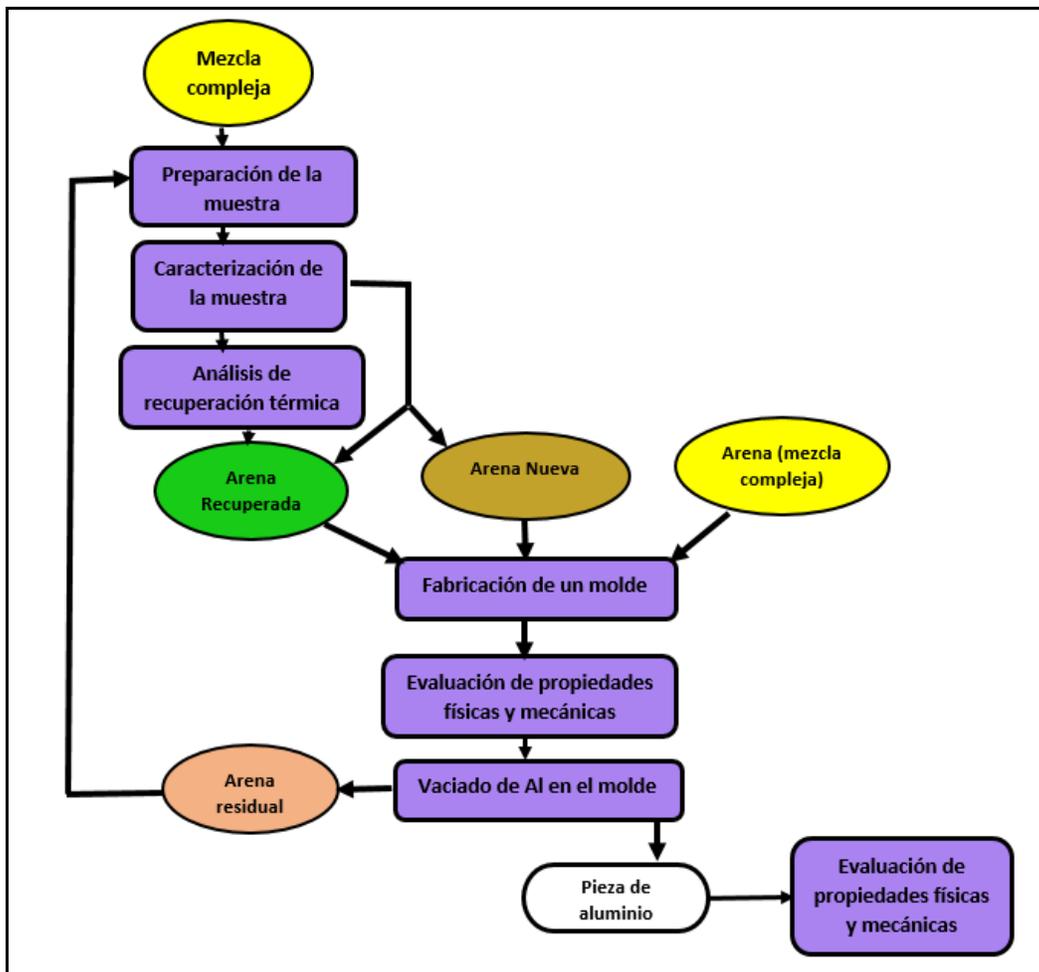


Figura 1 -Esquema del desarrollo experimental.

Preparación de la muestra

En esta etapa se preparó la mezcla compleja de arena para obtener una muestra representativa libre de humedad. Los pasos para obtener una muestra representativa se muestran en la Figura 2. Se utilizó un método de cuarteo en tres etapas para reducir la muestra de 300 kg a 1 kg.

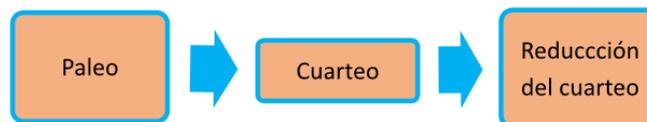


Figura 3.- Etapas para la preparación de una muestra representativa de la mezcla compleja de arena.

Caracterización de la muestra.

Los análisis realizados en esta etapa se llevaron a cabo siguiendo los procedimientos correspondientes que se establecen en las normas estandarizadas por la AFS. Los análisis realizados en el presente trabajo se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 Análisis realizados para la caracterización de la muestra compleja

ANÁLISIS	MEDICIÓN
L.O.I	Pérdidas por ignición
Morfología	Forma geométrica del grano de arena
AFS	Tamaño promedio del grano
ADV	Consumo de ácido
pH	Medida de acidez o basicidad

Para la determinación de L.O.I. se utilizó el equipo que se observa en la Figura 3. Este análisis consiste en someter la muestra a una temperatura de 900°C por un tiempo de 1 hora. La muestra sometida a este análisis es de 5 gramos. Transcurrido el tiempo de volatilización se pesa la muestra y el peso perdido en este proceso es representativo en % de peso perdido lo cual refleja el % de materia orgánica volátil.



Figura 3 Mufla para determinación de L.O.I y recuperación térmica.

El análisis morfológico se realizó en un microscopio, con dos lentes y luz reflejada, como se muestra en la Figura 4. La cantidad de la muestra utilizada para este análisis en el microscopio fue de 3g y se utilizó un aumento de 10X.



Figura 4 Microscopio óptico.

El análisis de distribución granulométrico se realizó mediante el efecto de vibración y golpeteo de acuerdo a la norma de la AFS, en la Figura 5 se observa el equipo utilizado para este análisis. La metodología de este análisis consiste en colocar una muestra de 50 gramos en la parte superior de las mallas para posteriormente sacudir las mallas por un lapso de 15 minutos. Una vez pasado el tiempo de sacudido se obtienen los granos que quedaron retenidos en cada malla, estos granos se pesan y se procede a la realización del reporte de distribución granulométrica. El peso en gramos se reporta en % de granos retenidos multiplicados cada uno por el factor correspondiente a la malla, al producto obtenido por cada malla se suman, esta suma es el número promedio del tamaño de arena (AFS) estos datos se reportan como se muestra en la Figura 6.



Figura 5.- Ro – tap utilizado para el análisis AFS.

Num. de malla	Gramos retenidos	% de granos retenidos	Factor	Producto
6			3	
12			5	
20			10	
30			20	
40			30	
50			40	
70			50	
100			70	
140			100	
200			140	
270			200	
PAN			300	
TOTAL			AFS	

Figura 6.- Reporte de un análisis granulométrico

El equipo utilizado para la determinación de ADV y pH se puede observar en la Figura 7. Para estas pruebas se realizó una calibración utilizando soluciones buffer, posteriormente se prepara una muestra de 5 gramos de arena con 10 mL de agua desionizada, se coloca el peachimetro dentro de esta muestra y se toma la lectura en solución acuosa.



Figura 7 medidor de pH

Recuperación térmica.

En esta etapa se calcinaron muestras de 5 gramos de arena (mezcla de arena compleja “MAC”) o arena residual a diferentes tiempos manteniendo constante la temperatura, y después se calcinaron muestras a un tiempo constante y temperatura constante. Para este análisis se utilizó el equipo de la Figura 3, una mufla que tiene un límite de temperatura de 1000°C. Esta recuperación térmica se realizó a nivel laboratorio, con una mufla donde el calor es por convección y no con un quemador de flama, que por lo general tienen contacto directo con la arena.

Construcción de un molde.

En esta etapa se fabricaron moldes con arena recuperada (AR), arena nueva (AN), arena de mezcla compleja (MAC) y arena recuperada en un segundo ciclo. Para la aglomeración de las arenas se utilizó 2% de resina fenólica y 1% catalizador base arena.

Evaluación de propiedades físicas y mecánicas del molde.

En la Tabla 2 se enlistan las pruebas físicas y mecánicas que se realizaron a los moldes fabricados. Para estas pruebas se realizaron probetas cilíndricas de 5cm de altura y 5cm de diámetro, excepto para la prueba de flexión, esta prueba se realizó fabricando barras rectangulares de arena con dimensiones de 16.5cm de largo y 2.5 cm de profundidad y ancho. Las probetas que son cilíndricas se compactan a las dimensiones ya dichas anteriormente.

Tabla 2 Análisis realizados a los moldes

PRUEBAS DE MOLDEO	
FÍSICAS	MECÁNICAS
Permeabilidad	Resistencia a la Flexión
Estabilidad	Resistencia a la compresión
Dureza	

Vaciado de aluminio.

Para comprobar la calidad de las diferentes muestras de arena para un proceso de moldeo, se fundió aluminio 6063 en un horno de gas a una temperatura de aproximadamente 700°C durante media hora (ver Figura 8). Después de este tiempo se eliminó la escoria y se vació el aluminio en los moldes fabricados.



Figura 8. Proceso de fundición de aluminio

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Preparación y caracterización de muestras de arena de una mezcla compleja y de arena nueva

La preparación de las diferentes muestras de arena compleja se realizó como se menciona con más detalle en la sección anterior, utilizando el método de cuarteo. Una vez obtenida una mezcla homogénea, se obtuvieron diferentes cantidades de muestra para las pruebas realizadas. El resultado obtenido en el cuarteo de la mezcla compleja fue una muestra libre de humedad, de la cual se tomaron cantidades de 5g, 50g y 3.700kg para las pruebas de humedad, análisis granulométrico y pruebas generales de propiedades físicas respectivamente como se muestra esquemáticamente en la Figura 9.



Figura 9.- Apariencia de la mezcla compleja reducida a cantidades exclusivas para análisis.

En la Tablas 3 y 4 se muestran los resultados de análisis granulométrico de la muestra de arena nueva (AN) y arena compleja (MAC) respectivamente, mientras que en la Figura 10 se presentan las gráficas de distribución para ambas muestras. En la Tabla 3 podemos observar que, para MAC, más del 10% de los tamaños se acumula en cuatro mallas consecutivas, entretanto que para la AN los tamaños de grano de la arena se mantienen en más del 10% en tres mallas consecutivas. Además, se observa que el tamaño AFS para la MAC es de 88 y para la AN es de 79. En la Figura 4.2 podemos observar que la distribución de los tamaños de partícula de las muestras para la MAC y AN presentan una distribución Gaussiana (forma de campana), es decir una distribución uniforme. Según las normas correspondiente de la AFS, no es adecuado para una arena utilizada en la fundición que más del 10% de tamaños se compilen en más de tres mallas, ya que una arena apta para un proceso de moldeo debe tener además de una distribución uniforme, una acumulación igual o mayor al 10% de granos de arena, pero solo tres mallas consecutivas.

Tabla 3 .- Datos de la distribución granulométrica para arena nueva (AN).

Tamaño Tamiz	Peso retenido gr	% distribución	Factor	Producto
6	0.00	0.00	3	0.00
12	0.10	0.56	5	2.82
20	0.40	2.26	10	22.60
30	0.60	3.39	20	67.80
40	1.60	9.04	30	271.19
50	3.00	16.95	40	677.97
70	4.20	23.73	50	1,186.44
100	3.60	20.34	70	1,423.73
140	2.10	11.86	100	1,186.44
200	1.10	6.21	140	870.06
270	0.50	2.82	200	564.97
PAN	0.50	2.82	300	847.46
TOTAL	17.70			7,121.47
		100	AFS =	71.21

Tabla 4.- Datos de la distribución granulométrica para mezcla de arena compleja (MAC)

Tamiz	Peso retenido gr	% distribución	factor	producto
6	0.00	0.00	3	0.00
12	0.00	0.00	5	0.00
20	0.11	0.64	10	6.40
30	0.30	1.74	20	34.88
40	1.62	9.42	30	282.56
50	3.67	21.34	40	853.49
70	4.52	26.28	50	1313.95
100	3.55	20.64	70	1444.77
140	1.98	11.51	100	1151.16
200	0.89	5.17	140	724.42
270	0.28	1.63	200	325.58
PAN	0.28	1.63	300	488.37
TOTAL	17.20			6625.58
		100	AFS =	66.26

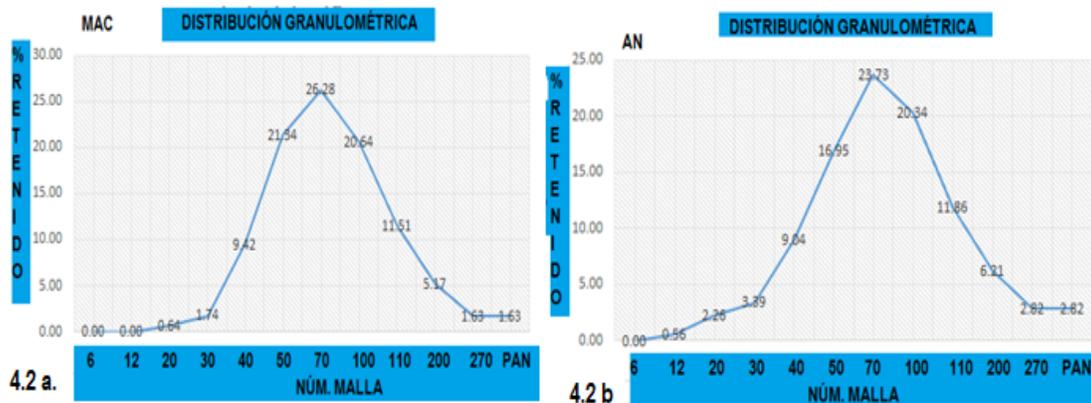


Figura 10.- Distribución en % retenido en cada malla para las muestras de arena. a) MAC, b) AN.

En la Tabla 4.3 se presentan los resultados de la determinación del LOI, pH y ADV para las muestras de MAC y AN.

Tabla 5.- Resultados de los tipos de análisis para la caracterización de las muestras de una mezcla de arena compleja y arena nueva.

Arena/ Pruebas	L.O.I %	PH	ADV mL
MAC	6.3	10.5	13.7
AN	0.2	7.0	0.0

Para todos los casos las muestras obtenidas después de la prueba de L.O.I. presentaron una coloración como la mostrada en la Figura 11. Es importante señalar que la homogeneización de la muestra es de vital importancia para la resistencia de los moldes. En la Figura 11 se puede observar que la coloración de la muestra de arena compleja varía de negro a naranja después de someterla a la prueba de L.O.I. Este color final de la muestra de arena después del L.O.I. es debido al origen mineralógico de la arena sílice y a la presencia de óxidos de Fe.



Figura 11.- Muestra de la mezcla de arena compleja antes y después de la prueba de L.O.I.

En los valores obtenidos de la medición del pH para ambas muestras (MAC y AN) se puede observar que la arena nueva tiene un valor neutro dado que el valor de medición de potencial de hidrogeno resultó ser de 7, mientras que para la MAC la medición resultó en un valor de 4.5. Este último valor, que por debajo del número neutro de la escala de potencial de hidrogeno, se considera dentro de un nivel ácido. Por lo general se recomienda llegar a un pH neutro, con lo cual es posible moldear con diferentes aglutinantes, ya sean alcalinos o ácidos. El ADV depende de la composición química de la arena y como se observa en la Tabla 5, el resultado de la ADV en la MAC es 13.7 mL, el cual comparado con la arena nueva cuyo valor es de 0, implica que esta arena compleja tiene una gran demanda ácida lo cual se verá reflejado en un alto índice de consumo de catalizador ácido. Un valor de 0 mL de ADV como el observado para la arena nueva, es de esperarse ya que en la AN el pH es de 7 y se ha demostrado que existe una relación entre ambas propiedades. Por otro lado, la MAC tiene una composición química muy variada en donde destaca la presencia de materia orgánica y por lo tanto es de esperarse un elevado valor para la ADV, por lo que no

es recomendable usar esta arena en estas condiciones ya que se requerirá usar un exceso de aglutinante. Si fuera necesario el uso de esta arena en dichas condiciones, la resina que se debería utilizar sería una resina fenólica y un catalizador de medio ácido.

La caracterización morfológica de las muestras (MAC y AN) utilizando un microscopio óptico se presenta en la Figura 12. Como podemos observar en la Figura 4.4a los granos de la arena nueva, que presentan coloraciones anaranjadas debido a la presencia de óxidos de Fe, son cristalinos y con morfología angular (ver figura 4.4c). En la Figura 4.4b podemos observar que los granos de la MAC tienen una forma de grano subangular y se encuentran recubiertos de varias capas remanentes de resina, por lo que es difícil visualizar con exactitud la zona redondeada y angulosa de los granos. Para tratar de visualizar dicha forma de una mejor manera, en la Figura 4.4d se remarcan algunos de estos bordes. El uso continuo de esta arena que genera una gran fricción entre partícula y partícula recubiertas de capas de resina remanente, han cambiado la morfología que los granos tenían originalmente, la cual era muy similar a las mostradas para la arena nueva.

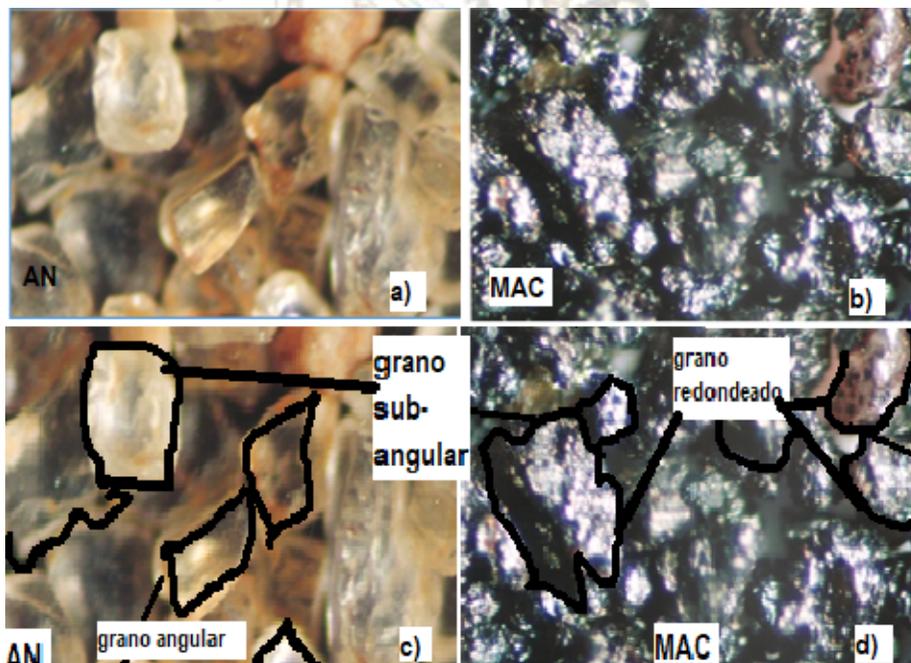


Figura 12.- Imagen que muestra la morfología de los granos para AN, y MAC.

Recuperación térmica.

Para la recuperación térmica se realizaron pruebas a diferentes temperaturas y tiempos; y una vez determinados los mejores parámetros de este proceso se realizaron pruebas para evaluar su eficiencia. Para la verificación de la calidad del proceso se realizaron nuevamente mediciones de LOI, pH y ADV y

actualmente se realizó una caracterización morfológica de las muestras utilizadas en dicho proceso. En esta sección se presentan y discuten los resultados de este proceso de recuperación y su evaluación y también se logra puntualizar los parámetros óptimos del tratamiento térmico de la arena. La Tabla 6 resumen los resultados obtenidos de la calcinación de la MAC a diferentes temperaturas y tiempos. Se puede observar que la cantidad de L.O.I decrece si aumentamos la temperatura y el tiempo de calcinación, lo cual es congruente con otros estudios previos

Tabla 6.- Resultados del proceso de recuperación térmica, valores de L.O.I, ADV y pH en función de la temperatura y del tiempo.

Tiempo min / Temp. °C	L.O.I %			pH			ADV mL		
	20	30	60	20	30	60	20	30	60
200	5.0	4.8	4.0	10.4	10.3	10.0	12.6	12.0	11.8
300	4.8	4.1	3.9	10.0	9.9	9.8	9.8	8.6	7.5
400	2.8	2.0	1.8	9.6	9.3	8.9	6.7	4.0	2.7
500	2.2	1.9	0.5	8.8	8.5	8.0	1.0	1.0	1.0
600	1.8	0.5	0.5	8.0	7.1	7.0	0.0	0.0	0.0
700	0.5	0.0	0.0	7.0	7.0	7.0	0.0	0.0	0.0
800	0.0	0.0	0.0	7.0	7.0	7.0	0.0	0.0	0.0

En la Tabla 6 se observan los diferentes valores de la ADV obtenidos para una mezcla de arena compleja calcinada a diferentes temperaturas y tiempos. Como era de esperarse para bajas temperaturas de calcinación y/o tiempos cortos, el valor de la ADV es alto (aproximadamente 12 ml), lográndose disminuir dicho valor con el incremento de la temperatura y/o el tiempo de calcinación. El valor de la ADV es un indicador de impurezas en la arena de moldeo y la presencia de estas promoverá un tiempo largo de curado y reducirá la resistencia del molde. Al igual que antes la combinación de una temperatura de 600°C y 30 min de calcinación o 500°C y 1 hora, resultan en valores para el ADV adecuados en el proceso de moldeo.

La apariencia superficial de los granos de la MAC sometida a diferentes temperaturas de calcinación por un tiempo de 30 min, que fue el que se estableció como el óptimo, se muestran en la secuencia de las fotografías de la Figura 13. En esta secuencia se observa el cambio de la apariencia superficial de los granos de arena en función de la temperatura de calcinación para valores de 200°C a 800°C junto con la fotografía correspondiente a la apariencia de los granos previos al proceso de calcinación para fines comparativos. Se observa en la Figura 4.5a que la MAC antes del proceso de calcinación tiene los granos completamente recubiertos de resina y también se puede observar que hay granos aglomerados por la resina remanente teniendo un color negro brillante. En la MAC calcinada a 200°C (ver Figura 4.5b) no parece haber un cambio en la apariencia de la superficie de los granos de arena ya que se observan con la misma coloración que en la MAC antes de calcinar. Para una temperatura de 300°C (ver figura 4.5c) se observa que algunos granos comienzan a limpiarse, lo cual concuerda con lo reportado previamente por diversos autores que señalan que la volatilización de resina fenólica comienza aproximadamente a 250°C. Si se

comparan las características de la MAC calcinada a 300°C con la MAC calcinada a 400°C como se presenta en la Figura 4.5d, se observa poca variación tanto en la apariencia superficial como en la morfología de los mismos, ya que para ambos tipos de granos se puede observar morfologías con superficies redondeadas. Esta característica se atribuye a que la resina recubre zonas huecas entre las posibles facetas de los granos, dando una apariencia totalmente redonda.

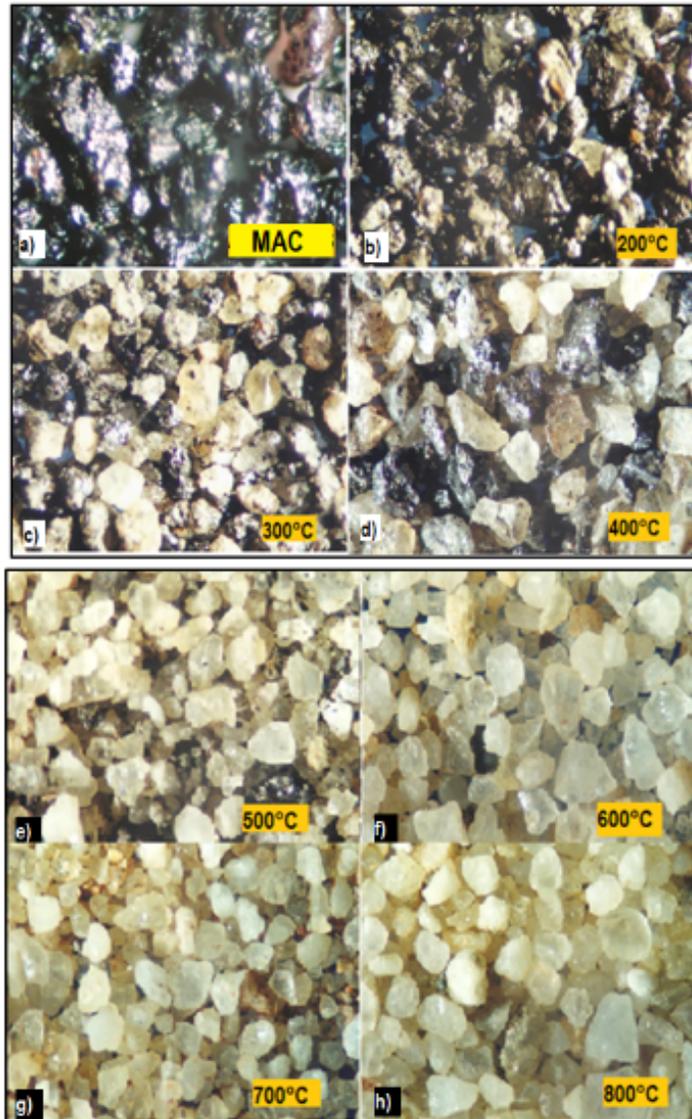


Figura 13.- Fotografías de la MAC calcinada en función de la temperatura donde se observa la evolución de la morfología y apariencia superficial de los granos. a) MAC sin calcinar, b) 200°C, c) 300°C, d)400°C, e) 500°C, f) 600°C, g) 700°C y h) 800°C.

Con base en los resultados del proceso de recuperación térmica descritos anteriormente, podemos proponer diferentes condiciones para recuperar la MAC, algunas propuestas son las siguientes:

Calcinar la mezcla de arena compleja a 500°C por un tiempo de 1 hr.

Calcinar la mezcla de arena compleja a 600°C por un tiempo de 30 min.

Calcinar la mezcla de arena compleja a 700°C por un tiempo de 20 min.

Calcinar la mezcla de arena compleja a 800°C por un tiempo de 20 min.

Cualquiera de estas condiciones cumple con el objetivo de recuperación térmica “descomposición y volatilización de la resina”, pero no todas consumen la misma energía para la calcinación. Es evidente que en todas estas condiciones el valor de L.O.I está dentro del rango permisible, cuyo valor máximo es de 2%. El valor de pH también es importante y en este caso el pH deberá estar en un rango de 5-6 aunque el ideal es de 7. Aunque la consecución de los valores óptimos para las variables de LOI, ADV y pH son prioritarios, la mejor condición es aquella que cumpla con estos valores y que además resulte en un menor consumo de energía y por lo tanto disminuyan los costos del proceso.

Evaluación de propiedades físicas y mecánicas del molde.

En la Tabla 7 se muestran los resultados de las pruebas físicas y mecánicas que se realizaron a los diferentes moldes fabricados con AN, MAC, y AR.

Tabla 7.- Resultados de las pruebas físicas y mecánicas realizadas a los moldes fabricados con arena nueva (AN), con mezcla de arena compleja (MAC) y arena recuperada (AR)

MOLDE	PRUEBAS FÍSICAS		PRUEBAS MECÁNICAS		
	PERMEABILIDAD mmWG	ESTABILIDAD %	DUREZA "B"	RESISTENCIA A LA COMP. kg/cm ²	RESISTENCIA DE FLEXIÓN kg/cm ²
AN	55.0	97.0	96.6	12.0	6.5
MAC	50.0	75.4	80.2	7.0	3.4
AR	63.0	97.7	97.0	12.1	5.8

CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo fue el establecer los parámetros del proceso de recuperación térmica para reciclar una mezcla compleja de arena de moldeo producto del proceso de moldeo y vaciado en el Centro de Capacitación en Ingeniería de Materiales (CCIM), la cual pudiera ser posteriormente utilizada para el vaciado de piezas. Las conclusiones de este trabajo fueron las siguientes:

La caracterización inicial mostro que la mezcla de arena compleja (MAC), no tenía condiciones de LOI, ADV y pH suficientes para poder ser utilizada en un proceso de moldeo y fundición de piezas, comparadas con las observadas en una arena nueva.

Fue posible determinar los parámetros del proceso de recuperación térmica para una mezcla de arena compleja (MAC). Las condiciones óptimas para este proceso fueron una temperatura de 600°C y un tiempo de 30 min.

Después del proceso de reciclado térmico, la caracterización de la arena recuperada (AR), mostró valores de LOI, ADV y pH adecuados para un proceso de moldeo.

La evaluación de los parámetros de moldeo autofraguante, mostró que la arena recuperada (AR) tiene condiciones óptimas para dicho proceso según las normas AFS.

Se evaluó la calidad del proceso de recuperación mediante el vaciado de piezas de aluminio moldeadas con la arena recuperada (AR). La evaluación mostro que en general las piezas tienen menos defectos superficiales y mejores propiedades mecánicas comparadas con piezas moldeadas con la mezcla de arena compleja (MAC) y de similar calidad a las obtenidas con una arena nueva (AN).

Fue posible realizar un segundo proceso de calcinación a la arena recuperada. Para este caso el estudio mostro que las condiciones óptimas para un segundo proceso de reciclaje son: 500°C y 20 min. Por lo tanto, en este segundo ciclo de recuperación térmica (ARSC) fue más fácil limpiar la arena que en su condición inicial.

La evaluación del segundo proceso de recuperación (ARSC), también mostro su efectividad en el proceso de moldeo y en la calidad de piezas vaciadas en aluminio, siendo sus propiedades mecánicas y calidad superficial ligeramente mejores a las obtenidas para el primer proceso de reciclaje.

Los resultados de esta investigación podrían traducirse en una disminución de costos de producción de piezas en el taller de fundición del CCIM, al reutilizarse una gran cantidad de arena compleja que actualmente se considera un material de desecho en el CCIM, además de la disminución del consumo de materias primas para el proceso de moldeo (arena y resinas). Finalmente, lo anterior también representa una disminución de los costos de disposición de residuos sólidos.

AGRADECIMIENTOS

Gracias por el apoyo al XXI Encuentro Sobre Procesamiento de Minerales por permitir participar e intercambiar ideas y conocimiento, ya que esto ayuda a fomentar el trabajo de investigación y de colaboración.

REFERENCIAS

Łucarz, M. (2015). Ecological aspects of the performed thermal reclamation. *Archives of Metallurgy and Materials*, 60(1). <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0054>

- Łucarz, M., Garbacz-Klempka, A., Drożyński, D., Skrzyński, M., & Kostrzewa, K. (2023). Mechanical Reclamation of Spent Moulding Sand on Chromite Sand Matrix; Removal of Alkali-Phenolic Binder. *Materials*, 16(7). <https://doi.org/10.3390/ma16072919>
- Nyembwe, K. D., & Kabasele, J. K. (2022). SUSTAINABILITY ASSESSMENT OF THERMAL AND MECHANICAL RECLAMATION OF FOUNDRY CHROMITE SAND. *South African Journal of Industrial Engineering*, 33(3). <https://doi.org/10.7166/33-3-2789>
- Rayjadhav, S. B., Mhamane, D. A., & Shinde, V. D. (2020). Assessment of sand reclamation techniques and sand quality in thermal reclamation. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 30(3). <https://doi.org/10.1504/IJPQM.2020.108354>
- Sappinen, T., Orkas, J., & Kronqvist, T. (2018). Thermal reclamation of foundry sands using repurposed sand dryer equipment. *Archives of Foundry Engineering*, 18(4). <https://doi.org/10.24425/afe.2018.125176>
- Shinde, V. D., & Mhamane, D. A. (2022). Evaluation of Sand Quality in Thermal Sand Reclamation System. *Thermal Science and Engineering*, 2(2). <https://doi.org/10.24294/tse.v2i2.538>
- Subramanian, S., Koh, J. W., Soh, J. M., Chew, S. H., Chua, K. E., Tan, Y. C., Teo, C. S., Koh, M. Y. C., & Cheung, T. H. H. (2023). Recycling Excavated Clay to Produce 'Sand-Like' Material Through Sintering: Static Furnace Versus Rotary Kiln. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 370 LNCE. https://doi.org/10.1007/978-981-99-4041-7_31
- Upadhyay, H. H., Patil, O. E., Jadhav, R. S., Patil, R. S., Ulape, D. P., & Mohite, N. T. (2024). Reclamation of Waste Sand Generated from 3D Printer. *International Journal of Metalcasting*, 18(1). <https://doi.org/10.1007/s40962-023-00991-1>

