

Formulación de mortero autonivelante usando cenizas de cascarilla de arroz como agregado inorgánico y anhidrita, mediante el diseño de mezclas

Juan Alcón¹, Wilson Aguilar¹, Miguel Gonzales, Christian Nina

¹Departamento de Química, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón

*j.alcon@umss.edu.bo

Resumen

Un mortero autonivelante es un mortero de consistencia muy fluida que sin ayuda puede nivelarse por sí mismo y presenta suficiente cohesión. Este proyecto tiene como objetivo el aprovechamiento de la ceniza de cascarilla de arroz como agregado inorgánico para la formulación de un mortero autonivelante en concreto de soleras, por lo cual se elaboraron morteros de diferentes dosificaciones de ceniza de cascarilla de arroz, anhidrita, cemento, y arena. La ceniza de cascarilla de arroz se obtuvo al incinerar por 3 h y 30 min a 750 °C, se obtuvo un contenido de sílice de 91.81 % en peso.

Aplicando un diseño de mezclas y con la ayuda del programa SAS. 9.4 se obtuvo una formulación óptima de cemento 35.48 %, ceniza-anhidrita (50/50) 36.76 %, arena 27.76 %, el cual obtuvo una resistencia a la compresión de 25.41 MPa y una resistencia a la flexión de 6.55 MPa a los 28 días.

Palabras clave: *Mortero, Anhidrita, Compresión, Flexión.*

Abstract

A self-leveling mortar is a mortar with a very fluid consistency that can level itself without assistance and has sufficient cohesion. This project aims to use rice husk ash as an inorganic aggregate for the formulation of a self-leveling mortar in screed concrete, for which mortars with different dosages of rice husk ash, anhydrite, cement, and sand. The rice husk ash was obtained by incinerating for 3 h and 30 min at 750 °C, a silica content of 91.81% by weight was obtained.

Applying a mixture design and with the help of the SAS program. 9.4 an optimal formulation of cement 35.48%, ash-anhydrite (50/50) 36.76%, sand 27.76% was obtained a compressive strength of 25.41 MPa and a flexural strength of 6.55 MPa at 28 days.

Key words: *Mortar, Anhydrite, Compression, Bending.*

1. Introducción

En la actualidad las investigaciones a los nuevos materiales de ingeniería y la utilización de los residuos agroindustriales generados tienen un importante papel para el desarrollo ambiental, al generar innovación y mejora que fortalecen la producción de productos de construcción y la prestación de servicios amigables para el medio ambiente (Vásquez, 2000).

La obtención de cemento para fabricar concreto implica un alto consumo energético y grandes emisiones de gases, lo que lo convierte en un material costoso y contaminante. La industria del cemento a escala mundial tiene el 2 % de consumo global de energía y el 5 % del consumo global de energía industrial, lo

que genera aproximadamente una tonelada de CO₂ por cada tonelada de Clinker dependiendo de la eficiencia de la planta. En algunos casos se podría sustituir el cemento por residuos agroindustriales (cascarilla de arroz), obteniendo muy buenos resultados (Méndez, 2010).

El empleo de estas adiciones agroindustriales como sustituto de cierto porcentaje de cemento disminuye de forma significativa el costo medioambiental de la construcción, al reducir parte de la generación de CO₂ y explotación minera necesarias para la producción de cemento, además de mejorar la gestión de los residuos reutilizados y evitar su disposición en botaderos (Martirena, 2004).

La Universidad Nacional de Ingeniería del Perú (UNI) proyecta masificar el uso de cascarilla de arroz incinerada y molida como un importante componente para fabricar materiales de construcción que permitan edificar en el futuro viviendas seguras y de bajo costo en diversas zonas del país. Han logrado establecer contactos con el Ministerio de Vivienda para brindarle la asesoría técnica del caso en la construcción de viviendas rurales, en las cuales podría incorporarse este insumo, disminuyendo así su costo. Se explicó que la cascarilla de arroz es un desecho agroindustrial que se puede aprovechar para sustituir una parte del cemento y reducir el gasto de producción de ladrillos, tejados, techos prefabricados, adoquines de suelo, morteros entre otros (Padilla, 2010).

La obtención del cemento para fabricar concreto implica un alto consumo energético y grandes emisiones de CO_2 lo cual se convierte en un material costoso y contaminante, pero brinda un amplio desarrollo a un nivel ambiental social y económico en algunos casos se podría sustituir el cemento con adiciones de residuos agroindustriales (Vásquez, 2000). La industria del cemento a escala mundial tiene el 2% del consumo global de energía y el 5 % del consumo global de energía industrial lo que genera aproximadamente una tonelada de CO_2 por cada tonelada de Clinker dependiendo de la eficiencia de la planta (Vanderley, 2002).

En algunos casos se podría sustituir al cemento por adiciones de residuos agropecuarios (cascarilla de arroz), obteniendo muy buenos resultados (Méndez, 2010; Paya, 2003). El empleo de estas adiciones de residuos agropecuarios como sustituto de cierto porcentaje de cemento disminuye de forma significativa el costo medioambiental de la construcción al reducir parte de la generación de CO_2 y explotación minera necesarias para la producción de cemento además de reutilizar los residuos y evitar su disposición en relleno sanitario (Martinela, 2004).

Se necesitará de una óptima dosificación que permitirá introducir la cantidad exacta de ceniza de cascarilla de arroz, cemento, arena y anhidrita para posteriormente ser mezclado con agua y aditivos. Esta dosificación debe cumplir con parámetros que garantice este producto mediante el uso de normativas ASTM C-109, C-125, C-191, C-230, C-293 y C-642.

2. Materiales y métodos

Las materias primas para la elaboración de los morteros autonivelantes son: cemento IP 30 (Coboce),

arena lavada procedente de la región de Parotani la cual se lleva a secar en un horno a 100 - 110 °C por 24 h, la ceniza de cascarilla de arroz procedente de la peladora de arroz "SACABA" ubicada en el municipio de Sacaba km 10 de la Avenida Villazón. La ceniza se calcina por 3 h y 30 min a 750 °C en un horno mufla y piedra de ajlez de la yasería de la localidad de Viloma esta se calcinó por 2 h a 850 °C y obtención de la anhidrita.

Antes del proceso de amasado, se obtienen las humedades de la arena y posteriormente se tamizan para garantizar de esta manera que no hubiera áridos de tamaño superior a 4 mm y seguidamente se pesan todos los materiales: cemento, anhidrita, arena y ceniza de cascarilla de arroz.

Inicialmente el amasado se realizó según el procedimiento que se especifica para morteros en la norma ASTM C-109.

Se siguió el siguiente procedimiento para el mezclado del mortero:

- Se procede a hacer el registro de los pesos del cemento, arena, anhidrita y ceniza de cascarilla de arroz.
- Se introduce la totalidad del cemento, arena, anhidrita y ceniza de cascarilla de arroz en el recipiente de la amasadora y se mezclan durante 30 s a velocidad lenta.
- Se continúa la mezcla donde se añade agua y un aditivo (SIKA® VISCOCRETE 5000) durante 30 s.
- Amasado durante 2 min a velocidad lenta.
- Finalmente se añade a los moldes de compresión y flexión.

Los moldes tanto para la compresión y flexión deben estar limpios y listos para su uso. Se debe añadir un aislante plástico para el fácil desmoldado de las caras internas de los moldes, y se debe evitar que se produzcan defectos.

Para el respectivo llenado se extiende una capa uniforme y al final del proceso se retira el exceso de mezcla con una espátula, con movimientos transversales y finalmente el exceso de mezcla se retira alrededor del perímetro del molde.

2.1. Análisis químico de la ceniza de cascarilla de arroz

El análisis químico se realizó en los ambientes de Laboratorio de Servicios de la Carrera de Ingeniería Química y se determinó que la ceniza de cascarilla de arroz utilizada es apta para la elaboración de morteros.

Estos morteros tienen un porcentaje elevado de óxido de silicio. Para contrastar este resultado también se llevó a cabo el análisis de la muestra en el Departamento de Física con un microscopio SEM (Scanning Electron Microscope) que utiliza electrones para observar muestras.

Los electrones se enfocan en la superficie de la muestra y se escanean. El microscopio está equipado con detectores que recopilan la información de los electrones reflejados, creando una imagen tridimensional de alta resolución de la misma.

Para preparar el análisis de la muestra de ceniza de cascarilla de arroz para el SEM se dispersó la muestra en cinta de carbono conductor.

2.2. Determinación de la resistencia a la compresión

Sirve para evaluar el comportamiento de las probetas frente a esfuerzos mecánicos. Se determinó los ensayos de compresión siguiendo las recomendaciones especificadas en la norma ASTM C -109 para probetas enmoldadas de mortero. En este ensayo consiste en determinar la resistencia a la compresión de los morteros a los 28 días, mientras más edad, mayor resistencia. La norma nos indica realizar las probetas en moldes cúbicos de 5cm* 5cm* 5cm. Una vez elaborado los morteros para compresión se procedió a medir su resistencia con el equipo de compresión, la carga se aplica sin aceleraciones y se aumenta progresivamente a un ritmo comprendido entre 50 N/s y 500 N/s de tal modo que la rotura sea entre 30 s y 90 s. La carga máxima aplicada, en N, durante el ensayo se registra, así como la edad de las probetas y la edad en el momento de desmoldarlas.

2.3. Determinación de la resistencia a la flexión

En este ensayo se determina cuan flexible es un mortero por edad a los 7, 14 y 28 días, mientras más edad mayor resistencia a la flexión tendrá el mortero. El procedimiento que se siguió es al establecido por la norma ASTM C -109.

Para los ensayos de prueba a la flexión la norma indica realizar las probetas en moldes de 16 cm de largo, 4 cm de ancho y 4 cm de alto.

3. Resultados

3.1. Composición química de la ceniza de cascarilla de arroz

Los resultados del análisis químico obtenido en el laboratorio de servicios del Departamento de Química se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1
Composición de la ceniza de cascarilla de arroz en % en peso

Parámetros	Método	Resultado
Sílice (SiO ₂)	Gravimétrico	91.81 %
Oxido de calcio (CaO)	Complexométrico	1.49 %
Sulfatos (SO ₄) ⁻²	Espectrofotométrico	5.96 %

En la cual se observa el contenido de óxido de silicio del 91.81 %, una concentración muy elevada y apta para la elaboración de morteros y un 5.96 % en sulfatos. La cual se encuentra en el rango reportado por Castro (2021),

Los resultados obtenidos del Microscopio electrónico de barrido del Departamento de Física se muestran en la Figura 1 y 2

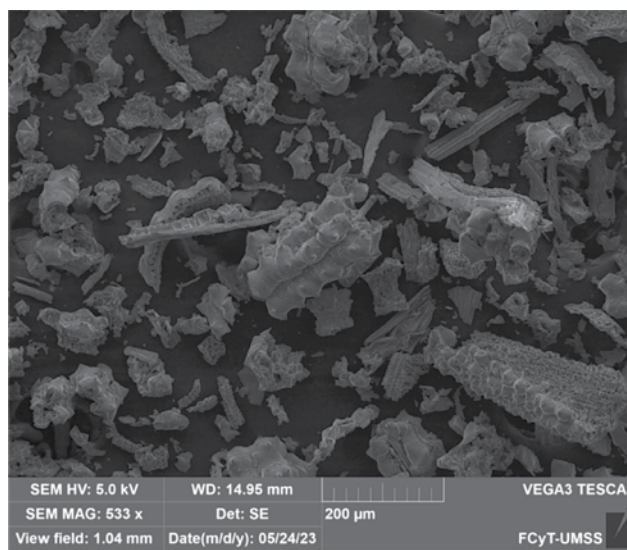


Figura 1. Imagen obtenida del microscópico electrónico de barrido de la muestra de ceniza de la cascarilla de arroz.

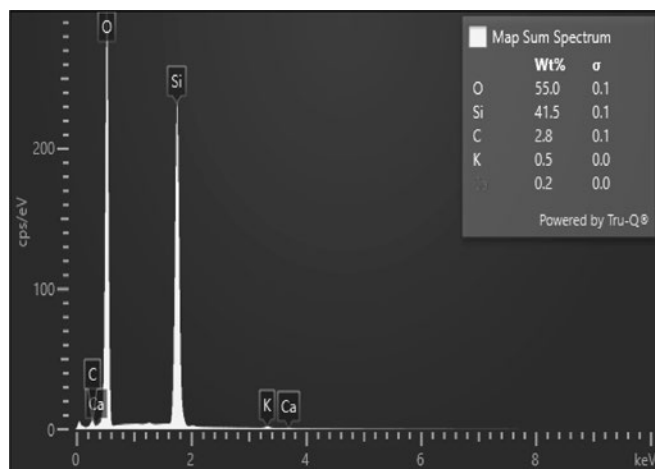


Figura 2. Análisis elemental de la muestra de ceniza de la cascarilla de arroz.

En la Figura 1 se observa el tamaño de la ceniza de cascarilla de arroz a una escala de 200 μm . En la Figura 2 se observa el contenido de silicio del 41.50 % que convertido a óxido de silicio es de 88.93 %. El cual es muy próximo al hallado en el análisis químico y se puede ver que es similar al encontrado en la investigación de Castro (2021), autor que indica la amorficidad de la ceniza de cascarilla de arroz a temperaturas de 600 a 800 $^{\circ}\text{C}$ en mufla. El cual confirma que la ceniza de cascarilla de arroz si es aplicable en la elaboración de morteros.

3.2. Efecto de la mezcla sobre la resistencia a la compresión aplicando el programa SAS

Los resultados de la resistencia a la compresión y la

Tabla 3

ANOVA para la variable de respuesta resistencia a la compresión (MPa)

Master Model						Predictive Model				
Source	DF	SS	MS	F	Pr > F	DF	SS	MS	F	Pr > F
Cemento	1	119.1954	119.1954	65.954	<.0001	1	114.7702	114.7702	49.93751	<.0001
Cen-anhi	1	57.02067	57.02067	31.55105	0.0002	1	61.30365	61.30365	26.67376	0.0003
Arena	1	23.21036	23.21036	12.84291	0.0050	1	37.10881	37.10881	16.14637	0.0020
Cemento*Cen-Anhi	1	115.024	115.024	63.64585	<.0001	1	108.4373	108.4373	47.18204	<.0001
Cemento*Arena	1	73.30727	73.30727	40.56286	<.0001	1	87.12	87.12	37.90668	<.0001
Cen-Anhi*Arena	1	7.208524	7.208524	3.988668	0.0737					
Model	5	153.6919	30.73837	17.00836	0.0001	4	146.4833	36.62084	15.93405	0.0002
Error	10	18.07251	1.807251			11	25.28103	2.298276		
(Lack of fit)	2	8.175842	4.087921	3.304483	0.0899	3	15.38437	5.128122	4.145333	0.0478
(Pure Error)	8	9.896667	1.237083			8	9.896667	1.237083		
Total	15	171.7644				15	171.7644			

matriz de datos de los componentes de la mezcla se pueden observar en la Tabla 2.

Tabla 2

Matriz de datos de la resistencia a la compresión (MPa)

	Cemento	Cen-Anh	Arena	Compresión
1	0.34	0.37	0.29	18.6
2	0.34	0.37	0.29	18.1
3	0.34	0.38	0.28	21.6
4	0.34	0.38	0.28	21.8
5	0.34	0.39	0.27	18.9
6	0.34	0.39	0.27	18.0
7	0.34	0.39	0.27	18.5
8	0.35	0.36	0.29	24.5
9	0.35	0.36	0.29	28.7
10	0.35	0.37	0.28	26.1
11	0.35	0.38	0.27	26.3
12	0.35	0.38	0.27	26.2
13	0.36	0.36	0.28	21.3
14	0.36	0.36	0.28	21.5
15	0.36	0.37	0.27	20.6
16	0.36	0.37	0.27	21.6

El valor máximo obtenido es de 28.7 MPa. y el valor mínimo es de 18 MPa. El valor máximo en este proyecto es superior a los obtenidos en otros trabajos sobre morteros autonivelantes, donde se llegó a obtener solamente 20,42 MPa (Flores, 2015).

Los resultados del análisis de varianza entregado por el SAS para la variable de respuesta resistencia a la compresión (MPa) se muestran en la Tabla 3.

En la Tabla 3 se puede observar que los efectos significativos son los efectos principales, cemento, cen-anhi y arena, además de las interacciones cemento*cen-anhi. y cemento*arena. Pero son las interacciones indicadas las que contribuyen a los valores de la resistencia a la compresión.

El estadístico Lack of fit (falta de ajuste), por su probabilidad (Pvalue=0.0899) que es mayor a 0.05, indica que el modelo ajusta bien los datos de la variable de respuesta Resistencia a la compresión (MPa).

El modelo estadístico para la Resistencia a la compresión (MPa) se puede observar en la Tabla 4.

Tabla 4

Modelo predictivo codificado para Resistencia a la compresión (MPa)

Coded Levels (-1,1)	
Compresión	= 25309.8*cemento - 7276.465*cen-anhi - 7491.531*arena + 59820*cemento*cen-anhi + 60490*cemento*arena

La importancia de los factores cemento y las interacciones cemento*cen-anhi y cemento*arena, se pueden observar en el modelo de la Tabla 4. Debido a que las pendientes de las interacciones en el modelo son positivas, esto quiere decir que contribuyen positivamente a la resistencia a la compresión.

En la Tabla 5, se muestra el coeficiente de determinación del modelo planteado.

Tabla 5

Cuadro de ajuste del modelo para la Compresión

	Master Model	Predictive Model
RMSE	1.34434	1.516006
R-square	89.48%	85.28%
Adjusted R-square	84.22%	79.93%
Coefficient of Variation	6.105434	6.885071

El valor del coeficiente de determinación significa que el porcentaje de varianza explicada por el modelo es del 89.48 % y a su vez indica que la mayor parte de la variabilidad constatado en la compresión está asociada a las variables explicativas incluidas en el modelo.

Tabla 6

Establecimiento del perfil predictivo para resistencia a la compresión (MPa)

Factor	Label	Optimal Setting	Response	Estimated Value
Cemento	CEM	0.3548	Compresión	25.40867 [24.1017,26.71564]
Cen-Anhi	CENANHI	0.3676	Desirability	75.78%
Arena	ARENA	0.2776		

La Tabla 6 entrega el perfil predictivo para la variable de respuesta resistencia a la compresión (MPa). Esta indica que para obtener un valor de resistencia a la compresión de 25.41 MPa, los componentes de la mezcla son: 35.48 % de cemento, 36.76 % de cen-anhi y 27.76 % de arena.

3.3. Efecto de la mezcla sobre la resistencia a la flexión aplicando el programa SAS

Los resultados de la resistencia a la flexión y la matriz de datos de los componentes de la mezcla se pueden observar en la Tabla 7.

Tabla 7

Matriz de datos resistencia a la flexión de los componentes de la mezcla

	Cemento	Cen-Anh	Arena	Flexion
1	0.34	0.37	0.29	5.0
2	0.34	0.37	0.29	4.3
3	0.34	0.38	0.28	5.7
4	0.34	0.38	0.28	5.9
5	0.34	0.39	0.27	5.8
6	0.34	0.39	0.27	6.2
7	0.34	0.39	0.27	6.1
8	0.35	0.36	0.29	5.8
9	0.35	0.36	0.29	6.8
10	0.35	0.37	0.28	6.3
11	0.35	0.38	0.27	6.7
12	0.35	0.38	0.27	6.6
13	0.36	0.36	0.28	6.5
14	0.36	0.36	0.28	6.4
15	0.36	0.37	0.27	6.2
16	0.36	0.37	0.27	6.1

Al procesarlo según el programa del SAS, se puede determinar el cuadro de análisis de varianza para determinar cuáles de los componentes de la mezcla son significativos.

Son significativas las interacciones cemento*cen-anhi (Pvalue=0.0233) y cemento*arena (Pvalue=0.0032) que están incluidas en el modelo y su coeficiente positivo indica que la resistencia a la flexión es debido a estas dos interacciones.

En la Tabla 8 se muestra el cuadro de ANOVA para la variable de respuesta resistencia a la flexión (MPa).

Tabla 8

Cuadro ANOVA para la variable de respuesta resistencia a la flexión

Master Model						Predictive Model				
Source	DF	SS	MS	F	Pr > F	DF	SS	MS	F	Pr > F
Cemento	1	1.50872	1.50872	13.76668	0.0040	1	1.45158 9	1.451589	13.44252	0.003 7
Cen-Anhi	1	0.08722 3	0.087223	0.795889	0.3933	1	0.01458 4	0.014584	0.13506	0.720 2
Arena	1	0.72324	0.72324	6.599382	0.0279	1	2.20842 3	2.208423	20.45123	0.000 9
Cemento*Cen-Anhi	1	0.77511 2	0.775112	7.072694	0.0239	1	0.68371 2	0.683712	6.331556	0.028 7
Cemento*Arena	1	1.62075 7	1.620757	14.78899	0.0032	1	2.19428 6	2.194286	20.32031	0.000 9
Cen-Anhi*Arena	1	0.09191 2	0.091912	0.838671	0.3813					
Model	5	5.05407 8	1.010816	9.223431	0.0017	4	4.96216 7	1.240542	11.48811	0.000 6
Error	10	1.09592 2	0.109592			11	1.18783 3	0.107985		
(Lack of fit)	2	0.22925 5	0.114627	1.058099	0.3911	3	0.32116 7	0.107056	0.988205	0.445 8
(Pure Error)	8	0.86666 7	0.108333			8	0.86666 7	0.108333		
Total	15	6.15				15	6.15			

La Tabla 8 indica que los efectos significativos son, cemento, arena y las interacciones cemento*cen-anhi y cemento*arena. De acuerdo con estos resultados, se establece que estos componentes de la mezcla tienen efecto significativo sobre la resistencia a la flexión.

El estadístico de Lack of fit (falta de ajuste) indica que el modelo experimental se ajusta adecuadamente a los datos de la variable de respuesta (Resistencia a la flexión) debido a que su valor de probabilidad (Pvalue=0.3911) es mayor al nivel de significancia ($\alpha=0.05$).

El modelo estadístico codificado de la variable de respuesta resistencia a la flexión se puede observar en la Tabla 9.

Tabla 9

Modelo predictivo codificado para la resistencia a la flexión (MPa)

Coded Levels(-1,1)	
Flexión	= 2846.4*cemento - 112.2333*cen-anhi - 1827.567*arena + 4750*cemento*cen-anhi + 9600*cemento*arena

El modelo estadístico de la Tabla 9 de la variable de respuesta resistencia a la flexión tienen contribución positiva los componentes de la mezcla cemento y las interacciones cemento *cen-anhi y cemento*arena por sus coeficientes positivos.

El coeficiente de determinación del modelo planteado se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10

Cuadro de ajuste del modelo para la resistencia a la Flexión

	Master Model	Predictive Model
RMSE	0.331047	0.32861
R-square	82.18%	80.69%
Adjusted R-square	73.27%	73.66%
Coefficient of Variation	5.494557	5.454116

El valor del coeficiente de determinación R^2 , significa que el porcentaje de varianza explicada por el modelo es del 82.18 %.

En la Tabla 11 se observa los resultados del ajuste de optimización de los componentes de la mezcla para la variable de respuesta resistencia a la flexión (MPa).

Tabla 11

Establecimiento del perfil predictivo para resistencia a la flexión (MPa)

Factor	Label	Optimal Setting	Response	Estimated Value
Cemento	CEM	0.3548	FLEX	6.551888 [6.268588,6.835188]
Cen-Anhi	CENANHI	0.3676		
Arena	ARENA	0.2776		

En la Tabla 11 se muestra el perfil predictivo para la variable de respuesta resistencia a la flexión (MPa). Esta nos indica que para obtener un valor de resistencia a la flexión de 6.55 MPa, los componentes de la mezcla son: 35.48 % de cemento, 36.76 % de cen-anhi y 27.76 % de arena.

3.4. Verificación de las respuestas de resistencia a la compresión y flexión mediante determinación de la porosidad

Con la finalidad de contrastar las variables de respuestas de resistencia a la compresión y flexión

se determinó el comportamiento de la porosidad de los morteros, ya que estos poseen una relación inversamente proporcional, a mayor resistencia menor porosidad. Este comportamiento se observa en la Figura 3.

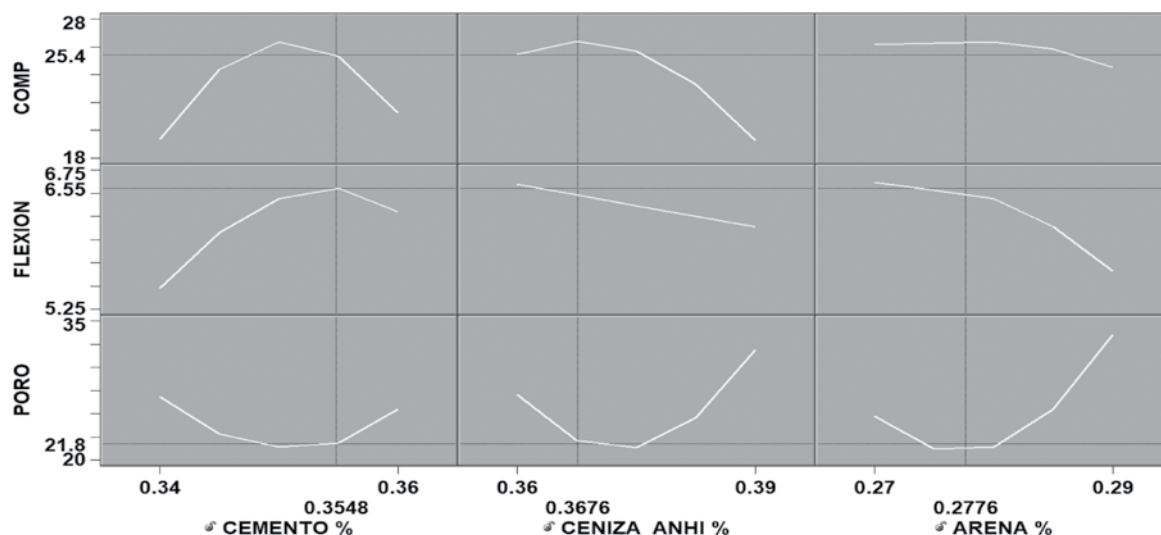


Figura 3. Comportamiento de la resistencia a la compresión, flexión y porosidad.

4. Conclusiones

La ceniza de cascarilla de arroz tiene que ser tratado a una temperatura de 750 °C y un tiempo de 3 h y 30 min. A estos valores, la ceniza es amorfa como se observa en la Figura 1 y esta tiene un contenido de sílice de 91.81 %.

Las variables de mayor influencia en la mezcla fueron los porcentajes optimizados de cada componente: cemento 35.48 %, ceniza-anhidrita 36.76 %, arena 27.76 %.

Al mezclar con los demás componentes (cemento y agua) aumenta la resistencia con un resultado a la compresión 28.5 MPa mejor de lo esperado. Siendo así apta para la elaboración de morteros por ser un buen material inorgánico y reemplazante del cemento.

Se formuló el diseño de mezclas con el Programa SAS y se obtuvo los siguientes modelos predictivos:

- Resistencia a la compresión 25.41 MPa, dentro de los límites de confianza entre 24.10 MPa a 26.72 MPa. Donde indica que contribuyen positivamente en la resistencia a compresión

el factor cemento y las interacciones cemento*cen-anhi y cemento *arena.

- Resistencia a la flexión 6.55 MPa, dentro de los límites de confianza entre 6.27 a 6.84 MPa donde se indica que para obtener un valor de resistencia a la flexión de 6.55 MPa, los componentes de la mezcla son: 35.48% de cemento, 36.76% de cen-anhi y 27.76% de arena.

5. Referencias bibliográficas

- Castro, C. M. J., Martínez, R. A. P., Zamora-Ledezma, C., & Zamora-Ledezma, E. (2021). Caracterización preliminar de la ceniza de cáscara de arroz de la provincia Manabí, Ecuador, para su empleo en hormigones. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia*, 44(1), 44-50.
- Flores De La Rosa, V. M. (2015). Estudio de la resistencia a la compresión del hormigón con adición de polvo de vidrio reciclado (Bachelor's thesis, La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2015.)

- Martirena, J. F. (2004) Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerantes de Clinker de cemento Portland; el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa. Tesis Doctoral, Universidad Central Martha Abreu de las Villas.
- Méndez, R. et al. (2010). Optimización de mezclas cal-puzolana destinadas a la construcción de materiales prefabricados no convencionales. Simposio Aprovechamiento de residuos agroindustriales como fuente sostenible de materiales de construcción, Valencia.
- Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M. V., & Velázquez, S. (2003). Evaluation of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R). Thermogravimetric analysis studies on FC3R-Portland cement pastes. Cement and concrete research, 33(4), 603-609.
- Vanderley M. (2002), On the sustainability of the Concrete. Extended version of the paper commissioned by UNEP Journal Industry and Environment
- Vasquez, R. y Vach Vigil, P. (2000). Las cenizas de cascara de arroz; Adición puzolanica en cemento y concreto. Universidad de Piura. Piura, Perú.