



UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
GESTIÓN DE BIBLIOTECAS



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 1

Neiva, 19 de febrero de 2024

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad de Neiva - Huila

El (Los) suscrito(s):

Carlos Alberto Suaza Cuellar _____, con C.C. No. 1075313247,

Nicolas González Perdomo _____, con C.C. No. 1075321459,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado **Evaluación de las propiedades físico-mecánicas del mortero aligerado con ceniza de cascarilla de arroz variando su temperatura de incineración y el tiempo de molienda.**

Presentado y aprobado en el año 2024 como requisito para optar al título de **Ingeniero Civil**;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales "open access" y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Carlos Alberto Suaza Cuellar

Firma: _____

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Nicolas González Perdomo

Firma: _____

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Evaluación de las propiedades físico-mecánicas del mortero aligerado con ceniza de cascarilla de arroz variando su temperatura de incineración y el tiempo de molienda.

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Suaza Cuellar	Carlos Alberto
González Perdomo	Nicolas

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Duarte Toro	Mauricio

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Civil

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Ingeniería Civil



UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
GESTIÓN DE BIBLIOTECAS



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO

AP-BIB-FO-07

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 3

CIUDAD: Neiva - Huila

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2024

NÚMERO DE PÁGINAS: 87

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas_X_ Fotografías___ Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general_X_ Grabados___
Láminas___ Litografías___ Mapas___ Música impresa___ Planos___ Retratos___ Sin ilustraciones___ Tablas
o Cuadros_X_

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento:

MATERIAL ANEXO:

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. Cascarilla	Husk	6. Molienda	Milling
2. Ceniza	Ash		
3. Mortero	Mortar		
4. Compresión	Compression		
5. Incineración	Incineration		

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Los problemas ambientales generados por la poca degradación de los desechos agroindustriales como la ceniza cascarilla de arroz (CCA) son una fuente de contaminación en el mundo, hay muchas formas de darle un uso a esta materia; por lo que en el presente trabajo la cascarilla de arroz (CA) se incineró y se convirtió en ceniza para controlar las temperatura y aprovechar los altos porcentajes de sílice, y al final elaborar cubos de mortero con remplazo parcial de cemento por ceniza de cascarilla de arroz (CCA); se tomaron tres temperaturas de incineración, 500°C, 800°C y 1000°C, y tres tiempos de molienda, 1, 2 y 3 horas, y así generar tres módulos de finura, se reemplazó parte del cemento por la CCA al 0%, 10%, 15% y 20%. Se elaboró una Anova multifactorial, con tres factores (TEMPERATURA-TIEMPO-PORCENTAJE) y con una variable de respuesta que

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



sería la resistencia a la compresión. Dentro de los resultados arrojados, la interacción que a los 28 días dio la mejor resistencia a la compresión fue los cubos de mortero a 500°C, 1h de molienda y 10% CCA, con 24.5 MPa, aun superior que el tratamiento testigo con cero por ciento de ceniza, el cual dio una resistencia a la compresión de 22.98 MPa, también se observó el aumento en el consumo de agua en las mezclas de mayores porcentajes de sustitución, temperatura y molienda.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

The environmental problems generated by the poor degradation of agroindustrial wastes such as rice husk ash (RHA) are a source of pollution in the world, there are many ways to use this material; Therefore, in the present work, rice husk ash (RHA) was incinerated and converted into ash to control the temperature and take advantage of the high percentages of silica, and at the end to elaborate mortar cubes with partial replacement of cement by rice husk ash (RHA); three incineration temperatures, 500°C, 800°C and 1000°C, and three grinding times, 1, 2 and 3 hours, were used to generate three fineness modules, replacing part of the cement with CCA at 0%, 10%, 15% and 20%. A multifactorial Anova was elaborated, with three factors (TEMPERATURE-TIME-PORCENTAGE) and with a response variable which would be the compressive strength. Among the results obtained, the interaction that at 28 days gave the best compressive strength was the mortar cubes at 500°C, 1h of grinding and 10% CCA, with 24.5 MPa, even higher than the control treatment with zero percent ash, which gave a compressive strength of 22.98 MPa, it was also observed the increase in water consumption in the mixtures with higher percentages of substitution, temperature and grinding.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado: Jackson Andrés Gil Hernández

Firma:

Nombre Jurado: Henry Mauricio Castillo Salgado

Firma:

Nombre Jurado: Wilson Javier Erazo Espinosa

Firma:



Evaluación de las propiedades físico-mecánicas del mortero aligerado con ceniza de cascarilla de arroz variando su temperatura de incineración y el tiempo de molienda.

Nicolas González Perdomo

Carlos Alberto Suaza Cuellar

Universidad Surcolombiana

Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería civil

Neiva, Colombia

2023

Evaluación de las propiedades físico-mecánicas del mortero aligerado con ceniza de cascarilla de arroz variando su temperatura de incineración y el tiempo de molienda.

Nicolas González Perdomo

Carlos Alberto Suaza Cuellar

Proyecto de grado presentada(o) como requisito parcial para
optar al título de:

Ingeniero Civil

Director (a):

ING. Mauricio Duarte Toro

Línea de Investigación:

Materiales de Construcción

Universidad Surcolombiana de Colombia

Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Civil

Neiva, Colombia

2023

Dedicatoria

A mis padres Carlos y Marinela, quienes han sido mi fuente inagotable de amor, apoyo y sacrificio a lo largo de mi vida. Su confianza en mí y su constante aliento han sido mi mayor motivación. A mis hermanos cuya comprensión y compañía han sido un refugio en los momentos de estrés y una fuente de alegría en los de celebración. Al resto de familia y amigos, por su eterno respaldo con quienes he compartido risas, lágrimas y momentos inolvidables a lo largo de esta travesía. Cada uno de ustedes ha contribuido de manera única a mi formación y crecimiento, gracias por ser unos pilares de inspiración y motivación constante. Este logro es de ustedes tanto como mío. Con gratitud y cariño,

Carlos Alberto Suaza Cuellar

A mi querida familia y amigos, este logro no habría sido posible sin su inquebrantable apoyo y aliento. Cada consejo, palabra de ánimo y gesto de respaldo ha sido un pilar fundamental en mi camino hacia la culminación de esta parte de mi vida. Su presencia en mi vida ha hecho que este viaje sea verdaderamente inolvidable. Con amor,

Nicolas González Perdomo

Resumen

Los problemas ambientales generados por la poca degradación de los desechos agroindustriales como la ceniza cascarilla de arroz (CCA) son una fuente de contaminación en el mundo, hay muchas formas de darle un uso a esta materia; por lo que en el presente trabajo la cascarilla de arroz (CA) se incineró y se convirtió en ceniza para controlar las temperatura y aprovechar los altos porcentajes de sílice, y al final elaborar cubos de mortero con remplazo parcial de cemento por ceniza de cascarilla de arroz (CCA); se tomaron tres temperaturas de incineración, 500°C, 800°C y 1000°C, y tres tiempos de molienda, 1, 2 y 3 horas, y así generar tres módulos de finura, se reemplazó parte del cemento por la CCA al 0%, 10%, 15% y 20%. Se elaboró una Anova multifactorial, con tres factores (TEMPERATURA-TIEMPO-PORCENTAJE) y con una variable de respuesta que sería la resistencia a la compresión. Dentro de los resultados arrojados, la interacción que a los 28 días dio la mejor resistencia a la compresión fue los cubos de mortero a 500°C, 1h de molienda y 10% CCA, con 24.5 MPa, aun superior que el tratamiento testigo con cero por ciento de ceniza, el cual dio una resistencia a la compresión de 22.98 MPa, también se observó el aumento en el consumo de agua en las mezclas de mayores porcentajes de sustitución, temperatura y molienda.

Palabras clave: cascarilla, ceniza, mortero, compresión, incineración, molienda.

Abstract

The environmental problems generated by the poor degradation of agroindustrial wastes such as rice husk ash (RHA) are a source of pollution in the world, there are many ways to use this material; Therefore, in the present work, rice husk ash (RHA) was incinerated and converted into ash to control the temperature and take advantage of the high percentages of silica, and at the end to elaborate mortar cubes with partial replacement of cement by rice husk ash (RHA); three incineration temperatures, 500°C, 800°C and 1000°C, and three grinding times, 1, 2 and 3 hours, were used to generate three fineness modules, replacing part of the cement with CCA at 0%, 10%, 15% and 20%. A multifactorial Anova was elaborated, with three factors (TEMPERATURE-TIME-PORCENTAGE) and with a response variable which would be the compressive strength. Among the results obtained, the interaction that at 28 days gave the best compressive strength was the mortar cubes at 500°C, 1h of grinding and 10% CCA, with 24.5 MPa, even higher than the control treatment with zero percent ash, which gave a compressive strength of 22.98 MPa, it was also observed the increase in water consumption in the mixtures with higher percentages of substitution, temperature and grinding.

Keywords: husk, ash, mortar, compression, incineration, milling.

Contenido

	Pág.
Resumen	VI
Lista de figuras	XI
Lista de tablas	XII
Lista de gráficas	XIV
Lista de Símbolos y abreviaturas	XVI
Capítulo 1	17
1. Introducción	17
1.1 Antecedentes	18
1.1.1 A Nivel Internacional	18
1.1.2 A Nivel Nacional	19
1.1.3 A Nivel Local	20
1.2 Justificación	20
1.3 Objetivos	22
1.3.1 Objetivos específicos	22
Capítulo 2	23
2. Marco teórico	23
2.1 Cascarilla de arroz (CA)	23
2.2 Ceniza de cascarilla de arroz (CCA)	23
2.3 Cemento	24
2.3.1 Cemento portland	24
2.4 Agregado fino	25
2.5 Diseño de mezclas	25
2.6 Mortero	25
2.7 Curado	25
2.8 Cubos de mortero	26
2.9 Módulo de finura del CCA	26

2.10 Módulo de finura de la arena.....	26
2.11 Análisis granulométrico.....	26
2.12 Contenido de humedad.....	27
2.13 Ensayo de fluidez.....	27
2.14 Masa unitaria suelta y compactada.....	27
2.15 Densidad y porcentaje de absorción.....	27
Capítulo 3	28
3. Metodología.....	28
3.1 Tipo de investigación.....	28
3.2 Trabajo en Campo.....	29
3.3 Trabajo en laboratorio.....	29
3.3.1 Manejo de la materia prima	29
3.3.2 Caracterización física de la CCA y agregado fino. ..	30
3.3.2.1 Análisis granulométrico	31
3.3.2.2 Módulo de finura de la arena	33
3.3.2.3 Contenido de humedad	34
3.3.2.4 Masa unitaria suelta y compacta	34
3.3.2.5 Densidad y porcentaje de absorción para agregado fino	
37	
3.4 Módulo de finura de la CCA.....	39
3.5 Diseño de la mezcla.....	39
3.5.1 Contenido de cemento:	39
3.5.2 Contenido de agua	41
3.5.3 Contenido de arena	42
3.5.4 Determinación de fluidez	43
3.5.5 Corrección por humedad de la arena y de la CCA	44
3.5.6 Elaboración del diseño de muestreo	45
3.5.7 Elaboración de cubos de mortero	47
3.5.8 Prueba de compresión a los cubos de morteros	48
Capítulo 4	49
4. Resultados y análisis.....	49
4.1 Propiedades físicas de la CCA.....	49
4.1.1 Incineración de la CA	49
4.1.2 Módulo de finura de la CCA	50
4.2 Fabricación de Cubos de mortero.....	50
4.2.1 Cantidad de arena, cemento, agua y CCA.	50
4.2.2 Esfuerzo a la compresión	52
4.2.3 Análisis comparativo de las mezclas con CCA	53
4.3 Análisis de varianza multifactorial.....	54
4.3.1 Análisis multifactorial a los 7 días.	54
4.3.1.1 Revisión de los datos	54
4.3.1.2 Gráficos por factores	55
4.3.1.3 Anova multifactorial	56
4.3.1.4 Interacción entre los factores, HSD DE TUKEY	57

4.3.1.5 Gráficos de interacción	58
4.3.2 Análisis multifactorial a los 14 días.	60
4.3.2.1 Revisión de los datos	60
4.3.2.2 Gráficos por factores	61
4.3.2.3 Anova multifactorial	62
4.3.2.4 Interacción entre los factores, HSD DE TUKEY	63
4.3.2.5 Gráficos de interacción	65
4.3.3 Análisis multifactorial a los 28 días	67
4.3.3.1 Revisión de los datos	67
4.3.3.2 Gráficos por factores	67
4.3.3.3 Anova multifactorial	69
4.3.3.4 Interacción entre los factores, HSD DE TUKEY	70
4.3.3.5 Gráficos de interacción	71
Capítulo 5	74
5. Discusión	74
Capítulo 6	77
6. Conclusiones y recomendaciones	77
6.1 Conclusiones	77
6.2 Recomendaciones	78
Bibliografía	83

Lista de figuras

Figura 3-1: Recolección de la cascarilla de arroz	29
Figura 3-2: Calcinación en mufla de la CA.	29
Figura 3-3: Molienda de la CCA.	30
Figura 3-4: Tamizaje de la arena.	31
Figura 3-5: Llenado del molde para hallar la masa suelta.	35
Figura 3-6: Llenado y compactación del molde para hallar la masa compacta.	36
Figura 3-7: Masa de arena SSS.	37
Figura 3-8: Masa del material seco.	37
Figura 3-9: Tamizado de la CCA ya molida.	39
Figura 3-10: Determinación de fluidez	44
Figura 3-11: Fabricación de cubos de mortero.	48
Figura 3-12: Prueba de compresión.	48

Lista de tablas

Tabla 3-1: Análisis granulométrico de la arena.	32
Tabla 3-2: Verificación del porcentaje que pasa según NTC 174.	33
Tabla 3-3: Medidas del molde.	34
Tabla 3-4: Resultado de la masa unitaria suelta.	35
Tabla 3-5: Resultado de la masa unitaria compacta.	36
Tabla 3-6: Masas utilizadas para determinar la densidad. .	36
Tabla 3-7: Densidades y porcentaje de absorción de la arena.	38
Tabla 3-8: Interpolación para sacar masa del cemento.	42
Tabla 3-9: Cuantía del agua.	42
Tabla 3-10: Cuantía de la arena.	43
Tabla 3-11: Fluidéz del mortero sin ceniza.	44
Tabla 3-12: Factores y niveles para el muestreo.	45
Tabla 3-13: Tratamientos	46
Tabla 4-1: Porcentajes de reducción de masa de la CA a CCA.	49
Tabla 4-2: Módulo de finura de la CCA.	50
Tabla 4-3: Masa requerida para 9 cubos de mortero por cada porcentaje de sustitución.	51
Tabla 4-4: Porcentaje extra de agua para cada tipo de mezcla.	51
Tabla 4-5: Resultados promedio de esfuerzo a la compresión MPa.	52
Tabla 4-6: Anova multifactorial entre factores a los 7 días.	57
Tabla 4-7: Prueba HSD TUKEY interacción entre factores a los 7 días.	58
Tabla 4-8: Anova multifactorial entre factores a los 14 días.	63

Tabla 4-9: Prueba HSD TUKEY interacción entre factores a los 14 días.	64
Tabla 4-10: Anova multifactorial entre factores a los 28 días.	69
Tabla 4-11: Prueba HSD TUKEY interacción entre factores a los 28 días.	70
Tabla 5-1: Comparativo de resistencias con otros autores.	74
Tabla 5-2: Comparativo de características de la arena. ...	76
Tabla A-1: Resultados de esfuerzo a la compresión en MPa de cada cubo de mortero.	81

Lista de gráficas

Gráfica 3-1: Curva granulométrica del agregado fino con sus límites según la NTC 174.	33
Gráfica 3-2: Determinación del contenido de cemento mortero seco.	40
Gráfica 3-3: Determinación de la relación A/C.	41
Gráfica 4-1: Comparación de morteros	53
Gráfica 4-2: Gráfico del comportamiento factor temperatura a los 7 días.	55
Gráfica 4-3: Tiempos de molienda a los 7 días.	55
Gráfica 4-4: Porcentaje de ceniza a los 7 días.	56
Gráfica 4-5: Gráfica de interacción factores temperatura y molienda a los 7 días.	60
Gráfica 4-6: Gráfica de interacción factores ceniza y molienda a los 7 días.	59
Gráfica 4-7: Gráfica de interacción factores ceniza y temperatura a los 7 días.	59
Gráfica 4-8: Gráfico del comportamiento entre el factor temperatura a los 14 días.	61
Gráfica 4-9: Tiempos de molienda a los 14 días.	61
Gráfica 4-10: Porcentaje de ceniza a los 14 días.	62
Gráfica 4-11: Gráfica de interacción factores temperatura y molienda a los 14 días.	65
Gráfica 4-12: Gráfica de interacción factores ceniza y molienda a los 14 días.	65
Gráfica 4-13: Gráfica de interacción factores ceniza y temperatura a los 14 días.	66
Gráfica 4-14: Gráfico del comportamiento entre el factor temperatura a los 28 días.	67
Gráfica 4-15: Tiempos de molienda a los 28 días.	68
Gráfica 4-16: Porcentaje de ceniza a los 28 días.	70
Gráfica 4-17: Gráfica de interacción factores temperatura y molienda a los 28 días.	71

Gráfica 4-18: Gráfica de interacción factores ceniza y molienda a los 28 días.	72
Gráfica 4-19: Gráfica de interacción factores ceniza y temperatura a los 28 días.	72

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$^{\circ}\text{C}$	Grados Celsius		
<i>MPa</i>	Mega pascal	10^6N/mm^2	
<i>Msh</i>	Masa del suelo húmedo	gr	
<i>Mss</i>	Masa del suelo seco	gr	
<i>D</i> aparente	Densidad aparente	gr/cm^3	Ecu. 8
<i>D</i> sss	Densidad saturada superficialmente seco	gr/cm^3	Ecu. 9

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>CA</i>	Cascarilla de arroz
<i>CCA</i>	Ceniza de cascarilla de arroz
<i>V</i>	Volumen
<i>MF</i>	Modulo de finura
<i>M</i>	Masa
<i>SSS</i>	Saturación superficialmente seca
<i>A/C</i>	Relación agua cemento
<i>ICONTEC</i>	Instituto colombiano de normas técnicas y certificación
<i>NTC</i>	Norma técnica colombiana

Capítulo 1

1. Introducción

El cemento es uno de los principales materiales utilizados en el sector de la construcción, el cual se emplea para la fabricación de morteros y concretos principalmente. La elaboración del cemento genera entre 8-10% de las emisiones de gases de efecto invernadero en el mundo en especial CO₂ (CHRISTOPHER et al., 2017). Para obtener una reducción importante en la emisión de CO₂ por la producción del cemento, MEHTA (2009) comenta que se debe reducir el contenido de Clinker al producto final maximizando los aditivos minerales en el cemento y aumentar el uso de cementos mezclados. Si el 30% del cemento utilizado en el mundo se cambiara por materiales suplementarios cementantes podría generarse grandes cambios en las emisiones del CO₂ por la producción del cemento (ECOSMART, 2008).

Anteriormente los residuos agro-industriales generados por los humanos carecían de valor y creaban problemas de contaminación en el medio ambiente, actualmente se está viendo un cambio en el manejo reciclando estos desechos como lo es el bagazo de caña o la hoja del maíz. Investigadores en el mundo han podido estudiar diferentes materiales cementantes como la escoria de alto horno, el humo de sílice, el metacaolin, la ceniza volante y ceniza de cascarilla de arroz, que pueden mejorar las propiedades del mortero y concreto pudiendo economizar los costes en la construcción (AMRUTHA G. 2009).

En países productores de arroz, la cascarilla es muy utilizada para diversas actividades, ya que es un desecho de los procesos

agroindustriales y tiene varias propiedades. En la producción de arroz por cada tonelada con cascara aproximadamente 200kg es de cascarilla, que al incinerarse puede producir alrededor de unos 40kg de CCA (BUI 2001), esta ceniza contiene un porcentaje alto de sílice (SiO_2) que podría estar rondando en 96,5% (VALVERDE et al., 2007), la sílice se utilizaría como elemento puzolánico en el mortero o concreto ya que sería efectivo en la resistencia de la mezcla (RODRIGUEZ S. Y TIBUBAZO J., 2019) y así minimizar el consumo de cemento en los morteros para hacer reemplazos pequeños por CCA la cual puede favorecer la resistencia.

Este proyecto de investigación tiene como objetivo evaluar morteros elaborados a partir de ceniza de cascarilla de arroz como suplemento del cemento para su posible uso en la construcción; para ello, se generaron diferentes mezclas de mortero, incluyendo la preparación de mezclas en diferentes proporciones de cemento y ceniza, la incineración de la CA a diferentes temperaturas y tres diferentes tiempos de molienda, con el fin de determinar la proporción que pueda cumplir con los requisitos de calidad asociados a los parámetros de resistencia mecánica a la compresión NTC 220.

Los resultados de este estudio prometen aportar información valiosa sobre el uso sostenible de los residuos agrícolas en el sector de la construcción y allanar el camino hacia prácticas constructivas más ecológicas y económicas. El mundo se esfuerza por encontrar soluciones más respetuosas con el medio ambiente, una de estas es aprovechando el potencial de la CCA en los morteros que podría resultar en un paso importante hacia un futuro más sostenible.

1.1 Antecedentes

1.1.1 A Nivel Internacional

Valverde et al., (2007) realizaron un análisis comparativo de las principales propiedades fisicoquímicas de la cascarilla de arroz obtenida por investigaciones realizadas en las universidades de Canadá, California, RP China y de Ibagué

Colombia, donde reportaron el porcentaje obtenido de ceniza de cascarilla de arroz, el cual se encuentra en un rango de 18,2 - 20% en Canadá, de 20,26% en California, de 16,92% en China y 17,89% en Colombia a una temperatura de 1200 K.

Por otra parte, en Venezuela, Águila y Sosa en 2008, evaluaron el potencial de la ceniza de la cascarilla de arroz como material puzolánico diseñando mezclas de mortero con adiciones en 10,15,20,25 y 30% realizando así, el ensayo de la resistencia a la compresión según la ASTM C109 obteniendo valores de entre 242-315 kg/cm² a los 7 días y de 389-470 kg/cm² a los 28 días.

Así mismo, Quevedo en el 2012, en Guatemala, evaluó la ceniza de cascarilla de arroz calcinada, generada mediante el proceso de calcinación controlada, como puzolana artificial (ASTM C-311 y C-618), y como adición en cal para morteros plásticos y mezclas no plásticas, (ASTM C-593). En sus resultados presentó resistencia a la compresión del índice de fuerza con puzolana entre 130,69-134,28 kg/cm² a los 8 días y de 236,51-245,57 kg/cm² a los 28 días de fraguado, concluyendo que la adición de puzolana artificial, como la cáscara de arroz, determinó resultados satisfactorios de las propiedades físico-mecánicas de morteros.

Es de resaltar que, al calcinar la cáscara de arroz, se debe considerar la temperatura y tiempo requerido, ya que si se utilizan temperaturas demasiado altas la sílice se cristaliza y no se obtendrán las propiedades para su uso como puzolana activa, además de implementar un proceso de molienda que reduzca el tamaño de partículas para obtener la fineza adecuada y similar a la del cemento.

1.1.2 A Nivel Nacional

Novoa et al., (2016) en Bogotá-Colombia, presentaron una caracterización de la ceniza de cascarilla de arroz a un tamaño de partícula adecuado para su desempeño como agregado fino en adhesivos tipo mortero para colocación de baldosas cerámicas, analizando las propiedades físicas y químicas de los agregados

y el comportamiento mecánico de fluidez y resistencia a la tracción de los morteros obtenidos con reemplazo parcial de arena en porcentajes desde 5% hasta 25%, proponiendo así el empleo de los residuos de ceniza de cascarilla de arroz, los resultados muestran que un porcentaje de reemplazo de la arena por ceniza de cascarilla de arroz de 20% produce fuerzas de tracción comparables con las obtenidas para adhesivos comerciales.

Tolosa (2017) en la Universidad Nacional en Manizales-Caldas, evaluó la viabilidad de utilizar residuos de producción agroindustrial colombiana generados en grandes volúmenes como elemento de refuerzo de matrices de cemento hidráulico, haciendo uso de la cascarilla de arroz, obteniendo resistencias a la compresión de 13,8Mpa a los 7 días y de 10,7-27,76 MPa a los 28 días para mortero.

1.1.3 A Nivel Local

Prado Tovar et al. (2019), en Neiva-Huila evaluaron las propiedades físico-mecánicas del mortero a base de cemento al introducir cenizas de cascarilla de arroz como sustituto parcial del cemento, utilizando porcentajes de ceniza de 0,10,15,20 y 25 %, donde la resistencia a la compresión a los 7,14 y 28 días de curado fue entre 7,16-11,38 MPa para el 10%, de 4,35-8,16Mpa para el 15% y de 5,95-11,37 MPa para el 20% de ceniza concluyendo que es viable el uso de ceniza de cascarilla de arroz como sustituto parcial de cemento con fines no estructurales y/o ser aplicados en componentes de construcción liviano y de uso no portante.

1.2 Justificación

En esta época donde la producción en masa de productos alimenticios genera grandes cantidades de residuos, se tiene la necesidad de darles un manejo adecuado para así poder disminuirlos con el fin de que impacten al mínimo el medio ambiente. En el caso de la producción agrícola del arroz el desperdicio es la cascarilla y el tallo; el manejo que se le puede dar a la cascarilla de arroz es primordial para la

creación de novedosas propuestas en la utilización y reciclaje de esta, la cual posee diferentes usos como incrementar la materia orgánica en el suelo en forma de compost y abonos, el control de malezas en cultivos, también es usada como sustrato en hidroponía, entre otras.

Se estima que por cada 10 toneladas que se cultivan de arroz, se generan 2 toneladas de cascarilla, las cuales podrían ser aprovechadas en el ámbito de la construcción, a partir de la ceniza de cascarilla de arroz y utilizándola como sustituto parcial del cemento para el diseño de mezcla del mortero, esto con el fin de también disminuir las cantidades del cemento puesto que su producción es masiva, costosa, consume mucha energía, agota los recursos naturales y su elaboración tiende a generar grandes cantidades de contaminación (por tonelada de cemento generado se produce una tonelada de CO₂) y puede generar peligros asociados a la salud y bienestar en el mundo (Khan, Jabbar y otros, 2012).

Algunos estudios han demostrado que sus propiedades térmicas sustentan su uso como fuente de energía para la combustión en hornos, incluso a un nivel industrial, como sucede en empresas del sector arrocero de Cúcuta (Ramón, 2018) o otros usos como son en Perú que, sólo el 5% de la cascarilla de arroz es usado como combustible para hornos de secado de ladrillos en el departamento de Piura (J Sierra Aguilar, 2009)

Es posible relacionar las dos problemáticas mencionadas, producción masiva de cemento y el desecho agroindustrial del arroz (CA) (Prado Tovar et al., 2019) como forma de ser más conscientes con la degradación del medio que nos rodea y así poder disponer de nuestros recursos de una manera más inteligente y factible.

Es por esto que este trabajo de investigación busca minimizar el impacto ambiental aprovechando la actividad puzolánica de la sílice generada por la incineración del material de la cascarilla de arroz utilizada en muchos casos como combustible en aplicaciones, tanto domésticas como industriales, que mezclados en un mortero pueden generar grandes cambios, en las resistencias de las mezclas y el medio ambiente.

1.3 Objetivos

Evaluar las propiedades físico mecánicas del mortero con la adición parcial de la ceniza de cascarilla de arroz para el uso de este como material de diseño de mortero en soluciones constructivas.

1.3.1 Objetivos específicos

- Estimar propiedades físicas de la CCA teniendo en cuenta las variaciones de temperatura de incineración y los diferentes tiempos de molienda.
- Evaluar las propiedades físico mecánicas del mortero con la implementación de diferentes porcentajes (10%, 15% y 20%) de CCA con la variación de incineración de 500°C, 800°C y 1000°C y tiempo de molienda 1h, 2h y 3h.
- Realizar un diseño experimental con el fin de determinar los especímenes para posteriormente escoger el mejor en sus cualidades de resistencia del material.

Capítulo 2

2. Marco teórico

2.1 Cascarilla de arroz (CA)

La cascarilla de arroz es un subproducto que se genera durante el proceso de producción de arroz, es una capa externa que se extrae del grano de arroz y se separa durante el proceso de descascarillado. Debido a la baja degradabilidad natural, este residuo puede acumularse en el ambiente dando origen a graves problemas medioambientales (Aliaga Mendoza & Badajos Quispe, 2018). En Colombia, se produjeron alrededor de 912.267 toneladas de arroz mecanizado en el primer semestre del año 2022, de las cuales 135.420 toneladas de arroz corresponden al departamento del Huila con un (14.8%) siendo el segundo productor a nivel nacional después del departamento Tolima. (DANE, 2022).

La cascarilla de arroz es un tejido vegetal compuesto de celulosa y sílice (componente que ayuda a aumentar la resistencia). El uso de la cascarilla como combustible es un aporte importante a la conservación de los recursos naturales y al avance en el desarrollo de tecnologías limpias y económicas en la producción de arroz además de otros campos como el de la construcción. (Valverde et al., 2007)

2.2 Ceniza de cascarilla de arroz (CCA)

La ceniza de cascarilla de arroz se define como material puzolánico, producto de desperdicio natural de la producción del arroz, que tiene un alto contenido de sílice y que para que deje de ser un material orgánico se calcina a altas

temperaturas, donde se obtiene un material amorfo de formas complejas y con una estructura porosa, demandando un alto contenido de agua en la elaboración del concreto, y por ende generando resistencias bajas (Boanerges De La Pared Condo, 2011).

2.3 Cemento

El cemento es un material básico para la edificación y la ingeniería civil, su principal propiedad es la de formar masas pétreas resistentes y duraderas cuando se mezcla con áridos y agua. El endurecimiento de la mezcla ocurre transcurrido un cierto tiempo desde el momento en que se realiza la mezcla, lo que permite dar forma (moldear) la piedra artificial resultante. Estas tres cualidades (moldeable, resistente, duradera) hacen que los productos derivados del cemento tengan una gran aplicación en la construcción de infraestructuras y otros elementos constructivos. El cemento portland es un polvo finamente molido, compuesto principalmente por silicatos de calcio y, en menor proporción, por aluminatos de calcio, que, mezclado con agua se combina, fragua y endurece a temperatura ambiente, tanto al aire como bajo el agua. (San Juan Barbudo & Chinchón Yepes, 2014)

2.3.1 Cemento portland

El cemento portland (OPC) es producido a partir de la combinación de clinker pulverizado, constituido esencialmente por silicatos de calcio hidráulicos, y sulfato de calcio. Adicionalmente es permitido un porcentaje menor de adiciones. Este cemento debe cumplir los requisitos de composición química y propiedades físicas exigidos por la norma ASTM C150. Presenta 8 tipos de designación: tipo I para cuando no se requieren propiedades especiales del cemento, tipo II de uso general con moderada resistencia a los sulfatos y moderado calor de hidratación, tipo III de altas resistencias iniciales, tipo IV de bajo calor de hidratación, tipo V de alta resistencia a los sulfatos, y tipos IA, IIA, y IIIA, con los mismos usos que los tipos I, II y III, pero con incorporador de aire. (San Juan Barbudo & Chinchón Yepes, 2014).

2.4 Agregado fino

El agregado fino o arena se usa principalmente como llenante, además actúa como lubricante para el desplazamiento de los agregados gruesos dándole manejabilidad al concreto. La falta de arena se refleja mayormente en la aspereza de la mezcla y un exceso de arena demanda mayor cantidad de agua para obtener un asentamiento determinado, ya que entre más arena tenga la mezcla se vuelve más cohesiva y al requerir mayor cantidad de agua, esta necesitará mayor cantidad de cemento para conservar una determinada relación agua cemento. (Jaime & Portocarrero, 2018).

2.5 Diseño de mezclas

Se le conocen como las proporciones dadas para la realización de cualquier tipo de concreto o mortero dependiendo las características de los materiales con el fin de obtener resultados para sus usos tales como la resistencia necesaria, esto puede influir dependiendo varios factores tales como: la manejabilidad, la resistencia, la pureza, el tiempo entre otros.

2.6 Mortero

El mortero es una variedad del concreto muy utilizado en muchas obras universales y se lo define como una mezcla de agregado mineral, agregado fino, agua y ciertos aditivos. Es muy común en el uso de pegante para diferentes elementos de la construcción como son piedras, ladrillos bloques o simplemente para rellenar espacios y enlucir. (Alejandre, 2019; Sánchez-de-Guzmán, 2001).

2.7 Curado

El curado es el proceso por el cual el concreto elaborado con cemento hidráulico madura y endurece con el tiempo, como resultado de la hidratación continua del cemento en presencia de suficiente cantidad de agua y de calor (ACI Committee

308,2001). Este procedimiento se realiza en el concreto para garantizar las condiciones óptimas de humedad y temperatura necesarias para que el concreto desarrolle su resistencia potencial (compresión y flexión), se reduzca la porosidad de la mezcla, entre otros factores (SIKA, s.f.).

2.8 Cubos de mortero

Según la NTC 220:2022 se deben preparar dos o tres cubos de una bachada de mortero para cada periodo o edad de ensayo especificada. Los moldes para las sondas cúbicas de 50 mm o 50,8 mm no deben tener más de tres compartimientos y deben ser separables en no más de dos partes sin incluir la base. Estos deben estar dotados de dispositivos que aseguran una unión perfecta y rígido. Deben ser fabricados de metal duro no atacable por las mezclas de cemento.

2.9 Módulo de finura del CCA

Se empleó el método de prueba estándar para determinación de finura a través de la ASTM C184 -94 mediante el tamiz No. 200 (75 μ m) para especificaciones del ensayo con la muestra de CCA posteriormente a su proceso de molienda.

2.10 Módulo de finura de la arena

Fue el método de ensayo utilizado para la distribución de los tamaños de las partículas que componen los agregados finos, a través de un proceso de tamizado basado en la NTC 77:2018. Algunas especificaciones para agregados que se referencian en este método de ensayo contienen requisitos de gradación que abarcan tanto la fracción gruesa como la fina.

2.11 Análisis granulométrico

Teniendo relación con la NTC 77 se realizó el análisis granulométrico con respecto a la NTC 174:2018, con el objetivo

de definir la calidad del agregado, su tamaño máximo y otros requisitos de gradación específicos para determinar nuestra proporción de material fino en el diseño de mezclas.

2.12 Contenido de humedad

Se realizó este ensayo por medio de la NTC 1776:2019 con el fin de saber el porcentaje de humedad presentado en nuestro agregado fino y de nuestra muestra de CCA.

2.13 Ensayo de fluidez

Ensayo basado en la NTC5784: 2021 que tiene como objetivo determinar la fluidez de morteros de cementos hidráulicos y de morteros que contienen materiales cementantes distintos al cemento hidráulico, esta es comúnmente utilizada en métodos de ensayos que requieren que el mortero tenga un contenido de agua tal que proporcione un valor de fluidez especificado.

2.14 Masa unitaria suelta y compactada

Norma de la NTC92:2019 que se usó para conocer la relación entre masa/volumen de los materiales, teniendo en cuenta la relación de vacíos que se presentaron en cada una de ellas para el diseño de mezclas.

2.15 Densidad y porcentaje de absorción

Se realizó mediante la NTC 237:2020 con el fin de determinar la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción de agregados finos para la realización de nuestro diseño de mezclas.

Capítulo 3

3. Metodología

3.1 Tipo de investigación

Es su libro la metodología de la investigación, Roberto Hernández Sampieri da a conocer tres tipos de enfoques para la investigación, los cuales son el cuantitativo, cualitativo y mixto. La presente investigación tiene un enfoque cuantitativo, que representa un conjunto de procesos secuenciales y probatorios, ya que inicia con una idea que una vez delimitada, muestra los objetivos y genera cuestionamientos, con estas dudas planteadas se realiza una revisión de literatura, se visualiza el alcance del estudio y así se genera la hipótesis con la definición de variables, planteando el desarrollo de la investigación, se inicia definiendo y seleccionando las muestras para luego desarrollar y generar los resultados o datos que arroja la investigación, finalizando así con el análisis de los datos y haciendo un reporte de la investigación.

3.2 Trabajo en Campo



Figura 3-1: Recolección de la cascarilla de arroz

Como se evidencia en la figura 3-1 se recolectó la materia prima (CA) en el municipio de Campoalegre, Huila - Colombia, donde se obtuvo una muestra de 50 kg, suministrada por la empresa comercializadora Frey Díaz S.A.S que posteriormente se dispuso en el laboratorio de ciencias básicas de la facultad de educación de la Universidad Surcolombiana para su calcinación.

3.3 Trabajo en laboratorio

3.3.1 Manejo de la materia prima



Figura 3-2: Calcinación en mufla de la CA.

Como se muestra en la figura 3-2, se realizó el procedimiento de calcinación de la CA en las muflas por medio de crisoles del Laboratorio de Ciencias Básicas de la Universidad Surcolombiana a temperaturas de 500, 800 y 1000°C teniendo como resultado la ceniza de cascarilla de arroz (CCA).

Posteriormente se llevaron las muestras de CCA con diferentes temperaturas de incineración para el laboratorio de Construcciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Surcolombiana, donde se ejecutó el proceso de molienda con ayuda del molino de bolas con tiempo de actividad de 1, 2 y 3 horas respectivamente, para cada una de las muestras como se muestra en la figura 3-3.



Figura 3-3: Molienda de la CCA.

3.3.2 Caracterización física de la CCA y agregado fino.

Los ensayos que fueron realizados son los siguientes:

3.3.2.1 Análisis granulométrico



Figura 3-4: Tamizaje de la arena.

En la figura 3-4 se puede observar el proceso de tamizado de la arena, lo que ayuda a la obtención de la granulometría.

Se realiza la granulometría como se estipula en la NTC 174:2018 con una muestra inicial de arena de 1500 gr, la cual se deja en la tamizadora eléctrica por aproximadamente 10 minutos, la arena pasa por los tamices requeridos, terminado el tamizaje se procede a hacer los cálculos requeridos.

El cálculo del porcentaje retenido se realiza por medio de la ecuación 1.

$$\%retenido = \frac{W \text{ retenido}}{W \text{ total muestra}} * 100 \quad (1)$$

El cálculo del porcentaje retenido acumulado se realiza por medio de la ecuación 2.

$$\%retenido \text{ acumulado} = n + (n - 1) \quad (2)$$

El cálculo del porcentaje que pasa se realiza por medio de la ecuación 3.

$$\%pasa = (1 - \%retenido \text{ acumulado}) * 100 \quad (3)$$

W retenido: peso suelo retenido en cada tamiz [gr]

W total muestra: peso inicial de la muestra de agregado evaluada [gr]

n: valor de porcentaje retenido [%]

n-1: valor de porcentaje retenido inmediatamente anterior [%]

El análisis granulométrico que se muestra en la tabla 3-1 corresponde a la arena que se utilizó en la fundición de los cubos de mortero. Con los resultados de la granulometría se obtuvo el módulo de finura del material.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO					
TAMIZ		Peso retenido (gr)	Peso retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante acumulado (%)
Pulg.	mm				
3/8"	9,5	0	0,00	0,00	100,00
N° 04	4,75	0	0,00	0,00	100,00
N° 08	2,36	126,5	8,43	8,43	91,57
N° 16	1,18	431,5	28,77	37,20	62,80
N° 30	0,6	313	20,87	58,07	41,93
N° 50	0,3	385	25,67	83,73	16,27
N° 100	0,15	201	13,40	97,13	2,87
N° 200	0,075	35	2,33	99,47	0,53
FONDO		8	0,53	100,00	0,00
TOTAL		1500	100,00	-	-

Tabla 3-1: Análisis granulométrico de la arena.

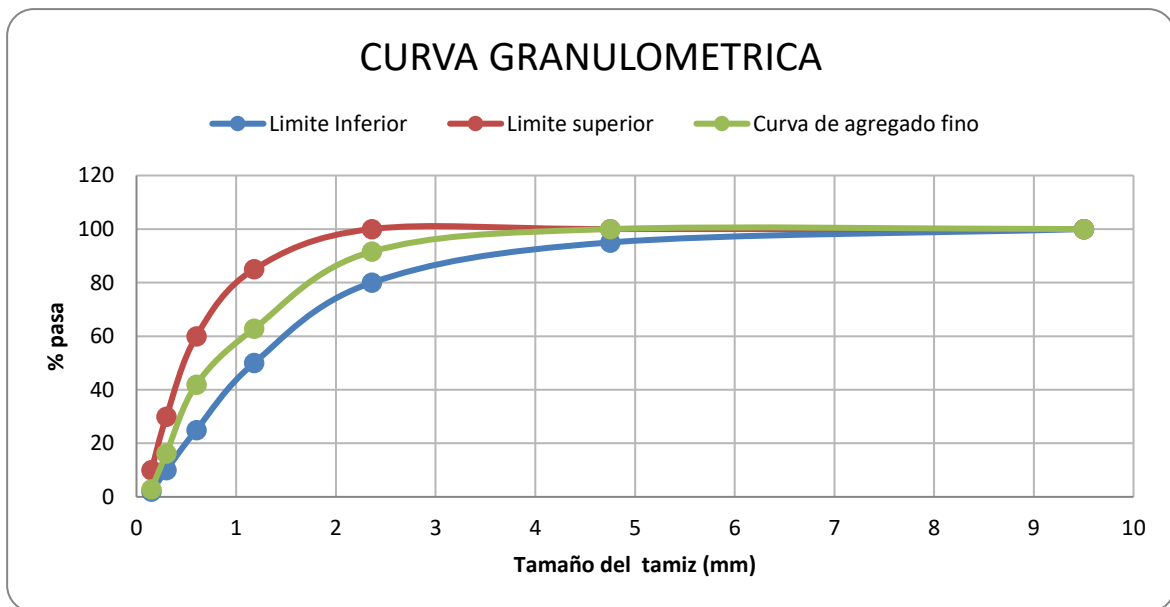
La comprobación de los resultados granulométricos propuestos por la NTC 174 para agregado fino se representa en la tabla 3-2 donde se evidencia que cumple con los requisitos propuestos por la norma.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO					
TAMIZ		Límite Inferior	Pasante acumulado (%)	Límite superior	Verificación
Pulg.	mm				
3/8"	9,5	100	100,00	100	CUMPLE
N° 04	4,75	95	100,00	100	CUMPLE

N° 08	2,36	80	91,57	100	CUMPLE
N° 16	1,18	50	62,80	85	CUMPLE
N° 30	0,6	25	41,93	60	CUMPLE
N° 50	0,3	10	16,27	30	CUMPLE
N° 100	0,15	2	2,87	10	CUMPLE

Tabla 3-2: Verificación del porcentaje que pasa según NTC 174.

La grafica 3-1 muestra la verificación de la granulometría, la curva del agregado fino utilizado está dentro de los límites permitidos por la norma.



Grafica 3-1: Curva granulométrica del agregado fino con sus límites según la NTC 174.

3.3.2.2 Módulo de finura de la arena

El módulo de finura se obtuvo al sumar los porcentajes acumulados en los tamices del N°4 al N°100 y dividiéndose por cien como se muestra en la ecuación 4:

$$\text{Módulo de Finura} = \frac{\sum \% \text{retenido acumulado } 3/8" \text{ a } 100}{100} \quad (4)$$

Se determina que el agregado fino cumple con el rango 2,3 y 3,1 establecido por la NTC 174.

$$MF\ arena = \frac{(0 + 8,43 + 37,2 + 58,07 + 83,73 + 97,13)\%}{100} = 2,85$$

3.3.2.3 Contenido de humedad

Se halló el contenido de humedad con ecuación 5, pero para temas prácticos al momento de la elaboración de los cubos de mortero se secó toda la arena a utilizar:

$$Cont. Humedad = \frac{Msh - Mss}{Mss} * 100 \quad (5)$$

Msh = masa del suelo húmedo [gr]

Mss = masa del suelo seco [gr]

3.3.2.4 Masa unitaria suelta y compacta

La obtención de la masa unitaria suelta y compacta se realizó por medio de la NTC92:2019 llenando tres veces de arena un molde de cilindro y promediando los resultados, a diferencia de la masa suelta, la compacta se debe llenar por tercios y en cada uno compactar con la barra especificada en la norma.

La tabla 3-3 contiene las dimensiones del cilindro empleado para la obtención de la masa suelta y compacta.

Cilindro (molde)	
Altura (cm)	16,3
Diámetro (cm)	10
Volumen (cm ³)	1280,20
Masa (gr)	4031,5

Tabla 3-3: Medidas del molde.



Figura 3-5: Llenado del molde para hallar la masa suelta.

La figura 3-5, muestra cómo se agrega la arena en el cilindro donde se hallará su masa volumétrica suelta.

En la tabla 3-4 muestran los tres datos tomados para hallar el promedio de la masa unitaria suelta.

SUELTA	
molde + material (gr)	material
6142,5	2111
6125,5	2094
6122,5	2091
PROMEDIO	
6130,17	2098,67
Masa volumétrica (gr/cm ³)	1,64

Tabla 3-4: Resultado de la masa unitaria suelta.



Figura 3-6: Llenado y compactación del molde para hallar la masa compacta.

En la figura 3-6 se evidencia la compactación de la arena con la varilla en el cilindro donde se hallará su masa volumétrica compacta.

$$\text{Masa unitaria} = \frac{(\text{masa suelo mas el molde [g]} - \text{masa del molde [g]})}{\text{volumen del molde [cm}^3\text{]}} \quad (6)$$

En la tabla 3-5 muestran los tres datos tomados para hallar el promedio de la masa unitaria compacta.

COMPACTA (gr)	
molde + material (gr)	material (gr)
6298,5	2267
6294	2262,5
6288	2256,5
PROMEDIO	
6293,50	2262,00
Masa volumétrica (gr/cm ³)	1,77

Tabla 3-5: Resultado de la masa unitaria compacta.

3.3.2.5 Densidad y porcentaje de absorción para agregado fino

La arena se deja sumergida por 24 horas para saturarla, luego se saca, se deposita en una bandeja y se seca hasta que, al retirar el cono especificado en la norma (NTC 237:2020), forma el siguiente patrón:



Figura 3-7: Masa de arena SSS.

La figura 3-7 deja ver la formación del morro de arena después de que se retira el cono, lo que nos indica que la arena está SSS, ya con esta arena se procede a tomar las masas requeridas.

Después de secada la arena SSS con un peso inicial de 500gr queda una masa final de 493.5 gr, lo que nos indica la cantidad de pérdida de humedad del agregado en la figura 3-8.



Figura 3-8: Masa del material seco.

Masa material SSS (gr)	500
Masa probeta con agua (gr)	817
Masa probeta con agua y muestra SSS (gr)	1123,5
Masa material seca horno (gr)	493,5

Tabla 3-6: Masas utilizadas para determinar la densidad.

La tabla 3-6 muestra la determinación de las masas requeridas para la obtención de las densidades.

$$D_{aparente} \left[\frac{g}{cm^3} \right] = \frac{A}{B + S - C} \quad (8)$$

$$D_{SSS} \left[\frac{g}{cm^3} \right] = \frac{S}{B + S - C} \quad (9)$$

$$Porcentaje \ de \ absorción = \frac{S - A}{A} * 100 \quad (10)$$

Donde:

A: masa de a muestra de ensayo secada al horno

B: masa del picnómetro lleno con agua

S: masa de la muestra saturada y superficialmente seca

C: masa del picnómetro con la muestra y el agua hasta la marca de calibración

Densidad aparente (gr/cm ³)	2,55
Densidad aparente SSS (gr/cm ³)	2,58
Densidad Nominal (gr/cm ³)	2,64
% Absorción	1,32

Tabla 3-7: Densidades y porcentaje de absorción de la arena.

Los resultados de las densidades y del porcentaje de absorción se evidencia en la tabla 3-7.

3.4 Módulo de finura de la CCA



Figura 3-9: Tamizado de la CCA ya molida.

La CCA se deja 24 horas en el horno para eliminar cualquier humedad que esta tenga, el tamizado tiene que pasar por el tamiz 200 (figura 3-9) para poder hallar el módulo de finura del material y así poder conocer las diferencias entre tiempos de molienda como lo especifica la ASTM C184 -94.

$$F = \frac{R}{50} \times 100$$

F es el módulo de finura.

R es la masa que no pasa por el tamiz 200.

3.5 Diseño de la mezcla

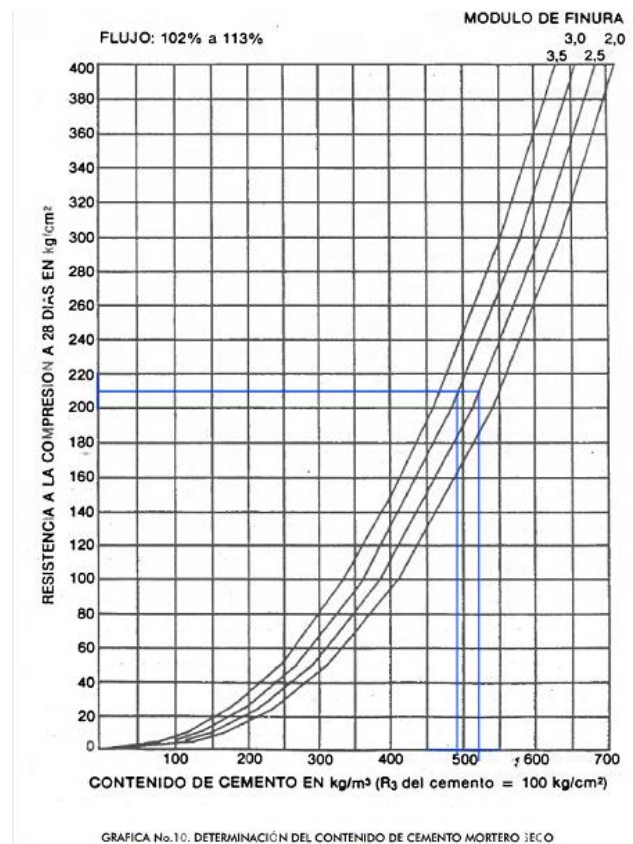
Para el diseño de mezcla del mortero se utilizó la metodología de Gutiérrez de López (2003), el cual nos da con una serie de pasos.

3.5.1 Contenido de cemento:

Determinado tipo de mortero el cual será seco, se realizó el cálculo total de cemento para un diseño de una resistencia

esperada a los 28 días de 210 kg/cm^2 ($20,5 \text{ MPa}$), también se debe tener en cuenta el módulo de finura de la arena, sacando así el contenido total de cemento necesario.

La gráfica 3-2 muestra el trazo de las líneas para un mortero de 210 kg/cm^2 y un módulo de finura de la arena de 2,85, lo que dará dos resultados los cuales se interpolarán.



Gráfica 3-2: Determinación del contenido de cemento mortero seco.

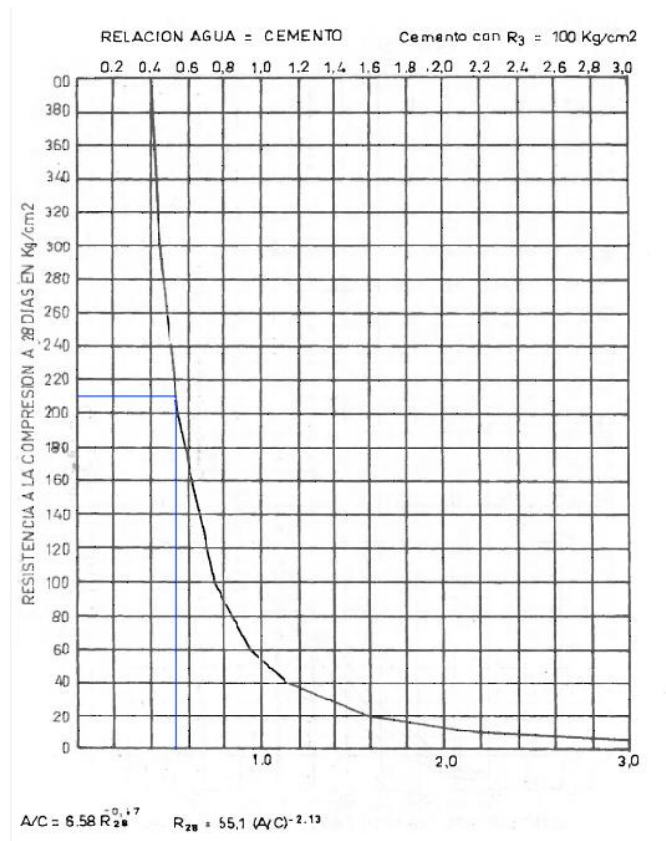
En la tabla 3-8 muestran la interpolación realizada para hallar la cantidad de cemento a utilizar en el diseño de la mezcla el cual nos indica $513,77 \text{ Kg por m}^3$.

Para 2,5	522,83
para 3	492,64
interpolamos para 2,85	513,77

Tabla 3-8: Interpolación para sacar masa del cemento.

3.5.2 Contenido de agua

Para el siguiente paso se debe utilizar la gráfica 3-3 para hallar la relación agua-cemento (A/C) y así posteriormente calcular la cantidad de agua total requerida en la mezcla de mortero, se debe tener la resistencia esperada a los 28 días y la cantidad de cemento la cual se midió en el paso anterior.



Grafica 3-3: Determinación de la relación A/C.

La tabla 3-9 muestra la cantidad de agua obtenida por la gráfica anterior gracias a la relación A/C que multiplicado por la masa de cemento mostrada anteriormente se halla el agua requerida.

Cantidad de agua	
A/C	0,47
Agua (L) *m ³	241,47

Tabla 3-9: Cuantía del agua.

3.5.3 Contenido de arena

Para calcular el volumen de arena se debe contar con los siguientes elementos, densidad del cemento, densidad de la arena SSS, el peso unitario suelto de la arena, el volumen de agua en m³ por m³ y el volumen de aire incluido.

$$V_{\text{cemento}} = \frac{\text{Densidad del cemento}}{\text{Cemento Kg por m}^3}$$

$$V_{\text{arena}} = 1 - (V_{\text{agua}} + V_{\text{cemento}} + V_{\text{aire}})$$

$$M_{\text{arena}} = V_{\text{arena}} * \text{Densidad de la arena SSS}$$

$$M_{\text{unitaria suelta arena}} = M_{\text{arena}} / \text{Peso unitario suelto de la arena}$$

En la tabla 3-10 se halló la masa de la arena requerida para un metro cúbico de arena donde influyeron los factores que se muestran en la tabla, la cual nos da 1438,55kg por metro cúbico.

PASO 3	Contenido de arena
Densidad arena SSS (gr/cm ³)	2,58
Densidad cemento (gr/cm ³ - Kg/m ³)	3080

Peso unitario suelto de la arena (gr/cm ³)	1,64
Vol. Cemento * m ³ de mortero (m ³)	0,17
Vol. agua * m ³ de mortero (L - m ³)	0,241
Vol. Aire incluido (m ³)	0,035
Vol. arena * m ³ de mortero (m ³)	0,56
Masa arena * m ³ de mortero (Kg)	1438,55
Vol. Arena con masa unitaria suelta (m ³)	0,88

Tabla 3-10: Cuantía de la arena.

3.5.4 Determinación de fluidez

Se determina la fluidez de la mezcla por medio de la NTC 5784 : 2021 colocando en el molde una capa de mortero de aproximadamente 25 mm de espesor y se apisona 20 veces con el apisonador. La presión del apisonador debe ser la suficiente para asegurar un llenado uniforme del molde; el cálculo se obtiene mediante la siguiente ecuación 15:

$$\% \text{ De Fluidez} = \left(\frac{A}{\text{Diametro interno de la muestra}} \right) * 100 \quad (15)$$

A = promedio de las lecturas menos el diámetro interno del molde[cm]



Figura 3-10: Determinación de fluidez.

La medición del diámetro de la muestra esparcida después de los 25 golpes para la determinación de la fluidez se puede evidenciar en la figura 3-10.

ENSAYO DE FLUIDEZ			
Diámetro (cm)	Diámetro promedio (cm)	Diámetro interno molde (cm)	fluidez (%)
21,2	21,35	10,16	110,14
21,6			
21,1			
21,5			

Tabla 3-11: Fluidez del mortero sin ceniza.

En la tabla 3-11, se evidencian las cuatro mediciones del diámetro y su promedio, también muestra que para el diseño de mezcla la fluidez es del 110,14%.

3.5.5 Corrección por humedad de la arena y de la CCA

Antes del mezclado se introducen cada uno de los materiales en el horno con el fin de retirar los excesos de humedad que pueda presentarse por condiciones tales como las atmosféricas

y así mantener el diseño de mezcla, la arena y la CCA se trabajaron con 0% de humedad por lo que para la arena, se hizo corrección de acuerdo a su absorción y para la CCA se realiza un ensayo de fluidez con cada uno de los tratamientos, y así agregar agua hasta conseguir igualar la fluidez determinada en el punto 3.5.4 la cual fue para el diseño de mezcla.

3.5.6 Elaboración del diseño de muestreo

Para el desarrollo de la investigación se plantea un diseño de un anova multifactorial, de tres factores como se muestra en la tabla 3-12:

1. Temperatura de incineración: con tres niveles, 500°C, 800°C y 1000°C
2. Tiempo de molienda: con tres niveles, 1, 2 y 3 horas respectivamente
3. Porcentaje de remplazo de CCA por cemento: 10%, 15% y 20% respectivamente.

La variable de repuesta es la resistencia a la compresión.

Factor	Nivel	Variable de respuesta
Temperatura	500°C	Esfuerzo a compresión
	500°C	
	1000°C	
Tiempo	1 h	
	2 h	
	3h	
Porcentaje	10%	
	15%	
	20%	

Tabla 3-12: Factores y niveles para el muestreo.

De lo anterior se pueden identificar los tratamientos o interacciones entre los factores dando un total de 27 como se

muestra en la tabla 3-13, cada tratamiento se identifica con la siguiente nomenclatura.

$$T\ t:tm:ps$$

T = tratamiento.

t = temperatura de incineración.

tm = tiempo de molienda.

ps = porcentaje de sustitución.

Interacciones entre factores (tratamientos)
T 500:1:10
T 500:1:15
T 500:1:20
T 500:2:10
T 500:2:15
T 500:2:20
T 500:3:10
T 500:3:15
T 500:3:15
T 800:1:10
T 800:1:15
T 800:1:20
T 800:2:10
T 800:2:15
T 800:2:20
T 800:3:10
T 800:3:15
T 800:3:20
T 1000:1:10
T 1000:1:15
T 1000:1:20
T 1000:2:10
T 1000:2:15
T 1000:2:20
T 1000:3:10
T 1000:3:15
T 1000:3:20

Tabla 3-13: Tratamientos

Para la elaboración de las probetas se tuvo en cuenta los tres factores de la CCA, los cuales fueron temperatura de incineración, tiempo de molienda y porcentajes de reemplazo. Para cada uno de los 27 tratamientos se elaboraron 9 cubos de mortero, de los cuales 3 se fallan a los 7 días de curado, 3 a los 14 días de curado y 3 a los 28 días de curado, para un total de 243 cubos de mortero para todos los tratamientos.

Teniendo como punto de partida el diseño de mezcla, se elaboran 9 cubos testigos (0% de CCA), para fallar 3 a los 7, 14 y 28 días de curado.

3.5.7 Elaboración de cubos de mortero



Figura 3-11: Fabricación de cubos de mortero.

Para el proceso de fundición se manejaron porcentajes de CCA con las diferentes temperaturas de incineración y los diferentes tiempos de molienda como sustituyente del material cementante de tal forma que se cambie un 10%-15%-20% del total del cemento por la CCA, se mezclan la arena, cemento, agua y la CCA para tener el mortero, luego se procede al llenado de los moldes según lo dicta la norma NTC 220, los cubos de morteros se dejan en reposo como lo muestra la figura 3-11 y a las 24 horas se desencofran para después sumergirlos en agua para su fraguado.

3.5.8 Prueba de compresión a los cubos de morteros

La figura 3-12 nos muestra el ensayo a compresión que se realizó para conocer la resistencia de cada cubo de mortero.



Figura 3-12: Prueba de compresión.

Luego de cumplir el tiempo de fraguado de cada una de las muestras se realizó la prueba a compresión de los cubos, se comienza con el secado de cada uno de los elementos a fallar, posteriormente se realiza el pesaje de los elementos y así llevarlos a fallar en la prensa hidráulica.

Se inicia el proceso sometiendo los cubos a la carga de compresión por la prensa hidráulica hasta el fallo que posteriormente la máquina arroja el registro de resistencia en MPa de cada uno de los cubos.

Capítulo 4

4. Resultados y análisis

4.1 Propiedades físicas de la CCA

4.1.1 Incineración de la CA

La incineración de la cascarilla de arroz en la mufla se presenta en tres diferentes temperaturas 500°C, 800°C y 1000°C, la cual indica una reducción de su masa después del proceso en la CCA.

En la tabla 4-1, muestra que en cada temperatura se tomaron dos muestras de CA, la cuales se incineraron para obtener la CCA, luego se pasaron a porcentajes para conocer de manera general el rendimiento de la CA, se evidencia que entre más temperatura mayor es la reducción de la masa.

REDUCCIÓN DE LA CA A CCA					
TEMPERATURA °C	PESO CA (gr)	PESO CCA (gr)	DIFERENCIA	%	% PROM
500	21,7928	5,3074	16,4854	75,65	75,39
	9,5337	2,3703	7,1634	75,14	
800	16,747	2,2566	14,4904	86,53	85,09
	9,7656	1,5968	8,1688	83,65	
1000	16,0931	2,2657	13,8274	85,92	86,02
	12,1663	1,6889	10,4774	86,12	

Tabla 4-1: Porcentajes de reducción de masa de la CA a CCA.

4.1.2 Módulo de finura de la CCA

El módulo de finura hallado para cada muestra de molienda de la CCA con la prueba del tamiz 200 se evidencia en la tabla 4-2, en la cual podemos ver la masa retenida en el tamiz 200 para cada CCA y el módulo de finura correspondiente. Se puede evidenciar que en temperaturas de incineración inferiores teniendo en cuenta los mismos tiempos de molienda que las temperaturas superiores, el módulo de finura es mayor.

Módulo de finura			
Temperatura	Tiempo de molienda	Retenido #200	finura
500°C	1h	23,7	47,4
	2h	19,3	38,6
	3h	17,4	34,8
800°C	1h	19,6	39,2
	2h	17,7	35,4
	3h	16,7	33,4
1000°C	1h	14,6	29,2
	2h	13,2	26,4
	3h	12,5	25

Tabla 4-2: Módulo de finura de la CCA.

4.2 Fabricación de Cubos de mortero.

4.2.1 Cantidad de arena, cemento, agua y CCA.

La determinación de las cantidades de arena, cemento y agua requerida para la fabricación de cubos de mortero se halla según el método gráfico planteado por Gutiérrez de López (2003).

En la tabla 4-3, se evidencian las cantidades de cada elemento para la fabricación de 9 cubos de mortero necesarias para cada tratamiento y cubo testigo, teniendo en cuenta el diseño de mezcla hallado anteriormente. Para los diferentes tipos de

mezcla con adiciones de CCA se sacaron los porcentajes correspondientes para cada sustitución.

% DE CCA	CENIZA (gr)	CEMENTO (gr)	AGUA (gr)	ARENA (gr)
0	0	642,6	325,7	1775,4
10	64,26	578,30	325,7	1775,4
15	96,38	546,17	325,7	1775,4
20	128,51	514,04	325,7	1775,4

Tabla 4-3: Masa requerida para 9 cubos de mortero por cada porcentaje de sustitución.

Al momento de hacer las mezclas con sustitución de CCA se debe agregar agua extra por la absorción que tiene la ceniza, para esto se halla con la fluidez, teniendo como referente los 110,14% de fluidez de la mezcla dada por el diseño (sin CCA). Los porcentajes que se muestran en la tabla 4-4 es la cantidad de agua adicional que se agrega a cada tipo de mezcla con respecto a los 325,7 gr de la tabla anterior (Tabla 4-8) con porcentajes de sustitución de CCA.

Temperatura	tiempo	10%	15%	20%
		Porcentaje extra de agua (%)		
500°C	1h	8,33	10,59	13,97
	2h	9,12	12,39	15,32
	3h	10,13	13,97	16,57
800°C	1h	19,61	26,38	32,03
	2h	23,34	30,90	35,52
	3h	26,04	34,73	39,13
1000°C	1h	20,74	28,08	34,28
	2h	24,13	31,01	36,20
	3h	26,83	34,28	38,12

Tabla 4-4: Porcentaje extra de agua para cada tipo de mezcla.

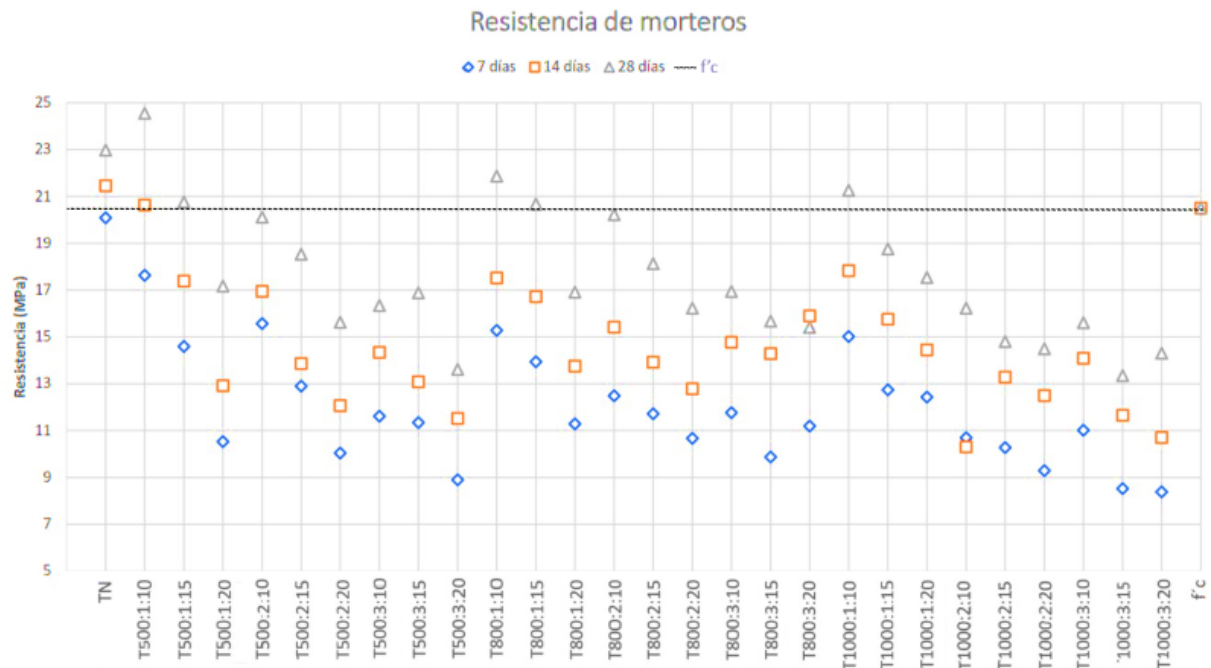
4.2.2 Esfuerzo a la compresión

La tabla 4-5 se observa el esfuerzo promedio a los 7, 14 y 28 días de las mezclas de remplazo parcial de CCA a 500°C, 800°C y 1000°C con tiempos de molienda de 1, 2 y 3 horas, los esfuerzos totales de cada cubo de mortero fabricado está en el anexo A tabla A-1.

T °C	Tiempo de molienda (h)	RESISTENCIAS								
		10%			15%			20%		
		Días de rotura								
		7	14	28	7	14	28	7	14	28
500	1	17,6	20,6	24,5	14,6	17,4	20,8	10,5	12,9	17,2
	2	15,6	16,9	20,1	12,9	13,9	18,5	10,0	12,1	15,6
	3	11,6	14,3	16,3	11,3	13,1	16,9	8,9	11,5	13,6
800	1	15,3	17,5	21,9	13,9	16,7	20,7	11,3	13,8	16,9
	2	12,5	15,4	20,2	11,7	13,9	18,1	10,7	12,8	16,2
	3	11,8	14,8	16,9	9,9	14,3	15,7	11,2	15,9	15,4
1000	1	15,0	17,8	21,3	12,7	15,8	18,8	12,4	14,4	17,5
	2	10,7	10,3	16,2	10,3	13,3	14,8	9,3	12,5	14,5
	3	11,0	14,1	15,6	8,5	11,7	13,3	8,4	10,7	14,3
Cubo testigo con 0% de CCA		7 días			14 días			28 días		
Promedio		20,05			21,45			22,98		

Tabla 4-5: Resultados promedio de esfuerzo a la compresión MPa.

4.2.3 Análisis comparativo de las mezclas con CCA



Gráfica 4-1: Comparación de morteros.

A partir de la gráfica 4-1 se presenta el comportamiento de las resistencias a la compresión obtenidas a los 7 - 14 - 28 días con los porcentajes de CCA a 10 - 15 - 20 y con temperaturas de 500 - 800 - 1000°C, en donde se puede observar que las muestras que cumplen con la resistencia esperada según el diseño de mezcla $f'c$ (20,5 MPa) son las del 10% con una molienda de 1 hora para todas las temperaturas mencionadas, también los cubos con 1 Hora de molienda con 15% de CCA a 500 y 800°C. Teniendo en cuenta que para moliendas de 1 hora el módulo de finura es mayor, se evidencia que estos módulos tienen una resistencia superior que para módulos de finura menores (moliendas de 2 y 3 horas).

Se percibe una dispersión de las resistencias con sustituto de CCA a comparación del testigo, esto se debe a que la velocidad de fraguado disminuye levemente en las muestras con adición de ceniza.

Además, es de destacar que el tratamiento con temperatura de 500°C, 1h de molienda y 10% de CCA que sobrepasó los cubos testigos (22,98 MPa) obteniendo una resistencia a los 28 días de 24,55 MPa.

4.3 Análisis de varianza multifactorial

Se realizó el análisis de varianza multifactorial en el software R, con la interfaz gráfica RStudio (Versión 1.3.1073, © 2009–2020 RStudio, PBC).

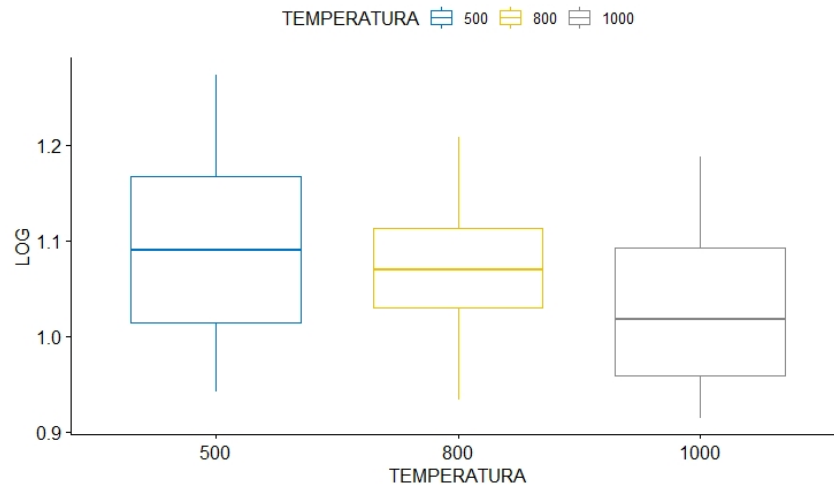
4.3.1 Análisis multifactorial a los 7 días.

4.3.1.1 Revisión de los datos

Al verificar la normalidad de los datos de la variable de respuesta esfuerzo a compresión por el método de shapiro_test da un p-value de 0.0175, indicando un valor inferior a 0.05, rechazando la hipótesis nula de que no hay diferencia entre las medias de los esfuerzos a compresión y se concluye que si hay diferencias significativas, razón por la cual se transforman los datos a la función logaritmo dando como resultado un p-value de 0.245, aceptando la hipótesis nula de que no hay diferencia entre las media de los esfuerzos a compresión.

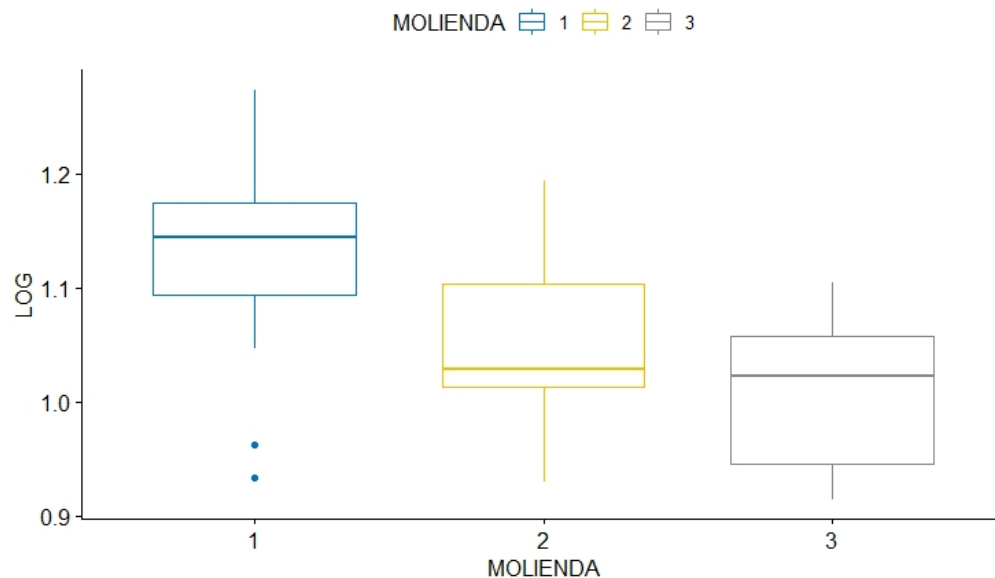
En cuanto el valor del sesgo fue de 0.1736699, donde se utilizó la función Skewness, como el valor se encuentra entre 0.5 y -0.5 se encuentra levemente sesgado, es positivo lo que indica que los valores se encuentran ligeramente por encima de la media.

4.3.1.2 Gráficos por factores



Grafica 4-2: Gráfico del comportamiento factor temperatura a los 7 días.

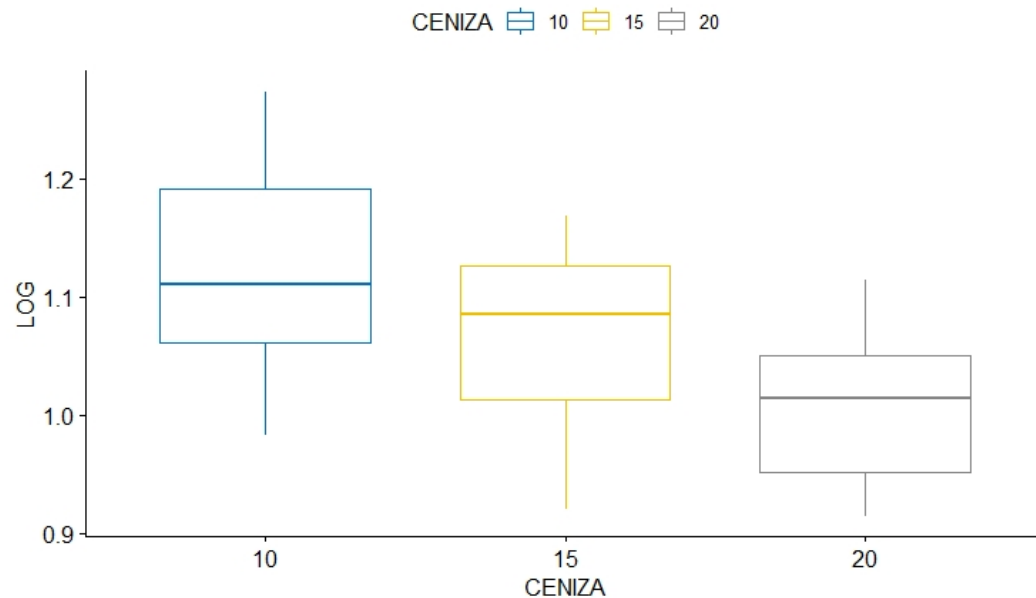
En la gráfica 4-2, se puede observar cómo los valores más altos de LOG-resistencia para los 7 días se obtienen para las cenizas a los 500°C siguiendo en su orden las de 800°C y 1000°C, aunque para este último se presenta una disminución más alta, ya que pasa de 1.0899 (500°C) a 1.0175 (1000°C)



Grafica 4-3: Tiempos de molienda a los 7 días.

En la gráfica 4-3, se muestran los tiempos de moliendas que van desde 1, 2 hasta 3 horas. Se puede evidenciar que entre

más tiempo de molienda menor es el LOG resistencia a la compresión, como pasa de 1.1467(1 hora) a 1.0233(3 horas).



Grafica 4-4: Porcentaje de ceniza a los 7 días.

En la gráfica 4-4, se muestran los porcentajes de ceniza utilizados en las mezclas, se evidencia como a mayor porcentaje usado en la mezcla el LOG-resistencia a la compresión del mortero disminuye, pasando de 1.1103(10%) a 1.0278(20%).

4.3.1.3 Anova multifactorial

FACTOR	Df	Sum	Mean	F value	Pr(>F)
CENIZA	2	0,173104	0,086552	88,4638	< 2,2e-16 ***
TEMPERATURA	2	0,049497	0,024748	25,2949	1,772e-08 ***
MOLIENDA	2	0,207286	0,103643	105,932	< 2,2e-16 ***
CENIZA: TEMPERATURA	4	0,036904	0,009226	9,4297	7,433e-06 ***
CENIZA: MOLIENDA	4	0,014073	0,003518	3,596	0,0113657 *
TEMPERATURA: MOLIENDA	4	0,023482	0,005871	6,0002	0,0004537 ***

CENIZA: TEMPERATURA: MOLIENDA	8	0,024425	0,003053	3,1206	0,0056961 **
Residual	54	0,052833	0,000978		
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

Tabla 4-6: Anova multifactorial entre factores a los 7 días.

Para el análisis de varianza multifactorial se utilizó la suma de cuadrados tipo II, para probar hipótesis, en la cual se escogen únicamente las hipótesis asociadas con medias ponderadas ajustadas. No se encontró diferencias estadísticas en la interacción de tres vías (Ceniza: Temperatura: Molienda).

Al observar el Anova Multifactorial en la tabla 4-6, se puede constatar que los p-value de los factores y las combinaciones entre estos es inferior a 0.05, lo que cerciora el rechazo de la hipótesis nula de que no hay diferencias entre las medias de los esfuerzos a compresión entre los factores y entre las combinaciones de los factores y concluimos que si existen diferencias significativas.

4.3.1.4 Interacción entre los factores, HSD DE TUKEY

Se realiza la interacción entre los tres factores, en este caso, las pruebas por pares sobre los 27 tratamientos del experimento de la siguiente manera:

*Los tratamientos con la misma letra no son significativamente diferentes.

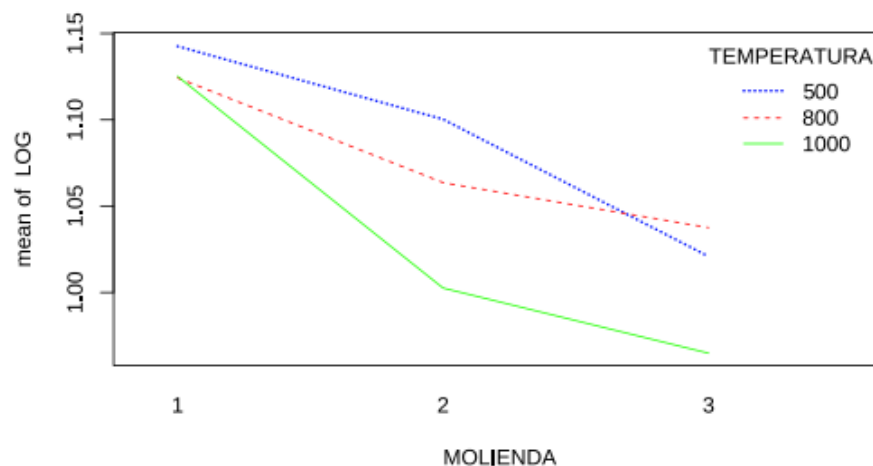
COMBINACION	LOG	Groups*
500:1:10	1,2458522	a
500:2:10	1,1921	ab
800:1:10	1,1832999	ab
1000:1:10	1,1762977	ab
500:1:15	1,1641337	abc
800:1:15	1,1439631	bcd
500:2:15	1,110005	bcde
1000:1:15	1,1049435	bcde
800:2:10	1,0959471	bcdef
1000:1:20	1,0940725	bcdef

800:3:10	1,0705185	cdefg
800:2:15	1,0671178	cdefg
500:3:10	1,0615197	defgh
500:3:15	1,0545623	defgh
800:3:20	1,0488228	defgh
800:1:20	1,0454855	defghi
1000:3:10	1,0413612	efghi
1000:2:10	1,0287947	efghij
800:2:20	1,0277418	efghij
500:1:20	1,0201647	efghijk
1000:2:15	1,0116822	efghijk
500:2:20	1,0012108	fghijk
800:3:15	0,9934008	ghijk
1000:2:20	0,9671856	hijk
500:3:20	0,9488708	ijk
1000:3:15	0,930043	jk
1000:3:20	0,923033	k

Tabla 4-7: Prueba HSD TUKEY interacción entre factores a los 7 días.

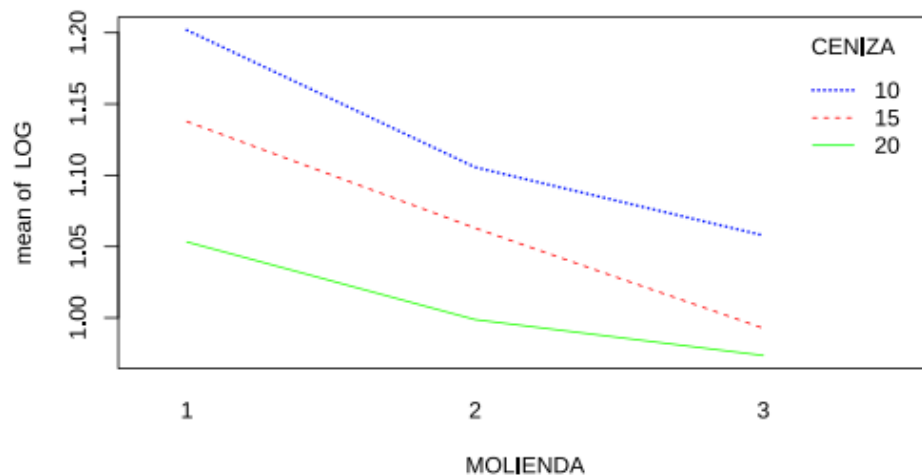
Al observar la tabla 4-7, las combinaciones que dieron los mejores valores de LOG-resistencia fueron los de 500°C, 1 hora de molienda y 10% de aporte de ceniza en la mezcla, en cambio los que peores resultados dieron de LOG-resistencia fueron los de 1000°C, 3 horas de molienda y 20% de aportes de ceniza, corroborando lo anunciado en los gráficos por factores en los ítems anteriores.

4.3.1.5 Gráficos de interacción



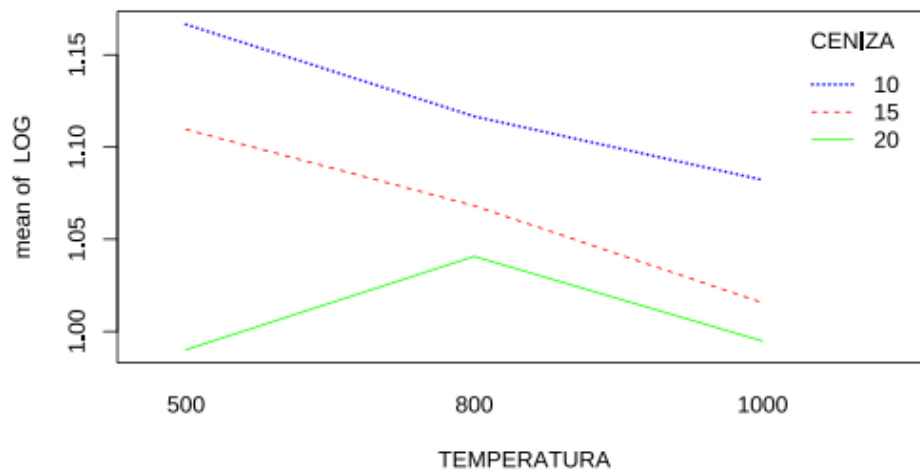
Grafica 4-5: Gráfica de interacción factores temperatura y molienda a los 7 días.

En la gráfica 4-5, se puede observar la relación inversa que hay entre LOG-resistencia y el tiempo de molienda, a mayor molienda menor resistencia, semejante a la temperatura, a mayor temperatura de calcinación menor resistencia, aparece un pequeño cruce entre las temperaturas de 500 y 800 °C, pero la tendencia sigue siendo decreciente.



Grafica 4-6: Gráfica de interacción factores ceniza y molienda a los 7 días.

En la gráfica 4-6, muestra que el comportamiento del LOG-resistencia es inversamente proporcional al tiempo de molienda, a mayor tiempo de molienda menor resistencia, igual sucede con el porcentaje de ceniza adicionada a la mezcla de mortero, a mayor porcentaje de ceniza menor resistencia a la compresión del mortero.



Grafica 4-7: Gráfica de interacción factores ceniza y temperatura a los 7 días.

Para esta interacción mostrada en la gráfica 4-7, se puede apreciar que para los porcentajes de ceniza del 10 y el 15 % y la temperatura su comportamiento son inversamente proporcional con la LOG-resistencia a la compresión del mortero, igual que nos había dado con las otras interacciones. Importante analizar un poco lo ocurrido con el porcentaje de ceniza del 20% cuando la temperatura paso de 500 a 800°C, el comportamiento con el LOG-resistencia fue directamente proporcional, tocaría realizar ensayos para verificar la influencia de las temperaturas que hay entre 500 y 800 °C y su influencia con el 20% de ceniza en muestras de mortero.

Los supuestos de los residuales a los 7 días se encuentran en el anexo B1.

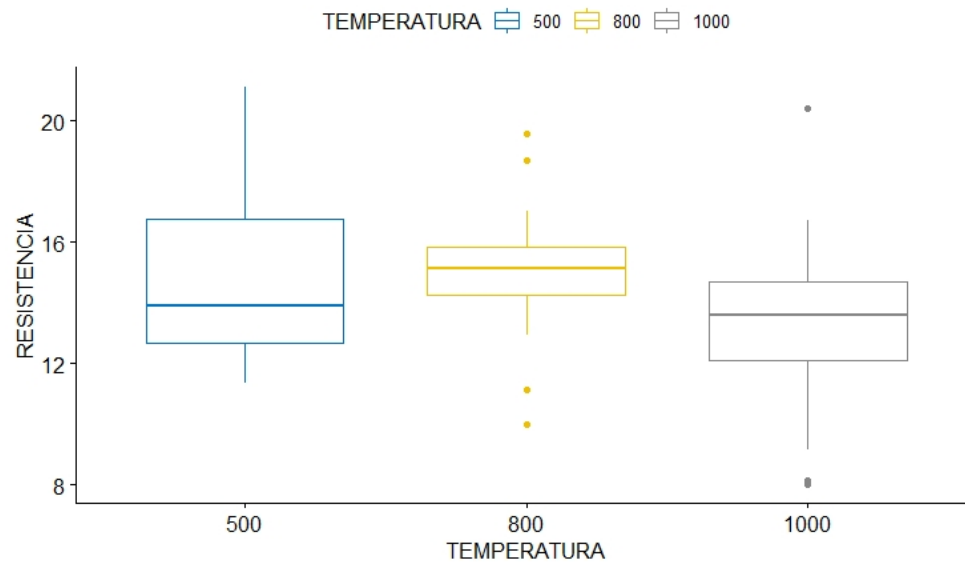
4.3.2 Análisis multifactorial a los 14 días.

4.3.2.1 Revisión de los datos

Al verificar la normalidad de los datos de la variable de respuesta esfuerzo a compresión por el método de Shapiro_test da un p-value de 0.144, indicando un valor superior a 0.05, aceptando la hipótesis nula de que no hay diferencia entre las medias de los esfuerzos a compresión

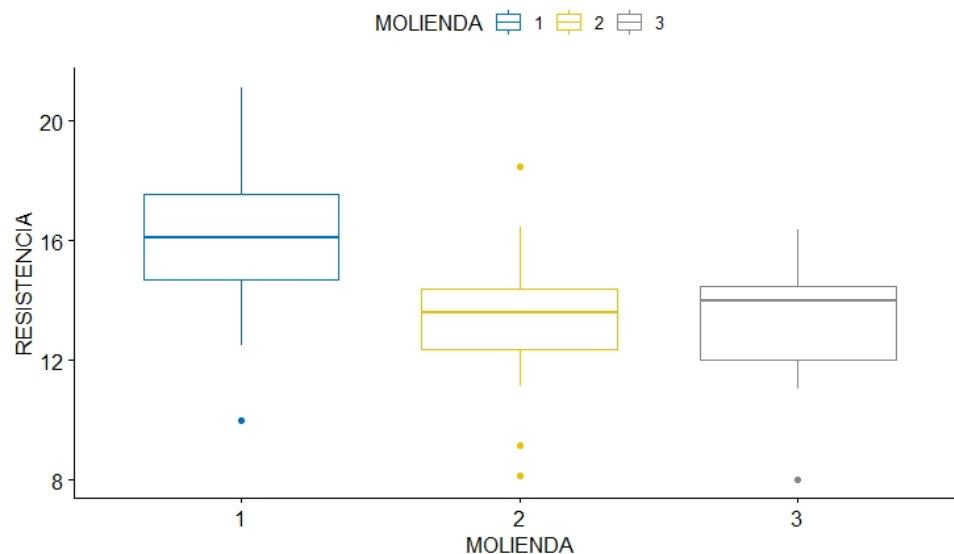
En cuanto el valor del sesgo fue de 0.2841145, donde se utilizó la función Skewness, como el valor se encuentra entre 0.5 y -0.5 se encuentra moderadamente sesgado, es positivo, lo que indica que los valores se encuentran ligeramente por encima de la media.

4.3.2.2 Gráficos por factores



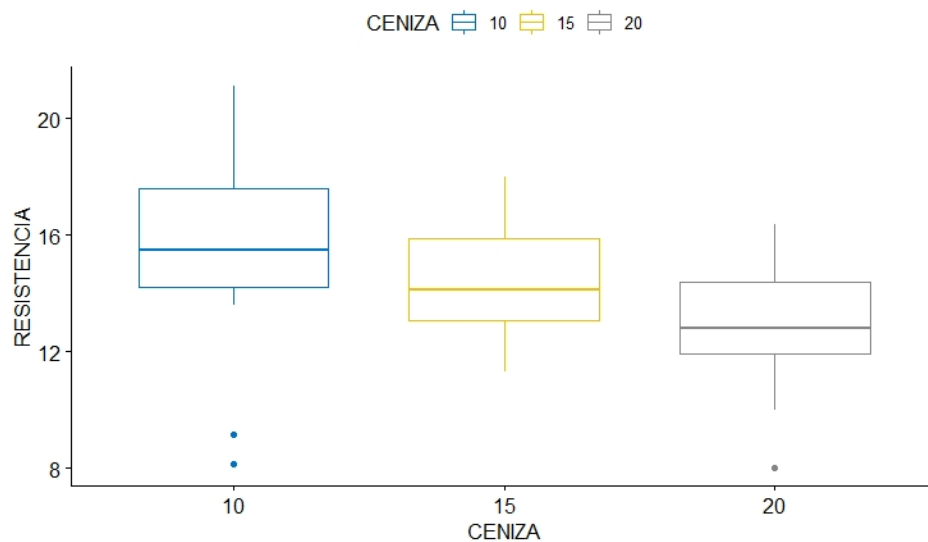
Grafica 4-8: Gráfico del comportamiento entre el factor temperatura a los 14 días.

En la gráfica 4-8, se puede observar cómo los valores promedios más altos de resistencia a la compresión para los 14 días se obtienen ahora para las cenizas obtenidas a los 800°C (15.11MPa), existiendo resultados casi similares para las cenizas de los 500°C (13.91MPa) y los 1000°C (13.61MPa).



Grafica 4-9: Tiempos de molienda a los 14 días.

En la gráfica 4-9, se muestran los tiempos de moliendas que van desde 1, 2 hasta 3 horas. Trata de mantener la misma tendencia que a los 7 días, la mayor resistencia a la compresión ocurre con la molienda de 1 hora con una resistencia promedio de 16.11 MPa, pero ahora hay un ligero aumento de la resistencia de la molienda a las 3 horas con una resistencia promedio de 13.98 MPa respecto de las 2 horas con una resistencia a la compresión promedio de 13.58 MPa.



Grafica 4-10: Porcentaje de ceniza a los 14 días.

En la gráfica 4-10, se muestran los porcentajes de ceniza utilizados en las mezclas, se evidencia que se mantiene la misma tendencia que ocurría en la mezcla de morteros a los 7 días, mayores resistencias con porcentajes bajos y menores resistencias con porcentajes altos.

4.3.2.3 Anova multifactorial

FACTOR	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
CENIZA	2	106,503	53,252	30,5285	1,349e-09 ***
TEMPERATURA	2	40,555	20,277	11,6248	6,331e-05 ***
MOLIENDA	2	153,18	76,59	43,908	4,765e-12 ***
CENIZA:TEMPERATURA	4	37,076	9,269	5,3138	0,001107 **

CENIZA: MOLIENDA	4	34,823	8,706	4,9909	0,001696 **
TEMPERATURA: MOLIENDA	4	31,137	7,784	4,4625	0,003452 **
CENIZA:TEMPERATURA: MOLIENDA	8	48,449	6,056	3,4719	0,002681 **
Residual	54	94,194	1,744		
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

Tabla 4-8: Anova multifactorial entre factores a los 14 días.

Para el análisis de varianza multifactorial se utilizó la suma de cuadrados tipo II, para probar hipótesis, en la cual se escogen únicamente las hipótesis asociadas con medias ponderadas ajustadas. No se encontró diferencias estadísticas en la interacción de tres vías (Ceniza: Temperatura: Molienda).

Al observar el Anova en la tabla 4-8, se puede constatar que los p-value de los factores y las combinaciones entre estos es inferior a 0.05, lo que nos cerciora en rechazar la hipótesis nula de que no hay diferencias entre las medias de los esfuerzos a compresión entre los factores y entre las combinaciones de los factores y concluimos que si existen diferencias significativas.

4.3.2.4 Interacción entre los factores, HSD DE TUKEY

Se realiza la interacción entre los tres factores, en este caso, las pruebas por pares sobre los 27 tratamientos del experimento de la siguiente manera:

*Los tratamientos con la misma letra no son significativamente diferentes.

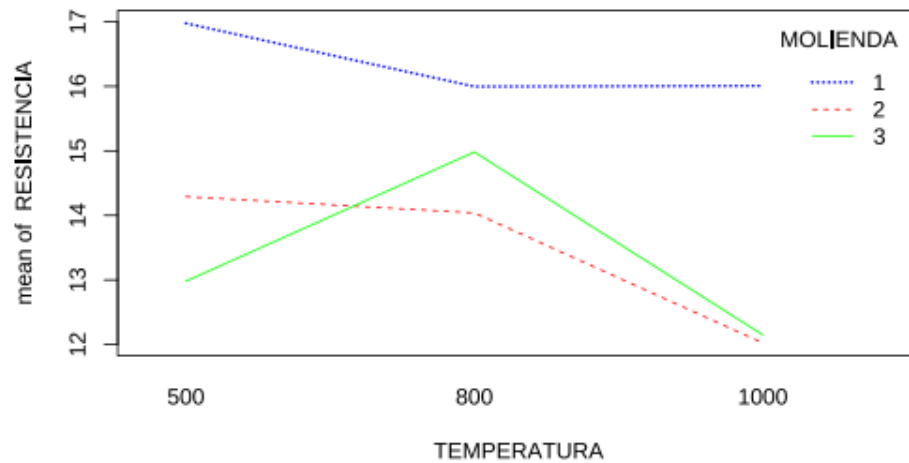
COMBINACION	RESISTENCIA MPa	Groups*
500:1:10	20,63	a
1000:1:10	17,82333	ab
800:1:10	17,52	ab
500:1:15	17,38667	abe
500:2:10	16,94333	abcd

800:1:15	16,72	abcd
800:3:20	15,89667	bcde
1000:1:15	15,75667	bcdef
800:2:10	15,41333	bcdefg
800:3:10	14,77	bcdefgh
1000:1:20	14,44	bcdefghi
500:3:10	14,33667	bcdefghi
800:3:15	14,28	bcdefghi
1000:3:10	14,09	bcdefghi
800:2:15	13,92	bcdefghi
500:2:15	13,86333	bcdefghi
800:1:20	13,75	bcdefghi
1000:2:15	13,28	cdefghi
500:3:15	13,08	defghi
500:1:20	12,91333	defghi
800:2:20	12,78333	defghi
1000:2:20	12,49	efghi
500:2:20	12,06333	efghi
1000:3:15	11,65	fghi
500:3:20	11,52	ghi
1000:3:20	10,70567	hi
1000:2:10	10,3	i

Tabla 4-9: Prueba HSD TUKEY interacción entre factores a los 14 días.

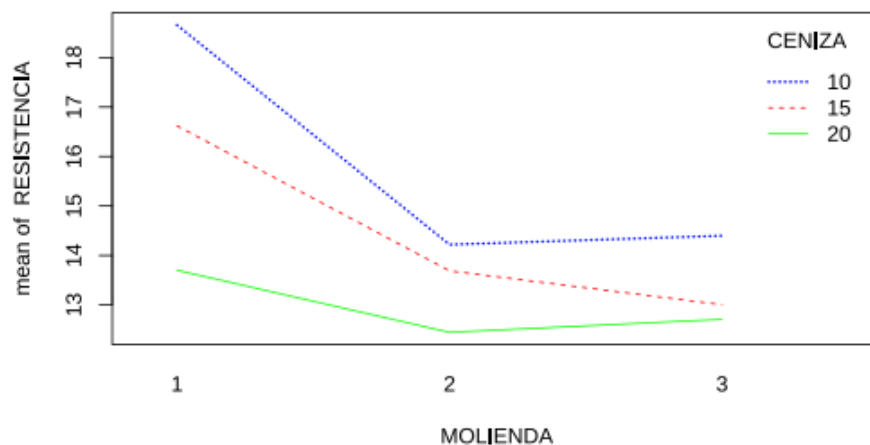
Al observar la tabla 4-9, la combinación que sigue manteniendo los mejores resultados de resistencia a la compresión es la de 500°C, 1 hora de molienda y 10% de aporte de ceniza con una resistencia a la compresión promedio de 20.63 MPa, en cambio el resultado más bajo fue la combinación de 1000°C, 2 horas de molienda y 10% de aportes de ceniza, con una resistencia promedio a la compresión de 10.3 MPa, superando muy levemente por el que ocupaba el último lugar a los 7 días, la combinación de los 1000°C, 3 horas de molienda y 20% de aportes de ceniza con una resistencia promedio de 10.7 MPa.; de todos modos lo que se puede evidenciar corrobora lo mostrado por los gráficos de los factores en los ítems anteriores.

4.3.2.5 Gráficos de interacción



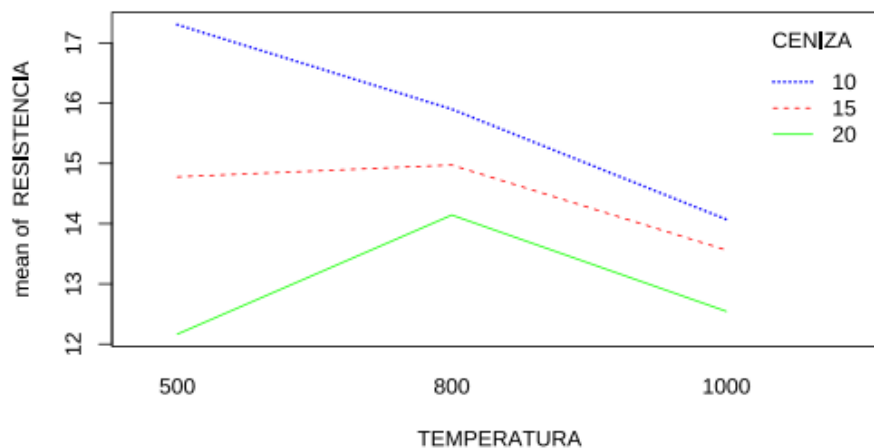
Grafica 4-11: Gráfica de interacción factores temperatura y molienda a los 14 días.

En la gráfica 4-11, se puede observar la relación inversa que hay entre resistencia, la temperatura y el tiempo de molienda para 1 y 2 horas, claramente se ve cómo se acentúa más en la de 2 horas, pero en cambio para 3 horas ocurre algo extraño, como a 800 °C aumenta la resistencia, pero después su resistencia decae drásticamente cuando la temperatura de calcinación es de 1000°C. Lo anterior llevaría a pensar en analizar futuros estudios en temperaturas con 800°C y tiempos de moliendas de 3 horas, pero también se logra apreciar que su resistencia no logra superar las alcanzadas por las de 1 hora de molienda.



Grafica 4-12: Gráfica de interacción factores ceniza y molienda a los 14 días.

El comportamiento mostrado en la gráfica 4-12, se ve que la resistencia es inversamente proporcional al tiempo de molienda de 1 y 2 horas y en los tres porcentajes de ceniza; para los porcentajes de ceniza del 10 y el 20 % la resistencia aumentó con 3 horas de molienda en cambio solo para el 15% de ceniza si mantuvo la relación inversa con la resistencia, a mayor tiempo de molienda menor resistencia.



Grafica 4-13: Gráfica de interacción factores ceniza y temperatura a los 14 días.

Para la interacción mostrada en la gráfica 4-13, se puede apreciar que para los porcentajes de ceniza del 15 y el 20 % y la temperatura entre 500 y 800°C su comportamiento son directamente proporcional con la resistencia a la compresión del mortero, pero después su comportamiento es inverso, ya que al aumentar la temperatura a 1000°C su resistencia vuelve a bajar; en cambio para la ceniza con el 10% si se mantuvo con una relación inversamente proporcional que al aumentar la temperatura de cocción la resistencia disminuía, igual a lo encontrado a los 7 días.

Los supuestos de los residuales a los 14 días se encuentran en el anexo B2.

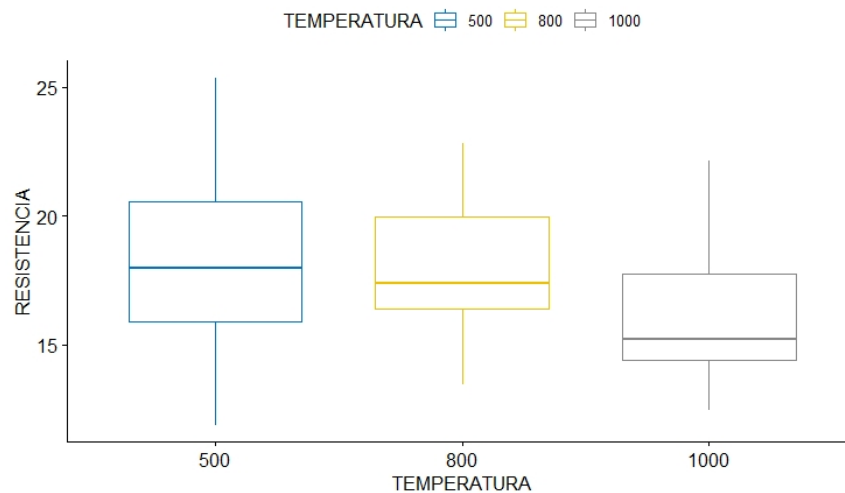
4.3.3 Análisis multifactorial a los 28 días

4.3.3.1 Revisión de los datos

Al verificar la normalidad de los datos de la variable de respuesta esfuerzo a compresión por el método de Shapiro_test da un p-value de 0.0906, indicando un valor superior a 0.05, aceptando la hipótesis nula de que no hay diferencia entre las medias de los esfuerzos a compresión

En cuanto el valor del sesgo fue de 0.4872333, donde se utilizó la función Skewness, como el valor se encuentra entre 0.5 y -0.5 se encuentra moderadamente sesgado, es positivo, lo que indica que los valores se encuentran ligeramente por encima de la media.

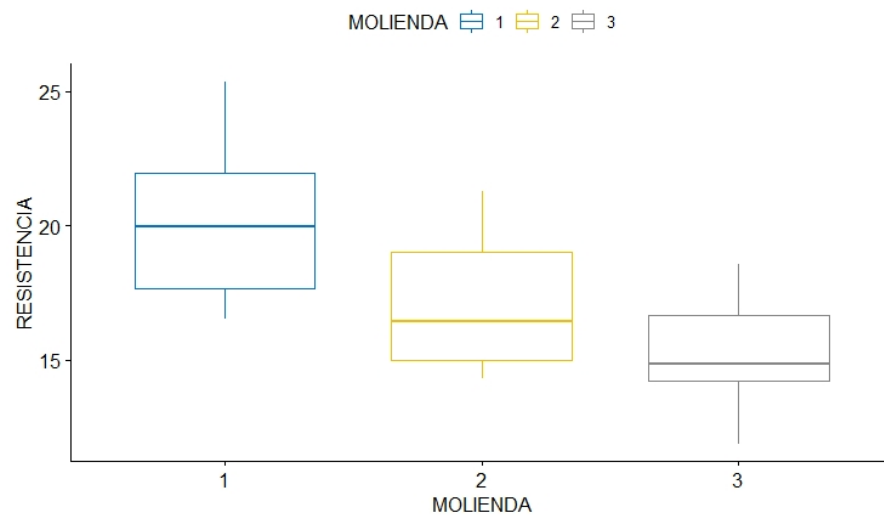
4.3.3.2 Gráficos por factores



Grafica 4-14: Gráfico del comportamiento entre el factor temperatura a los 28 días.

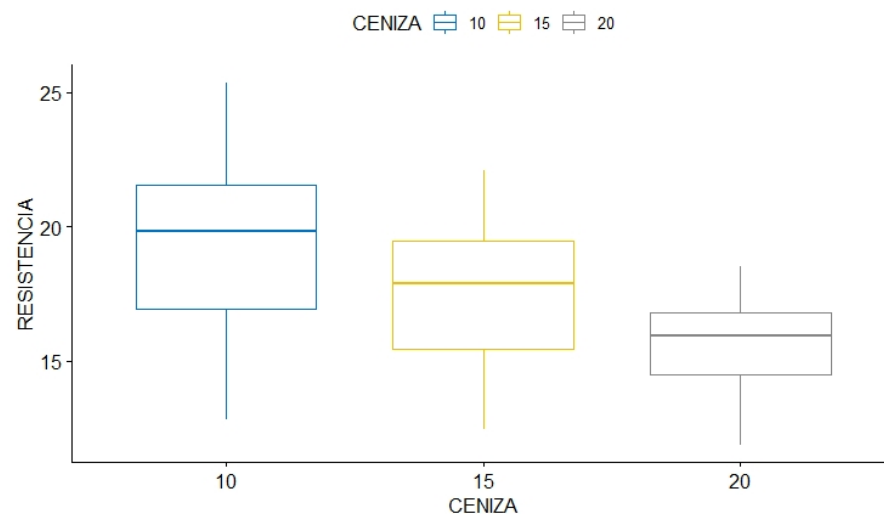
En la gráfica 4-14, se puede observar cómo los valores más altos de resistencia promedio a la compresión para morteros a los 28 días se obtienen para la temperatura de cocción de 500°C (17.96MPa) seguido muy de cerca por la de 800°C (17.39MPa) y un poco más alejada la de 1000°C con una resistencia promedio de 15.21 MPa. La tendencia observada aquí es muy parecida a la presentada a los 7 días de curado del mortero y parece indicar que en cuanto a la temperatura entre

los 500 y 800°C no existiese mucha diferencia en cuanto a la resistencia a la compresión del mortero adicionado con ceniza.



Grafica 4-15: Tiempos de molienda a los 28 días.

En la gráfica 4-15, se muestran los tiempos de moliendas que van desde 1, 2 hasta 3 horas. Se mantienen la misma tendencia que a los 7 días de curado, la mayor resistencia ocurre con la molienda de 1 hora con una resistencia promedio de 19.95 MPa, las 2 horas con una resistencia promedio de 16.45 MPa y a las 3 horas con una resistencia promedio de 14.84 MPa.



Grafica 4-16: Porcentaje de ceniza a los 28 días.

En la gráfica 4-16, se muestran los porcentajes de ceniza utilizados en las mezclas, se evidencia que se mantiene la misma tendencia que ocurría en la mezcla de morteros a los 7 días de curado, para 10% se obtuvieron resistencias promedias a la compresión de 19.82MPa, al 15% resistencias del 17.90MPa y para 20% 15.95MPa.

4.3.3.3 Anova multifactorial

FACTOR	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
CENIZA	2	168,759	84,379	55,6573	7,590e-14 ***
TEMPERATURA	2	60,837	30,419	20,0644	3,049e-07 ***
MOLIENDA	2	289,737	144,868	95,5563	< 2,2e-16 ***
CENIZA: TEMPERATURA	4	25,036	6,259	4,1285	0,005444 **
CENIZA: MOLIENDA	4	27,826	6,956	4,5885	0,002910 **
TEMPERATURA: MOLIENDA	4	16,713	4,178	2,7561	0,036985 *
CENIZA:TEMPERATURA: MOLIENDA	8	12,024	1,503	0,9914	0,453201
Residuals	54	81.867	1,516		
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

Tabla 4-10: Anova multifactorial entre factores a los 28 días.

Al observar el Anova Multifactorial en la tabla 4-10, se puede constatar que los p-value de los factores y las combinaciones entre dos factores es inferior a 0.05, lo que cerciora el rechazo de la hipótesis nula de que no hay diferencias entre las medias de los esfuerzos a compresión entre los factores y entre las combinaciones de dos factores y concluimos que si existen diferencias significativas. En cambio, la combinación entre los tres factores al mismo tiempo, arrojo un p-value mayor a 0.05, indicando que no hay diferencias significativas entre las medias de los esfuerzos a compresión entre los tres factores.

4.3.3.4 Interacción entre los factores, HSD DE TUKEY

Se realizó la interacción entre los tres factores, en este caso, las pruebas por pares sobre los 27 posibles tratamientos del experimento de la siguiente manera:

*Los tratamientos con la misma letra no son significativamente diferentes.

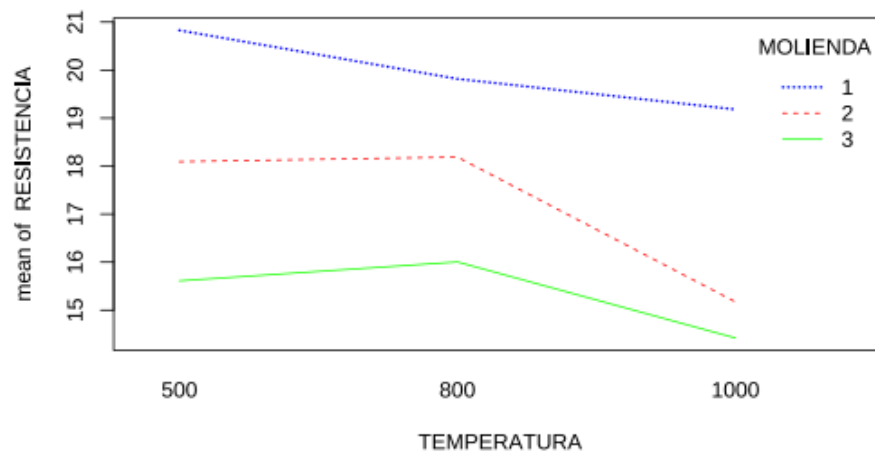
COMBINACION	RESISTENCIA MPa	Groups*
500:1:10	24,54667	a
800:1:10	21,86333	ab
1000:1:10	21,25667	abe
500:1:15	20,76333	abcd
800:1:15	20,67667	abcd
800:2:10	20,21333	bcde
500:2:10	20,1182	bcdef
1000:1:15	18,75	bcdefg
500:2:15	18,53327	bcdefgh
800:2:15	18,12667	bcdefghi
1000:1:20	17,53597	cdefghi
500:1:20	17,17333	defghij
800:3:10	16,93333	defghij
800:1:20	16,91	defghij
500:3:15	16,88333	defghij
500:3:10	16,33667	efghij
1000:2:10	16,22333	fghij
800:2:20	16,22333	fghij
800:3:15	15,67	ghij
500:2:20	15,62433	ghij
1000:3:10	15,60667	ghij
800:3:20	15,40667	ghij
1000:2:15	14,8	hij
1000:2:20	14,49333	ij
1000:3:20	14,30333	ij
500:3:20	13,61	j
1000:3:15	13,34667	j

Tabla 4-11: Prueba HSD TUKEY interacción entre factores a los 28 días.

Al observar la tabla 4-11, la combinación que sigue manteniendo los mejores resultados de resistencia promedio a la compresión

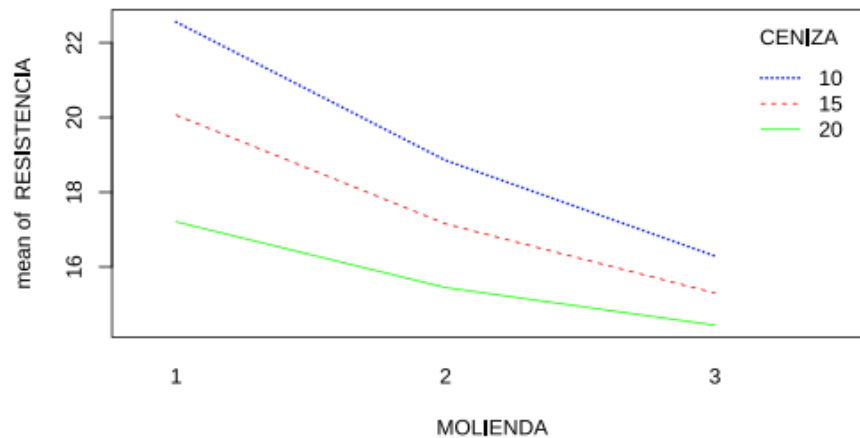
a los 28 días de curado es la de 500°C, 1 hora de molienda y 10% de aporte de ceniza, con una resistencia a la compresión promedio de 24.54 MPa, en cambio el resultado más bajo fue la combinación de 1000°C, 3 horas de molienda y 15% de aportes de ceniza, con una resistencia promedio a la compresión de 13.34 MPa. El que ocupaba el último lugar en el curado a los 7 días el tratamiento 1000°C, 3 días, y 20% lo supera muy levemente con una resistencia promedio de 14.49MPa y el tratamiento más bajo a los 14 días de curado, 1000°C, 2;10% también lo supera, pero no tan bajo, con una resistencia promedio de 16.22MPa. Importante observar cómo estas últimas coinciden con la temperatura de cocción de los 1000°C.

4.3.3.5 Gráficos de interacción



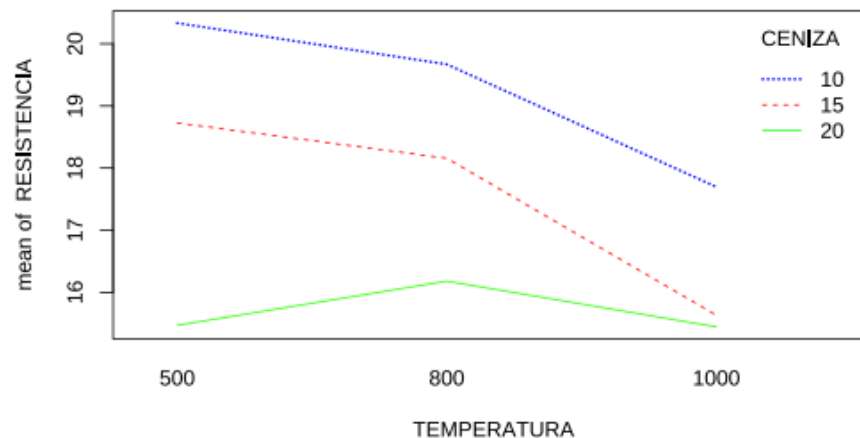
Grafica 4-17: Gráfica de interacción factores temperatura y molienda a los 28 días.

En la gráfica 4-17, se puede observar como para las horas 2 y 3 de molienda la resistencia aumenta al aumentar la temperatura de cocción de 500 a 800°C, como ya se había indicado anteriormente, algo puede estar ocurriendo al aumentar esa temperatura de cocción que mejora la resistencia, pero hay que tener en cuenta también que la mejora no es tan suficiente, porque la molienda de 1 hora sigue siendo más alta que las demás.



Grafica 4-18: Gráfica de interacción factores ceniza y molienda a los 28 días.

La gráfica 4-18, muestra el comportamiento de la resistencia y se evidencia que esta es inversamente proporcional al tiempo de molienda en los tres porcentajes de ceniza, obteniendo los valores más altos para los porcentajes de ceniza del 10% y los tiempos de 1 hora de molienda y los más bajos para los del 20% de ceniza y 3 horas de molienda.



Grafica 4-19: Gráfica de interacción factores ceniza y temperatura a los 28 días.

Para la interacción mostrada en la gráfica 4-19, se puede apreciar que el comportamiento es inversamente proporcional entre la resistencia a la compresión del mortero y los porcentajes de cenizas y las temperaturas de cocción. Se aprecia que los valores más altos de resistencia se obtuvieron

con porcentajes de ceniza bajos (10%) y temperaturas de cocción bajas (500°C), en cambio, los valores más bajos de resistencias se obtuvieron para porcentajes de cenizas altos (20%) y cocciones altas (1000°C). Ya se había hablado que algo ocurría en la cocción de 500°C a 800°C que hacía que la resistencia aumentara, en especial con porcentajes de ceniza del 20%, pero eso no es tan notable ya que no logra superar la resistencia que se alcanza con porcentajes del 15 y 10%.

Los supuestos de los residuales a los 28 días se encuentran en el anexo B3.

Capítulo 5

5. Discusión

En la tabla 5-1, se evidencian las resistencias con diferentes porcentajes de reemplazo de CCA, la cual contiene los resultados de otros autores comparados con los resultados de este estudio utilizando los 500°C de incineración 1h de molienda la cual dio mejores resultados, también se tuvo en cuenta la resistencia esperada en cada estudio ($f'c$).

CUADRO COMPARATIVO					
AUTOR	% de ceniza	RESISTENCIA A LA COMPRESION (MPa)			
		7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	90 DÍAS
Prado Tovar (2019)	$f'c$	21			
	0	15,57	19,05	28,57	
	10	7,26	8,93	11,38	
	15	4,35	6,32	8,16	
	20	5,95	8,23	11,37	
Águila y Sosa (2008)	$f'c$	32,83			
	0	29,52		40,5	46,48
	10	23,73		44,91	53,45
	15	26,87		45,4	50,9
	20	30,89		46,1	49,72
González y suaza (2023)	$f'c$	20,5			
	0	20,05	21,45	22,98	
	10	17,6	20,6	24,5	
	15	14,6	17,4	20,8	
	20	10,5	12,9	17,2	

Tabla 5-1: Comparativo de resistencias con otros autores.

Los resultados de los tres autores demuestran que en la última resistencia tomada referente a los porcentajes de sustitución de CCA son inversamente proporcional, esto quiere decir que, entre más porcentaje de reemplazo de CCA por cemento, menor es la resistencia del mortero.

En los resultados de Águila y Sosa (2008); González y Suaza (2023), se puede observar que algunos morteros con CCA tuvieron resistencias finales superiores a los cubos testigos (0% de CCA) y a la resistencia del diseño de mezcla ($f'c$), esto puede influir en varios factores uno de esos es la molienda, la cual se le realizó a la ceniza en un tiempo de una hora, a diferencia de Prado Tovar que utilizaron la CCA sin darle una molienda, esta idea la refuerza Quevedo (2012) mostrando sus resultados y mostrando que es necesaria la molienda y darle una finura más elevada para activar de manera mecánica la actividad puzolánica de la CCA.

Si se compara los estudios de Gonzáles y Suaza (2023) y Prado Tovar (2019), se pueden ver grandes similitudes, iniciando por el método de diseño de mezcla que es el mismo y la resistencia esperada, le siguen los parámetros de la arena mostrados en la tabla 5-2, donde se observa resultados casi parecidos en sus laboratorios de caracterización, la diferencia más significativa es la absorción, lo que se puede concluir es que en la mezcla del mortero hecha por cada autor lo que difiere es la CCA, la cual se le dio un tratamiento diferente como fue la molienda.

PARÁMETROS DE LA ARENA	González y Suaza	Prado Tovar (2019)
Módulo de finura	2,85	2,84
Masa unitaria suelta (gr/cm^3)	1,63	1,6
Masa unitaria compacta (gr/cm^3)	1,77	1,67
Densidad aparente (gr/cm^3)	2,55	2,5
Densidad aparente SSS (gr/cm^3)	2,58	2,57

Densidad nominal (gr/cm ³)	2,64	2,69
% de absorción	1,32	2,77

Tabla 5-2: Comparativo de características de la arena.

Quevedo (2012) en su documento muestra que la incineración a altas temperaturas de la CA causa que la sílice se cristalice, dando como resultados baja actividad puzolánica la cual se evidencia en las bajas resistencias de los morteros con adición de esta, comparando con los resultados de González y Suaza (2023), se aprecia que para las temperaturas altas (800°C y 1000°C) las resistencias disminuyen a comparación de la temperaturas más baja que se maneja (500°C), concordando así los dos estudios mencionados anteriormente.

Capítulo 6

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

La temperatura de incineración afecta la masa de la CCA ya que esta disminuye drásticamente al ser calcinada entre un 75,39% a 86,02% de la masa total de la CA, entre mayor sea la temperatura a la que es sometida la CA, mayor es la reducción de la CCA.

El módulo de finura dado por la molienda a la CCA influye en la resistencia final del mortero, ya que presenta mayores resultados con un tamaño de partícula mayor, lo cual indica que en tipos de molienda de 1h la resistencia es mayor.

La adición de agua en los tratamientos aumenta considerablemente dependiendo del tiempo de molienda que varía entre el 8,33% al 39,13% con respecto al agua del diseño de mezcla, los porcentajes de reemplazo de la CCA y el aumento de la temperatura de incineración de la CA, por lo que, para las mezclas de mortero con CCA, el consumo de agua será mayor con respecto al agua que se le agrega a los cubos de mortero testigos.

Entre más aumentan las variables de temperatura de incineración, el porcentaje de remplazo de la ceniza de cascarilla de arroz y el tiempo de molienda, disminuye la resistencia en los cubos de mortero.

Se elaboraron 27 tratamientos diferentes con reemplazo parcial de CCA, según el análisis estadístico la mejor combinación es

el motero que tiene 500°C de incineración a 1 hora de molienda y 10% de CCA, el cual tiene una resistencia promedio a los 28 días de edad de 24.55 MPa, comparándolo con el resultado de los cubos testigo a los 28 días de edad con una resistencia de 22.98 MPa, se puede concluir que el reemplazo parcial de CCA en el tratamiento mencionado anteriormente, cuenta con mejores características de resistencia que el mortero tradicionalmente utilizado (0% de CCA). Otros tratamientos que según la interacción entre factores de HSD DE TUKEY se tienen en cuenta por sus resultados superiores a la resistencia de diseño (20.5MPa), son T800:1:10, T1000:1:10, T500:1:15 y T800:1:15 con resistencias a los 28 días de 21.86MPa, 21.26MPa, 20.76MPa y 20.68MPa respectivamente.

6.2 Recomendaciones

Se deben tener en cuenta para otros estudios un rango más pequeño de temperatura, preferiblemente que ronde los 500°C, el rango de tiempo de molienda también debe disminuir a menos de 1h y no utilizar porcentajes de reemplazo parcial de CCA por cemento por encima del 10%, todo esto para ir reduciendo el campo de investigación en las variables que influyen en resistencia del motero agregando CCA.

Se recomienda hacer estudios químicos con herramientas como el espectrofotómetro, esto con el fin de identificar la composición de la CCA, con la herramienta anteriormente mencionada se puede hacer un perfil químico con CCA de diferentes lugares para ver el comportamiento de la resistencia de acuerdo a los porcentajes de sílice y sus otros compuestos.

Para tener mayor certeza en la favorabilidad de utilizar la CCA en el motero, se debe hacer un estudio de la cantidad de compuestos liberados al medio ambiente, al momento de su calcinación y los efectos se pueden tener a comparación de la fabricación del cemento, ya que la reducción de masa de la CA cuando se incinera es de alrededor del 75.39% y también debe

tener en cuenta la viabilidad económica al hacer el reemplazo del cemento por la CCA.

Hacer un análisis con imágenes microscópicas para ver las formas de las partículas y comportamiento con respecto a la variación de la temperatura de incineración y tiempos de molienda.

A. Anexo: Resistencia de cubos de mortero

T °C	Tiempo de molienda (h)	RESISTENCIAS									
		10%			15%			20%			
		Días de rotura									
		7	14	28	7	14	28	7	14	28	
500	1	16,8	21,1	25,3	14,4	17,1	20,9	11,2	12,8	16,7	
		17,4	20,8	25,4	14,6	18,0	20,8	9,2	12,5	17,0	
		18,8	20,0	23,0	14,7	17,1	20,6	11,1	13,4	17,8	
	Promedio	17,6	20,6	24,5	14,6	17,4	20,8	10,5	12,9	17,2	
	2,00	15,5	18,5	18,6	12,8	13,9	18,3	10,3	12,0	15,8	
		15,6	16,4	21,3	12,3	13,6	18,1	10,3	12,2	16,0	
		15,5	15,9	20,5	13,6	14,1	19,3	9,5	12,0	15,1	
	Promedio	15,6	16,9	20,1	12,9	13,9	18,5	10,0	12,1	15,6	
	3	9,6	14,7	18,0	11,4	13,3	15,6	8,8	11,4	11,9	
		12,5	14,1	12,8	11,1	12,9	17,3	8,9	11,3	14,5	
		12,7	14,2	18,3	11,5	13,0	17,7	9,0	11,8	14,4	
	Promedio	11,6	14,3	16,3	11,3	13,1	16,9	8,9	11,5	13,6	
	800	1	15,6	19,6	22,8	13,6	17,0	22,1	13,0	10,0	17,4
			14,1	14,3	22,2	14,3	16,1	20,0	12,3	15,9	16,8
			16,2	18,7	20,6	14,0	17,0	20,0	8,6	15,4	16,5
		Promedio	15,3	17,5	21,9	13,9	16,7	20,7	11,3	13,8	16,9
2,00		11,7	15,6	20,6	12,3	14,5	19,1		14,3	16,5	
		12,9	15,5	19,8	12,6	14,2	18,9	10,8	12,9	14,9	
		12,9	15,1	20,2	10,3	13,1	16,4	10,6	11,1	17,4	
Promedio		12,5	15,4	20,2	11,7	13,9	18,1	10,7	12,8	16,2	
3		11,7	15,5	14,8	10,6	14,0	15,9	11,1	15,5	13,5	
		11,7	14,1	18,6	9,8	14,3	16,4	11,2	15,8	16,8	
		11,9	14,7	17,4	9,3	14,5	14,7	11,3	16,4	16,0	
Promedio		11,8	14,8	16,9	9,9	14,3	15,7	11,2	15,9	15,4	

1000	1	15,2	16,7	19,8	12,2	16,1	18,7	13,0	14,9	16,5
		14,4	20,4	22,1	12,9	15,5	19,7	12,6	14,0	18,5
		15,4	16,3	21,8	13,2	15,7	17,9	11,7	14,5	17,6
	Promedio	15,0	17,8	21,3	12,7	15,8	18,8	12,4	14,4	17,5
	2,00	10,3	9,1	16,5	10,4	14,0	14,8	9,6	12,5	14,7
		11,1	8,1	14,9	10,1	13,0	15,2	9,8	12,1	14,3
			13,6	17,4	10,3	12,8	14,4	8,5	12,9	14,5
	Promedio	10,7	10,3	16,2	10,3	13,3	14,8	9,3	12,5	14,5
	3,00	11,3	13,6	16,6	8,7	12,2	14,4	8,5	8,0	14,5
		10,3	14,4	13,7	8,6	11,3	12,4	8,5	13,1	14,3
		11,4	14,3	16,6	8,3	11,5	13,2	8,2	11,0	14,1
	Promedio	11,0	14,1	15,6	8,5	11,7	13,3	8,4	10,7	14,3
	Cubo testigo con 0% de CCA	7 días			14 días			28 días		
		20,73			23,32			20,81		
		19,65			19,94			23,36		
		19,77			21,09			24,76		
	Promedio	20,05			21,45			22,98		

Tabla A-1: Resultados de esfuerzo a la compresión en MPa de cada cubo de mortero.

B. Anexo: Análisis de los supuestos residuales.

B.1 Análisis de los supuestos residuales de los 7 días.

1. Supuesto de varianza constante-homocedasticidad
ncvTest: p -value = 0.51566, Esta prueba sirve para estudiar la hipótesis nula de varianza constante de los errores frente

a la hipótesis alternativa de que la varianza de los errores cambia con el nivel de la respuesta o con alguna combinación lineal de los predictores.

2. Supuestos de independencia

Breusch-Godfrey test for serial correlation of order up to 1

LM test = 1.553, df = 1, p-value = 0.2127

B.2 Análisis de los supuestos residuales de los 14 días.

1. **Supuesto de normalidad**

Kolmogorov-Smirnov test

data: modelo\$residuals

D = 0.14687, p-value = 0.05464

2. **Supuesto varianza constante" homocedasticidad"**

ncvTest. p = 0.24776

3. **Supuestos de independencia**

Durbin-Watson test. p-value = 0.6725

4. **Supuesto de media cero**

p-value = 1

B.3 Análisis de los supuestos residuales de los 28 días.

1. Supuesto de normalidad

Kolmogorov-Smirnov test

data: modelo\$residuals

p-value = 0.3641

2. Supuesto varianza constante" homocedasticidad"

ncvTest. p = 0.73193

3. Supuestos de independencia

Durbin-Watson test

p-value = 0.9744

4. Supuesto de media cero

p-value = 1

Bibliografía

CHRISTOPHER F., BOLATITO A., AHMED S. (2017), Structure and properties of mortar and concrete with rice husk ash as partial replacement of ordinary Portland cement - a review, International journal of Sustainable Built Environment. Vol.6 (2) 675-692. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2017.07.004>

MEHTA, K.P. (2009), Global concrete industry sustainability. Concrete international. Vol.31 (2), 45-48.

ECOSMART (2008), Environmental impact cement production and the CO2 challenge. http://www.ecosmartconcrete.com/enviro_cement.cfm.

AMRUTHA G., NAYAK M., NARASIMHAN C., RAJEEVA S.V., (2009), chloride-ion impermeability of self-compacting high-volume fly ash concrete mixes, International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS Vol.11 (4), 29-35.

BUI D.D. (2001), Rice husk ash as a mineral admixture for high performance concrete. Delft university of technology.

VALVERDE A., SARRIA BIENVENIDO L., MONTEAGUDO J. (2007), Análisis comparativo de las características físico químicas de la cascarilla de arroz. Universidad tecnológica de Pereira. <https://doi.org/10.22517/23447214.4055>

ÁGUILA, IDALBERTO, & SOSA, MILENA. (2008). Evaluación físico químico de cenizas de cascarilla de arroz, bagazo de caña y hoja de maíz y su influencia en mezclas de mortero, como materiales puzolánicos. Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela, 23(4), 55-66. Recuperado en 01 de octubre de 2023, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652008000400006&lng=es&tlng=es.

Tolosa Correa, R. (2017). Evaluación de fibras y cenizas provenientes de residuos agroindustriales como materias primas para la producción de materiales compuestos con cemento hidráulico. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/62282>

QUEVEDO B.M., (2012), La utilización de cascara de arroz bajo el proceso de calcinación controlada como puzolana artificial en el diseño de morteros para acabados, Universidad de San Carlos de Guatemala.

NOVOA M., BECERRA L., VASQUEZ M., (2016), La ceniza de cascarilla de arroz y su efecto es adhesivos tipo mortero, Universidad libre.

PRADO T. LUCAS F., LARA P. JOSÉ L & ERAZO E. WILSON J. (2019), Evaluación de las propiedades fisicomecánicas de cubos de mortero utilizando cenizas de cascarilla de arroz como sustituto parcial del cemento, Revista: Erasmus Semilleros de investigación, 97-109.

CASTILLA, L. A. TIRADO, Y C. (2019), Fundamentos técnicos para la nutrición del cultivo de arroz. Fedearroz - FNA.

KHAN R., JABBAR A., AHMAD I., KHAN W., KHANT A., & MIRZA J. (2012). Reduction in environmental problems using rice-husk

ash in concrete. Construction and building materials, 360-365, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.028>

GUTIERREZ DE LOPEZ, L. (2003), El concreto y los otros materiales para la construcción. Manizales, Caldas, Colombia: Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.

AGUILA I., SOSA M. (2008), Evaluación físico químico de cenizas de cascarilla de arroz, bagazo de caña y hoja de maíz y su influencia en mezclas de mortero, como materiales puzolánicos. Revista de la facultad de ingeniería de la universidad central de Venezuela, vol.23 (4), 55-66.

ONU. (2021). AR6 Climate Change.

MIRANZO, M, & DEL RÍO, C. (2015). Las consecuencias del cambio climático en el MAGREB. Revista UNISIC, (39), 127-150. <https://doi.org/10.5209/rev RUNI.2015.n39.51817>

REYNOSA NAVARRO, E (2015). Crisis ambiental global, consecuencias y soluciones prácticas. GRIN Verlag GmbH.

TOMMASINO, H., FOLADORI, G., & TASKS, J. (2005). La crisis ambiental contemporánea. Sustentabilidad, 9-26.

RASMUSSEN, J. (1951). Cemento de escorias (ensayos con escoria de arrabio): estudio del efecto del contenido en escoria yeso y finura del cemento, sobre fraguado, resistencias a la tracción y compresión.

ALIAGA MENDOZA, J. C., & BADAJOS QUISPE, B. (2018). Adición de cenizas de cascarilla de arroz para el diseño de concreto F'c 210kg/cm², Atalaya, Ucayali - 2018. Tesis de Pre-Grado, Universidad César Vallejo, Lima.

VALVERDE, G., SARRIA, L. B., & MONTEAGUDO, P. Y. J. (2007b). Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz. *Scientia et technica*, 1(37), 255-260. <https://doi.org/10.22517/23447214.4055>

Dane. (2022). Boletín Técnico Encuesta Nacional de Arroz Mecanizado (ENAM) Primer semestre 2022. <https://www.dane.gov.co/>. Recuperado 26 de agosto de 2023, de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/arroz/boletin_ENAM_Isem22.pdf

Boanerges De La Pared condo, D. (2011). Diseño de mezclas de concreto con ceniza de cascarilla de arroz para emplearlo en proyectos de vivienda de bajo costo [Tesis de grado]. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. (s. f.). <https://www.astm.org/c0618-22.html>

SANJUÁN BARBUDO, M.A., CHINCHÓN YEPES, S. (2014) Introducción a la fabricación y normalización del cemento portland. San Vicente del Raspeig: Publicaciones de la Universidad de Alicante, ISBN 978-84-9717-305-6, 181 p. <http://hdl.handle.net/10045/45347>

JAIME, M. A., & PORTOCARRERO, L. A. (2018). Influencia de la cascarilla y ceniza de cascarilla de arroz sobre la resistencia a la compresión de un concreto no estructural, Trujillo 2018 [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Repositorio de la Universidad Privada del Norte. Recuperado de <https://hdl.handle.net/11537/13593>.

SALVATIERRA ESPINOZA, A., & VALLE BENÍTEZ, A.. (2021). Diseño de un mortero hidráulico, utilizando cemento blanco como aglomerante de los agregados. Yachana Revista Científica, 10(2). Recuperado a partir de <http://revistas.ulvr.edu.ec/index.php/yachana/article/view/737>.

Sampieri, R., Fernández, C., Baptista, M. (2014). Metodología de la investigación (6° ed.). México: McGraw Hill Interamericana Editores S.A. de C.V. ISBN | DOI: 978-1-4562-2396-0.