

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MORTEROS
MODIFICADOS CON CENIZA DE LOCACIONES PETROLERAS**

**CARLOS ORLANDO SARMIENTO GARCÉS
JULIAN FELIPE ARENAS DÍAZ**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERA
FACULTAD DE INGENIERA CIVIL
SECCIONAL BUCARAMANGA
BUCARAMANGA
2012**

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MORTEROS
MODIFICADOS CON CENIZA DE LOCACIONES PETROLERAS**

**CARLOS ORLANDO SARMIENTO GARCÉS
JULIAN FELIPE ARENAS DÍAZ**

Tesis de grado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

**Director (a):
MARIA FERNANDA SERRANO GÚZMAN
PhD. Ingeniería Civil**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERA
FACULTAD DE INGENIERA CIVIL
SECCIONAL BUCARAMANGA
BUCARAMANGA
2012**

AGRADECIMIENTOS

Pasaron muchos años desde el primer día que entre a la universidad y veía tan lejano este momento. Pero este momento llegó y por eso quiero agradecer a DIOS por toda la inteligencia y sabiduría que me dio en cada uno de los semestres, seguido de cada uno de los profesores que me brindó su tiempo para enseñarme algo pero en especial a una profesora: la doctora María Fernanda Serrano Guzmán que nos brindó mucho tiempo y en este tiempo nos aportó muchas ideas y recomendaciones para que este proyecto de grado fuera un éxito. Un agradecimiento especial a mis padres: Jorge y Rosalba por su apoyo en todo momento; a mis hermanos: Jorge y Carolina por creer en mí y por estar en todo momento a mi lado; a mi esposa y a mi hijo: Juliana y Juan Felipe por ser la razón para seguir adelante en este proceso, por la compañía y toda la ayuda que me brindaron durante todos los semestres.

Un gran agradecimiento a la Facultad de Ingeniería Civil por facilitarnos el trabajo en los laboratorios, agradeciendo igualmente a los encargados de los mismos como lo fue la Ing. Luz Marina Torrado, Heli Rueda y Vicente Páez quienes con su gran conocimiento en los ensayos hicieron menos difícil la tarea de los mismos, a todos y cada uno de ustedes el más sincero agradecimiento.

JULIAN FELIPE ARENA DIAZ

Quiero agradecer en primera instancia a Dios por permitirme disfrutar el don de esta vida, por ayudarme a forjarme en el camino como un gran profesional mientras a lo largo de la carrera universitaria me brindaba confianza, seguridad, sabiduría e inteligencia para escalar poco a poco esta meta, y así por intermediación divina alzarme triunfante y alegre al haber concluido esta meta de mi vida con satisfacción.

A mis progenitores quienes en este trayecto de buenos y malos momentos me supieron brindar su completo amor, apoyo y solidaridad.

A mis hermanas por los grandiosos instantes que me acompañaron en el trayecto de mi vida hasta el momento, sus compañías incondicionales, su confianza en mi depositada y su amor único en el mundo.

A nuestra directora de proyecto María Fernanda Serrano Guzmán por ofrecernos la oportunidad tan grata de trabajar al lado suyo en el campo investigativo, por compartirnos sus conocimientos, además por poseer el don de la paciencia y la alegría aun en los momentos más difíciles.

Al personal del laboratorio, Luz Marina Torrado, Heli Rueda y Vicente Páez por su ayuda y colaboración en todo momento que se hizo uso de las instalaciones para los debidos ensayos y pruebas.

A la totalidad de los docentes de la facultad de Ingeniera Civil por ser los maestros que intervinieron en el crecimiento tanto a nivel humanístico como a nivel profesional.

CARLOS ORLANDO SARMIENTO GARCÉS

DEDICATORIA

Este trabajo se lo quiero dedicar en primer lugar a Dios porque sin el nada de esto podría ser posible.

Lo dedico a mis padres, hermanos porque siempre creyeron en mi aun en momentos desfavorables y por ultimo quiero dedicárselo con todo el corazón a mi esposa y a mi hijo porque durante este tiempo fueron el motor para seguir siempre luchando por mi sueño y cumplir esta gran meta. Quiero que sepan que los quiero mucho a todos los mencionados anteriormente y este gran logro es por y para ustedes.

JULIAN FELIPE ARENA DIAZ

Quiero dedicar este trabajo esencialmente a mis padres, Ofelia y Orlando por brindarme siempre su total apoyo incondicional, emocional y financiero, a demás por su infinito amor y enseñanzas a lo largo de esta etapa.

A mis hermanas, Silvia, Edna y Diana por acompañarme en tantas aventuras en el transcurso de mi vida, porque han sido mis pilares de el amor y el respeto que tengo hacia las mujeres.

También de manera especiales a mi abuela Flor (Q.E.P.D.), mi abuelo Oliverio (Q.E.P.D.) y mi abuela Ofelina por todo su cariño brindando en el transcurso de sus vidas y a mi familia en general.

CARLOS ORLANDO SARMIENTO GARCÉS

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	15
ABSTRACT	16
1. INTRODUCCIÓN	17
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.2 JUSTIFICACIÓN	18
1.3 ALCANCE	19
1.4 OBJETIVOS	19
1.4.1 Objetivo General.	19
1.4.2 Objetivo Especifico.	19
1.5 RELEVANCIA DEL TRABAJO	19
1.6 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO	20
2. GENERALIDADES SOBRE MORTEROS Y CENIZA	21
2.1 DEFINICIÓN DE MORTERO:	21
2.1.1 Propiedades del mortero	21
2.1.1.1 Manejabilidad:	21
2.1.1.2 Retención de agua	22
2.1.1.3 Velocidad de endurecimiento	22
2.1.2 Retracción:	23
2.1.2.1 Adherencia:	23
2.1.2.2 Resistencia:	23
2.1.2.3 Durabilidad:	24
2.1.2.5 Apariencia:	24
2.1.2.6 Densidad	24
2.1.2.7 Resistencia a la compresión.	24
2.1.2.8 Variación de volumen.	24
2.1.3 Retracción hidráulica	25
2.1.3.1 Composición química del cemento:	25

2.1.3.2	Finura del cemento	25
2.1.3.3	Dosis de cemento:	25
2.1.3.4	Dosis de agua:	25
2.1.3.5	Porosidad de los áridos	25
2.1.4	Retracción térmica:	25
2.1.4.1	Variaciones derivadas de causas externas:	25
2.1.4.2	Variaciones por causas internas:	26
2.1.5	Retracción por carbonatación:	26
2.2	ARENA.	26
2.2.1	Entre las propiedades de las arenas	27
2.2.1.1	Permeabilidad:	27
2.2.1.2	Resistencia:	27
2.3	TIPOS DE MORTEROS	27
2.3.1	Morteros de cemento y arena.	28
2.3.2	Morteros de cal y arena.	28
2.3.3	Morteros de cemento y cal.	29
2.4	FLY ASH O CENIZA VOLANTE	29
2.4.2	Clase F:	30
2.4.3	Clase N:	30
3.	METODOLOGIA	32
3.1	CARACTERIZACION DEL MATERIAL GRANULAR Y LA CENIZA	32
3.1.1	Análisis granulométrico del agregado fino y la ceniza	32
3.1.2	Contenido de materia orgánica en arena.	33
3.1.3	Contenido de Materia Orgánica en la Ceniza	34
3.1.4	Gravedad Específica del agregado fino.	35
3.1.5	Equivalente de Arena.	35
3.1.6	Caracterización del Cemento.	36
3.1.7	Caracterización Del Cemento-Ceniza.	37
3.1.8	Tiempo de Fraguado	38
3.1.8	Ensayo de Fluidéz de Morteros en la Mesa de Flujo.	38

3.1.10 Preparación de los Especímenes de Mortero	40
3.1.11 Análisis Mecánico.	43
4. RESULTADOS	44
4.1 CARACTERIZACION DEL AGREGADO NATURAL	44
4.2 CARACTERIZACION DE LA CENIZA	45
4.3 GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL AGREGADO FINO Y LA CENIZA	46
4.4 EQUIVALENTE DE ARENA	46
4.5 CONTENIDO MATERIA ORGÁNICA EN AGREGADO FINO	47
4.6 CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA EN LA CENIZA	47
4.7 PESO ESPECÍFICO PARA LAS DIFERENTES MEZCLAS DE CENIZA	
CEMENTO	47
4.8 CONSISTENCIA NORMAL Y TIEMPO DE FRAGUADO	48
4.9 ENSAYO DE FLUIDEZ.	52
4.10 ENSAYO DE COMPRESION	53
5. ANALISIS DE RESULTADOS	59
CONCLUSIONES	63
BIBLIOGRAFIA	65
ANEXOS	68

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Ejecución del ensayo de granulometría	33
Figura 2. Ensayo de Materia Orgánica	34
Figura 3. Determinación de Materia Orgánica en la Ceniza.	34
Figura 4. Equivalencia de arena.	36
Figura 5. Caracterización de Cemento-Ceniza	37
Figura 6. Tiempo de Fraguado	38
Figura 7. Prueba de fluidez	39
Figura 8. Elaboración de especímenes	41
Figura 9. Prueba a Compresión de cubos de mortero (cemento y cemento-ceniza)	43
Figura 10 Granulometría correspondiente a la muestra de $MF_1= 2,65$ Curva granulométrica	44
Figura 11 Granulometría correspondiente a la muestra de $MF_2= 2,55$ Curva granulométrica	45
Figura 12. Granulometría correspondiente a la muestra de ceniza con un valor promedio de Módulo de Finura de 2,41.	46
Figura 13. Ensayo de contenido de materia orgánica en arena	47
Figura14. Tiempo de fraguado para morteros preparados para 100 % de cemento	49
Figura 15. Tiempo de fraguado para morteros preparados para 50 % de cemento-50% de ceniza	49
Figura 16. Tiempo de fraguado para morteros preparados para 60 % de cemento-40% de ceniza	50
Figura 17. Tiempo de fraguado para morteros preparados para 70 % de cemento-30% de ceniza	50

Figura 18. Tiempo de fraguado para morteros preparados para 80 % de cemento-20% de ceniza	51
Figura 19. Tiempo de fraguado para morteros preparados para 90 % de cemento-10% de ceniza	51

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Fluidez Recomendada del Mortero para Diversos tipos de Estructura y Condiciones de Colocación	22
Tabla 2. Proporciones del mortero y resistencia esperada	28
Tabla 3 Aplicaciones de diferentes tipos de mortero	28
Tabla 4 Usos del mortero de cemento y cal	29
Tabla 5 Evaluación del comportamiento mecánico de morteros modificados con ceniza de localizaciones petroleras.	31
Tabla 6 Información para interpretación de ensayo de mesa de flujo	40
Tabla 7. Matriz experimental	42
Tabla 8. Matriz Experimental	42
Tabla 9. Peso específico de las diferentes muestras	48
Tabla 10. Ensayo de Consistencia Normal	48
Tabla 11. Fluidez mdf1=2.65	52
Tabla 12. Fluidez mdf2=2.55	52
Tabla 13. Resultados de resistencia a la compresión con morteros preparados con MF1 y MF2 100% cemento	53
Tabla 14. Resultados de resistencia a compresión en diferentes periodos de Tiempo para morteros con proporción 50% cemento y 50% ceniza	54
Tabla 15. Resultados de compresión de especímenes de mortero con MF1 y MF2 preparados con 60% de cemento y 40% de ceniza	55
Tabla 16. Resultados de compresión de especímenes de mortero con MF1 y MF2 preparados con 70% de cemento y 30% de ceniza	56
Tabla 17. Resultados de compresión de especímenes de mortero con MF1 y MF2 preparados con 80% de cemento y 20% de ceniza	57
Tabla 18. Resultados de compresión de especímenes de mortero con MF1 y MF2 preparados con 90% de cemento y 10% de ceniza	58
Tabla 19 Tiempos de fraguado	60

Tabla 20. Resistencia a compresión a las 24 horas de fundido el mortero MF1	61
Tabla 21. Resistencia a compresión a los 3 días de fundido el mortero MF1	61
Tabla 22. Resistencia a compresión a los 7 días de fundido el mortero MF1	61
Tabla 23. Resistencia a compresión a los 28 días de fundido el mortero MF1	61
Tabla 24. Resistencia a compresión a las 24 horas de fundido el mortero MF2	62
Tabla 25. Resistencia a compresión a los 3 días de fundido el mortero MF2	62
Tabla 26. Resistencia a compresión a los 7 días de fundido el mortero MF2	62
Tabla 27. Resistencia a compresión a los 28 días de fundido el mortero MF2	62

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Tabla de clasificación de suelos según la AASTHO	69
Anexo B . Granulometría del agregado fino	70
Anexo C. Granulometría de la ceniza	72
Anexo D. Gravedad Específica del agregado fino	74
Anexo E. Gravedad Específica de la ceniza	75
Anexo F. Equivalente de arena.	76
Anexo G. Materia orgánica ceniza	77
Anexo H. Datos recolectados de tiempo de fraguado	78
Anexo I. Mezcla 50% Cemento 50% Ceniza (115 ml agua – 5 mm penetración)	79
Anexo J. Mezcla 60% Cemento 40% Ceniza (14 ml agua – 10 mm penetración)	80
Anexo K. Mezcla 70% Cemento 30% Ceniza (150 ml agua – 10 mm penetración)	81
Anexo L. Mezcla 80% Cemento 20% Ceniza (155 ml agua – 11 mm penetración)	82
Anexo M. Mezcla 90% Cemento 10% Ceniza (170 ml agua – 9 mm penetración)	83
Anexo N. Medida de Fluidez	84

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MORTEROS MODIFICADOS CON CENIZA DE LOCACIONES PETROLERAS

AUTOR(ES): Julián Felipe Arenas Díaz
Carlos Orlando Sarmiento Garcés

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): María Fernanda Serrano Guzmán

PALABRAS CLAVES: Mortero, Ceniza, Mezcla,

La producción de concreto requiere el consumo de gran cantidad de recursos naturales pertenecientes al suelo y al agua. La arena, que se extrae de ríos o de peñas es uno de los insumos más utilizados tanto para la fabricación de concreto como de mortero. En este trabajo, se plantea el uso de la ceniza proveniente de locaciones petroleras, como un sustituto de la arena en la preparación de morteros.

Se preparó una muestra testigo, elaborada con 100% de cemento, y muestras adicionales dosificadas con 50% cemento – 50% Ceniza, 60% Cemento – 40% Ceniza, 70% Cemento – 30% Ceniza, 80% Cemento – 20% Ceniza y 90% Cemento – 10% Ceniza. Los morteros fueron ensayados siguiendo la norma ICONTEC NTC 220, en donde se plantea el desarrollo de pruebas mecánicas a especímenes en estado endurecido luego de 24 h, 3 días, 7 días y 28 días.

Se encontró en el análisis granulométrico y ensayo de gravedad específica que la ceniza tiene un comportamiento similar al del agregado fino. Los resultados de los especímenes con adición de ceniza evidenciaron que la posible proporción óptima para la mezcla de morteros es aquella preparada con 10% adición de ceniza y 90% de contenido de cemento mas agregado fino, esto con el fin de observar favorables condiciones al momento de las pruebas a compresión en las probetas analizadas.

ABSTRACT

TITLE: MECHANICAL EVALUATION OF THE BEHAVIOR MODIFIED MORTARS WITH ASH OF PETROLEUM LOCATIONS

**AUTHOR(S): Julian Felipe Arenas Diaz
Carlos Orlando Sarmiento Garces**

FACULTY: Faculty of Civil Engineering

DIRECTOR (A): María Fernanda Serrano Guzmán

KEYWORDS: Mortar, Ash, Mixed

Concrete production requires large amounts of natural resources that normally are taken from soil and water. The sand, which is extracted from rivers or rocks is one of the most used materials in preparation of mortar. In this work has been tested fly ash, coming from hydrocarbon industry, as a proportion of cement in mortars mixtures. For doing that, it was prepared a control sample using 100% cement, and additional samples mixed with 50% cement - 50% fly ash , 60% cement – 40 % fly ash, 70% cement - 30% fly ash, 80% cement - 20% fly ash, 90% Cement - 10% fly ash. The mixtures were tested following the standard ICONTEC NTC 220, which proposes the development of mechanical tests on the hardened specimens after 24 h, 3 days, 7 days and 28 days.

The results presented that specific gravity and sieve distribution in fly ash had a behavior similar to the fine aggregate. Besides, the use of 10% of fly ash and 90% of cement shown the best compression strength results, indicating that is the adequate proportion this kind of mixtures.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente el panorama nacional industrial productor de energía ha venido afrontando un problema de grandes magnitudes ambientales con respecto a la disposición final de los residuos orgánicos tales como lo son las cenizas volantes, residuo que también es producido durante el procesamiento del crudo.

A su vez, la industria de la construcción, la cual se encuentra en unos de sus mejores momentos, está teniendo dentro de su financiación altos costos debido principalmente a los elevados precios de una de sus materias esenciales, como lo es el cemento.

Integrando el problema de la industria proveniente de los derivados del carbón y de hidrocarburos con el problema de los altos costos del cemento de la industria de la construcción, surge la posibilidad de aportar una solución que desembocaría en una relación costo-beneficio positiva recíproca.

Desde ya hace unas cuatro décadas aproximadamente ingenieros tanto en el Norte de América como de la Gran Bretaña empezaron a utilizar en sus diseños de mezcla un material no convencional para la producción del cemento: residuos provenientes de la calcinación del carbón en forma de ceniza. Esta ceniza, que para algunos pudiera ser considerada como un residuo despreciable, empezó a tener una buena aplicación en la calidad del cemento, a tal punto, que en Escocia fue empleada en el concreto de la hidroeléctrica construida por Clatworthy and Lubreoch Dams. Por esta razón, durante los años 50's se consideró a la ceniza volante como un material cementante parcial al ser utilizado en la mezcla de concreto. La estructura aun permanece en excelentes condiciones. (Newman, 2003).

En los años venideros han sido más aquellos que han incrementado esta adición ya que aquel residuo que para una compañía encargada de generar energía puede resultar como tedioso al momento de deshacerse de él, para un Ingeniero puede resultar un gran. Se ha encontrado en algunos de sus resultados al momento de su aplicabilidad que estas cenizas poseen propiedades cementantes capaces de ayudar a fortalecer la mezcla.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La ceniza es un residuo sólido, ampliamente utilizado en la producción del cemento y en la modificación de concretos y morteros y su presencia mejora la matriz del cemento portland y favorece las propiedades mecánicas de las mezclas en las que se utiliza (Aldea y Shah, 2011; Rajamane y otros, 2007; Azevedo y otros, 2001).

La industria de producción del petróleo a nivel de Santander, está generando una gran cantidad de cenizas cuyo aplicación en construcción está siendo evaluada por el grupo de investigación en Detección de Contaminantes y remediación, DeCoR, quienes mediante el desarrollo de investigaciones están definiendo aplicaciones de uso industrial de este residuo.

1.2 JUSTIFICACIÓN

En el desarrollo socioeconómico del país, cobra auge la industria de materiales de la construcción y en especial la del cemento, por la gran demanda nacional de fabricar viviendas, industrias, escuelas, poblados campesinos, edificios, presas, etc. y satisfacer las necesidades en materiales para la población. Por esto, se justifican las investigaciones relacionadas con materiales alternativos (no convencionales), como la ceniza buscando disminuir el consumo de recursos naturales para la preparación de materiales convencionales.

En este trabajo se utilizó ceniza proveniente de locaciones petroleras, que en la actualidad representa un problema por la inadecuada disposición. Como una iniciativa del Instituto Colombiano del Petróleo ICP y Ecopetrol se presentó la alternativa de aprovechamiento de la ceniza, y la búsqueda de aplicaciones industriales para la misma, preferiblemente para la construcción. Logrando demostrar que la ceniza es favorable en el comportamiento mecánico de los morteros, representa un impacto ambiental positivo por el uso de este residuo, pudiendo incluso disminuir el precio del cemento y de esta forma el país podría seguir su crecimiento sin ningún inconveniente.

1.3 ALCANCE

En este estudio se prepararon morteros con dos relaciones agua cemento y utilizando dos tipos de material fino con módulos de finura diferente. La dosificación del mortero se hizo mediante la adición de ceniza como porcentaje del cemento, con variaciones de 10%, 20%, 30%, 40% y 50%. Las muestras totales de morteros fueron ensayados a las 24 horas, 3 días, 7 días y 28 días se componen de un total de 144 especímenes.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General.

- Evaluar el comportamiento mecánico de morteros modificados con ceniza provenientes de locaciones petroleras.

1.4.2 Objetivo Especifico.

- Caracterizar mecánicamente la ceniza, el agregado fino y el cemento.
- Identificar las variaciones en fluidez para morteros con diferentes relaciones A/C y diferente porcentaje de ceniza como proporción del cemento.
- Evaluar la resistencia a compresión de morteros preparados con diferentes proporciones de porcentaje de ceniza como proporción del cemento.

1.5 RELEVANCIA DEL TRABAJO

En septiembre de 2011 se llevó a cabo la reunión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería, en donde se discutió la pertinencia de los trabajos que se realizan al interior de las universidades y la coherencia con las necesidades del entorno. Este trabajo responde a una iniciativa de Ecopetrol ICP, con la cual se pretende desde la Academia aportar soluciones para el aprovechamiento de ceniza en diferentes usos, siendo objeto de este estudio el mortero.

1.6 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

Este documento empieza con una introducción y objetivos del estudio. Continúa, con generalidades sobre mortero y ceniza. Posteriormente, en el capítulo tres se describe la metodología seguida en el trabajo desarrollado. El Capítulo 4 corresponde a la presentación de los resultados, siendo el Capítulo 5 dedicado al análisis de estos resultados. Finaliza el documento con conclusiones relacionadas con los hallazgos relevantes encontrados.

2. GENERALIDADES SOBRE MORTEROS Y CENIZA

Para abordar el estudio de la evaluación del comportamiento mecánico de morteros modificados con ceniza de locaciones petroleras, es necesario presentar una descripción general de cada uno de los componentes del mortero e incluir el tema de la ceniza. Se entiende que el mortero está formado fundamentalmente por cemento, arena y agua, y en ocasiones se añaden aditivos. Por ceniza, se entiende como residuo inerte proveniente de diferentes actividades industriales.

2.1 DEFINICIÓN DE MORTERO:

El mortero puede definirse como la mezcla de un material aglutinante (cemento Portland y otros cementantes), un material de relleno (agregado fino u arena), agua y eventualmente aditivos que al endurecerse presentar propiedades químicas, físicas y mecánicas similares a las del concreto y es ampliamente utilizado para pegar piezas de mampostería en la construcción de muros, o para recubrirlos, en cuyo caso se le conoce como pañete, repello u revoque. Sin embargo, dependiendo de su composición existen varios tipos (Sánchez de Guzmán, 2001).

2.1.1 Propiedades del mortero. Las propiedades del mortero dependen en esencia de las propiedades del cemento con el que se fabrica así como de la calidad de la arena con la cual se va a hacer la mezcla. Una vez humedecido el cemento, se inicia el proceso de hidratación producto del cual, es posible considerar propiedades del mortero tanto en estado plástico como en estado endurecido.

Las principales propiedades del mortero en estado plástico son:

2.1.1.1 Manejabilidad: Al igual que en el concreto, es una medida de la facilidad de colocación de la mezcla, en este caso en las unidades de mampostería o en revestimientos. La manejabilidad está relacionada con la consistencia, la cual se refiere al estado de fluidez del mortero, es decir, que tan dura (seca) o blanda (fluida) es la mezcla cuando se encuentra en estado plástico, también depende de la proporción de arena y cemento y de la forma, textura y módulo de finura de la arena. Para medir la manejabilidad del mortero se usa el ensayo de fluidez descrito en la Norma NTC No. 111, aunque en la práctica, hasta ahora, se ha definido por la apreciación del personal en obra (Tabla 1). (Sánchez de Guzmán, 2001).

Tabla 1. Fluidez Recomendada del Mortero para Diversos tipos de Estructura y Condiciones de Colocación

FLUIDEZ %	CONSISTENCIA	CONDICIÓN DE COLOCACIÓN	EJEMPLO DE TIPOS DE ESTRUCTURA	EJEMPLO DE SISTEMA DE COLOCACIÓN
80 – 100	Dura (seca)	Secciones sujetas a vibración	Reparaciones, recubrimiento de túneles, galerías, pantallas de cimentación, pisos	Proyección neumática, con vibradores de formaleta
100 – 120	Media (plástica)	Sin vibración	Pega de mampostería, baldosines, pañetes y revestimientos	Manual con palas y palustres
120 – 150	Fluida (húmeda)	Sin vibración	Pañetes, rellenos de mampostería estructural, morteros autonivelantes para pisos	Manual, bombeo, inyección

Fuente: Rivera López, Gerardo Antonio. Concreto Simple.1992

2.1.1.2 Retención de agua: esta propiedad se refiere a la habilidad del mortero para mantener su plasticidad cuando queda en contacto con la superficie absorbente, como una pieza de mampostería. Para mejorar la retención de agua en la mezcla de mortero se puede agregar cal, dada su capacidad plastificante aunque no necesariamente ya que hoy en día se presentan otras alternativas igualmente satisfactorias como son: mayores contenidos de finos, la adición de aditivos plastificantes y agentes incorporadores de aire o simplemente utilizando cementos puzolánicos o cementos de adición. La retención de agua incide altamente en la velocidad de endurecimiento y en la resistencia final a la compresión, ya que, por ejemplo, una mezcla incapaz de retener el agua no permite la hidratación del cemento. (Sánchez de Guzmán, 2001)

2.1.1.3 Velocidad de endurecimiento: Los tiempos de fraguado final e inicial de la mezcla de mortero deben estar entre los límites adecuados. Por lo general, oscilan entre valores de 2 y 24 horas; sin embargo éstos dependen de algunos factores adversos tales como las condiciones ambientales como el clima y humedad o composición de la mezcla. (Sánchez de Guzmán, 2001)

Propiedades del mortero en estado endurecido son (Sánchez de Guzmán, 2001):

2.1.2 Retracción: Se debe principalmente a las reacciones químicas de hidratación de la pasta, sobre todo en pastas puras con una alta relación agua/cemento. Para mejorar esta retracción y evitar agrietamientos es conveniente utilizar arenas con granos de textura rugosa, y tener en cuenta además que en clima caliente y de muchos vientos, el agua tiende a evaporarse más rápidamente produciendo tensiones internas en el mortero, que se traducen en grietas visibles. La retracción es proporcional al espesor de la capa, a la riqueza en cemento de la mezcla y a la mayor absorción de la pared sobre la que se vaya a aplicar. Para evitar la retracción es conveniente usar entonces cementos de baja retracción al secado (puzolánicos o con adición inerte) y arenas con buena granulometría con pocos finos.(Sánchez de Guzmán, 2001)

2.1.2.1 Adherencia: Es la capacidad de absorber, tensiones normales y tangenciales a la superficie que une el mortero y una estructura, es decir a la capacidad de responder monolíticamente con las piezas que une ante solicitudes de carga. En el caso de la mampostería, para obtener una buena adherencia es necesario que la superficie sobre la que se va a colocar el mortero sea tan rugosa como sea posible y tenga una absorción adecuada, comparable con la del mortero.(Sánchez de Guzmán, 2001)

2.1.2.2 Resistencia: Si el mortero es utilizado como pega, debe proporcionar una unión resistente. Si el mortero va a ser utilizado para soportar cargas altas y sucesos, tal es el caso de la mampostería estructural, debe poseer una alta resistencia a la compresión.

Para diseñar morteros de alta resistencia se debe tener en cuenta que para un mismo cemento y un mismo tipo de agregado fino, el mortero más resistente y más impermeable será aquel que contenga mayor contenido de cemento para un volumen dado de mortero; y que para un mismo contenido de cemento en un volumen determinado de mortero el más resistente y probablemente el más impermeable será aquel mortero que presente mayor densidad, o sea aquel que en la unidad de volumen contenga el mayor porcentaje de materiales sólidos.

El tamaño de los granos de la arena juega un papel importante en la resistencia del mortero; un mortero hecho con arena fina será menos denso que un mortero hecho con arena gruesa para un mismo contenido de cemento. Por último el contenido de agua del mortero tiene influencia sobre su resistencia; los morteros secos dan mayor resistencia que los morteros húmedos, porque pueden ser más densamente compactados.(Sánchez de Guzmán, 2001)

2.1.2.3 Durabilidad: Al igual que en el concreto, la durabilidad se define como la resistencia que presenta el mortero ante agentes externos como: Baja temperatura, penetración de agua, desgaste por abrasión y agentes corrosivos. En general, se puede decir que morteros de alta resistencia a la compresión tienen buena durabilidad. (Sánchez de Guzmán, 2001)

2.1.2.5 Apariencia: La apariencia del mortero después de fraguado juega un importante papel en las mamposterías de ladrillo a la vista; para lograr una buena apariencia es necesario aplicar morteros de buena plasticidad. (Sánchez de Guzmán, 2001)

2.1.2.6 Densidad: Se define como el peso por unidad de volumen. Depende del peso específico y de la proporción en que participan cada uno de los diferentes materiales constituyentes del mortero. Para los morteros convencionales confeccionados con materiales granulares provenientes de rocas sin contenidos de minerales metálicos, su valor oscila entre 1.8 y 2.3 Kg/dm³. La densidad normalmente experimenta ligeras variaciones con el tiempo, que provienen de la evaporación del agua de amasado hacia la atmósfera y que en total puede significar una variación de hasta un 5 % de su densidad inicial. (Velásquez Valdivia, 2007).

2.1.2.7 Resistencia a la compresión. Se establece en la NTC 220 para los cementos, en lo que concierne a forma y dimensiones de la probeta (50mm x50mm x50mm). (Icontec, 2004). La norma plantea la elaboración de especímenes (cubos) para ensayarse de medidas entre 50 mm ó 50,8 mm se apisonan en dos capas. Los cubos son curados un día en los moldes, luego se desmoldan y se sumergen en agua con cal hasta el momento del ensayo.

2.1.2.8 Variación de volumen. El mortero experimenta variaciones de volumen, dilataciones o contracciones, durante toda su vida útil por causas físico - químicas. El tipo y magnitud de estas variaciones están afectados en forma importante por las condiciones ambientales existentes de humedad y temperatura y también por los componentes presentes en la atmósfera. La variación de volumen derivada de las condiciones de humedad se denomina retracción hidráulica, y las que tienen por causa la temperatura, retracción térmica. (Velasquez Valdivia, 2007).

Por su parte, de las originadas por la composición atmosférica, la más frecuente es la producida por el anhídrido carbónico y se denomina retracción por carbonatación. (Velasquez Valdivia, 2007).

Las variaciones de volumen ocasionan retracción en los morteros. La retracción puede ser hidráulica, térmica y por carbonatación.

2.1.3Retracción hidráulica. Los parámetros preponderantes en la retracción hidráulica son (Velasquez Valdivia, 2007):

2.1.3.1Composición química del cemento: Influye principalmente en la variación de volumen, dado que ésta deriva del desarrollo del proceso de fraguado. En estas condiciones, si la composición del cemento favorece un fraguado rápido de la pasta, ella también será favorable para una más alta contracción inicial, si existen condiciones ambientales no saturadas de humedad. Por las razones indicadas, un alto contenido de C3A favorecerá una rápida y alta contracción.

2.1.3.2Finura del cemento: Una mayor finura del cemento favorece también una evolución rápida de sus propiedades, en particular de su fraguado.

2.1.3.3 Dosis de cemento: Existe una relación casi directa entre la dosis de cemento y la retracción hidráulica por estas causas.

2.1.3.4Dosis de agua: Dado que un mayor contenido de agua en el interior del mortero conducirá a una mayor cantidad de fisuras y poros saturados, desde donde se origina la tensión superficial.

2.1.3.5Porosidad de los áridos: El valor de la retracción por esta causa queda condicionado por la finura del árido, siendo mayor cuando ésta aumenta, puesto que ello implica una mayor cantidad de discontinuidades en la masa del árido.

2.1.4 Retracción térmica: El mortero puede experimentar variaciones de volumen causadas por la temperatura, las cuales pueden provenir tanto externamente de la temperatura ambiente como internamente de la generada durante el fraguado y endurecimiento de la pasta de cemento. Como consecuencia de lo expresado, los principales factores que condicionarán la magnitud de la retracción térmica son los siguientes(Velásquez Valdivia, 2007):

2.1.4.1Variaciones derivadas de causas externas: magnitudy velocidad de las variaciones de temperatura ambiental

2.1.4.2 Variaciones por causas internas: se deben considerar las características del cemento, contenido de C_3A , finura de molienda y temperatura en el momento de su incorporación en el mortero.

2.1.5 Retracción por carbonatación: El proceso de hidratación de la pasta de cemento deja una cierta proporción de cal libre, es decir, sin participar en el proceso químico de fraguado. Este hidróxido de calcio es susceptible de combinarse con el anhídrido carbónico del aire, produciendo carbonato de calcio, combinación química que tiene un carácter contractivo, por lo cual el espesor de mortero afectado por él disminuye su volumen inicial, generándose la denominada retracción por carbonatación (Velásquez Valdivia, 2007).

En general, el espesor afectado es pequeño, alcanzando sólo algunos milímetros en la zona cercana a la superficie en contacto con el aire. Sin embargo, por el confinamiento que produce el mortero interior adyacente, esa capa queda sometida a tensiones de tracción, pudiendo fisurarse.

El proceso alcanza mayor magnitud si el hormigón se presenta superficialmente seco, la humedad relativa del aire tiene un grado de humedad intermedio, alrededor de 50%, y el mortero es poco compacto. Disminuye, en cambio, significativamente si el hormigón está saturado, pues el agua impide la difusión del anhídrido carbónico en los poros del hormigón, o la humedad ambiente es muy baja, inferior a 25%, pues el desarrollo de la carbonatación requiere de un cierto grado de humedad mínimo. En consecuencia, para atenuar los efectos de la carbonatación es necesario efectuar un buen curado del mortero.

2.2 ARENA.

Son partículas que se encuentran en su mayor extensión a lo largo de todo el mundo resultando de la disgregación de rocas graníticas, arrastradas por las aguas y depositadas por orden de densidad en capas sensiblemente paralelas, metal o mineral reducido por la naturaleza o el hombre, se componen esencialmente de sílice, arcilla e impurezas diversas. Su locación se podría definir en lugares donde es más propenso que se de una roca de estas características denominados canteras de donde se hace su extracción por medio de explosivos u otros mecanismos más tecnificados para dar con su resultado.

Para determinar la calidad esencial al momento de su utilización en la industria de la construcción son necesarias algunas pruebas periódicas, ya que las

propiedades se ven afectadas por factores como la contaminación con materiales extraños, por acción del desmoldeo, por el cambio gradual y la distribución de los tamaños de grano y por la continua exposición a altas temperaturas, las pruebas pueden ser tanto físicas como mecánicas.

2.2.1 Entre las propiedades de las arenas. Se destacan las siguientes (Illescas Sánchez, 2001):

2.2.1.1 Permeabilidad: Esta propiedad consiste en la capacidad que posee un material para dejar pasar entre sus partículas una cantidad apreciable de fluido en un tiempo determinado, e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable. En estos casos la porosidad de la arena es la que permite la permeabilidad, y el escape de gases y vapores formados en el molde. (Illescas Sánchez, 2001)

2.2.1.2 Resistencia: la arena debe ser de naturaleza cohesiva hasta el grado de que tenga suficiente unión entre sus partículas u otras con características similares, tanto el contenido de agua como el de arcilla, afecta la propiedad de cohesión.

Desde el punto de vista de durabilidad en medios agresivos deben preferirse los áridos de tipo silíceo (gravas y arenas de río o de cantera) y los que provienen de machaqueo de rocas volcánicas (basalto, andesita) o de calizas sólidas y densas; las rocas sedimentarias (calizas, dolomitas) y las volcánicas sueltas (pómez, toba) deben ser objeto de análisis. No deben emplearse áridos que provengan de calizas blandas, feldespatos, yesos, piritas o rocas porosas. (Illescas Sánchez, 2001)

2.3 TIPOS DE MORTEROS

En términos generales, dentro de los morteros se incluyen dos tipos: los aéreos y los hidráulicos. Los primeros se endurecen bajo la influencia del aire, al perder agua por secado al aire y fraguan lentamente por un proceso de carbonatación. Los hidráulicos, también conocidos como acuáticos, son aquellos que endurecen con la acción del agua ya que al igual que los cementos naturales poseen en su composición, constituyentes que se obtienen por calcinación de calizas impurificadas con sílice y alúmina que le permiten desarrollar resistencias iniciales relativamente altas. (Sánchez de Guzmán, 2001).

2.3.1 Morteros de cemento y arena. Las aplicaciones del mortero convencional son comunes en labores de friso, revoques mampostería y rellenos de algunas estructuras. La Tabla 2 muestra las proporciones (volumen), su uso y su mejor desempeño de las diferentes clases de mortero

Tabla 2. Proporciones del mortero y resistencia esperada

MORTEROS DE CEMENTO Y ARENA					
Tipo de Mortero	Proporción en Volumen		Kg cemento por m ³ de mortero	Empleo Preferente	Resistencia Kg/cm ²
	Cemento	Arena			
Ricos	1	1	800	Revoques, pañete o friso impermeable.	160
	1	2	600	Enlucidos, revoque de zócalos, corrido de cornisas.	
	1	3	450	Bóvedas tabicadas, muros muy cargados, pavimentos.	
Ordinarios	1	4	380	Bóvedas de escalera, tabiques de rasilla.	130
	1	5	300	Muros cargados, fábrica de ladrillos.	98
Pobres	1	6	250	Fábricas cargadas	75
	1	8	200	Muros sin carga.	50
	1	10	170	Rellenos para solado.	30

Fuente: Tomado y adaptado de (http://www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_const/Tema9.pdf, Julio 8 de 2012).

2.3.2 Morteros de cal y arena. Las cales aéreas más conocidas son la cal blanca y la cal dolomítica (cal gris). La arena en este caso en realidad constituye un material inerte cuyo objetivo principal es evitar el agrietamiento y contracción del mortero, para lo cual se recomienda que tenga partículas angulosas y este libre de materia orgánica, piedras grandes, polvo y arcilla. (Sánchez de Guzmán, 2001).

La Tabla 3 de morteros de cal y arena muestra la aplicación que tiene el mortero para las diferentes aplicaciones en obra.

Tabla 3 Aplicaciones de diferentes tipos de mortero

Morteros de cal y arena		
Proporción en volumen		Empleo preferente
Pasta de cal	Arena	
1	1	Enlucidos
1	2	Revoque, pañete, repello
1	3	Muros de ladrillo
1	4	Muros de mampostería

Fuente: http://www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_const/Tema9.pdf, 2012

2.3.3 Morteros de cemento y cal. Cuando se busca una gran trabajabilidad, buena retención de agua y altas resistencias iniciales este tipo de mortero es aconsejable. Utilizando como base un mortero 1:3 se puede ir sustituyendo parte del cemento por cal. Estos morteros reciben el nombre de “Morteros de cemento rebajados” cuando el contenido de cemento es escaso. Los morteros hechos de cementos y cal deben combinarse de tal manera que se aprovechen las propiedades adhesivas de la cal y las propiedades cohesivas del cemento, siendo importante tener en cuenta que cada adición de cal incrementa la cantidad de agua de mezclado necesaria. (Sánchez de Guzmán, 2001). En la Tabla 4 se presenta la aplicación en ingeniería de los morteros con cemento y cal.

Tabla 4 Usos del mortero de cemento y cal

Morteros de cemento y cal			
Proporción en volumen			Empleo preferente
Cemento	Pasta de Cal	Agua	
1	1	6	Muros cargados, impermeables
1	1	8	Muros poco cargados
1	1	10	Cimientos
4	1	12	Revoques impermeables

Fuente: http://www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_const/Tema9.pdf, 2012.

2.4 FLY ASH O CENIZA VOLANTE

La ceniza volante consiste principalmente de silicatos vítreos, es decir de material mineral que se encuentra en un 90 % en la corteza terrestre formado esencialmente de oxígeno, sílice, alúmina y hierro además de unos minerales secundarios tales como magnesio, azufre, sodio, potasio y carbono.

La densidad de conjunto es aproximadamente de 0.89 g/cm^3 y el peso específico de las partículas oscila entre 2.0 y $2,9 \text{ g/cm}^3$. Estas son el resultado del carbón utilizado en la combustión de plantas eléctricas donde son llevados a un grado de finura tal para mezclarse con el aire caliente en precipitadores electrostáticos ya después de haber pasado por unidades de fogones/pulverización de carbón, y hornos de bajas presiones (Santaella, 2001).

Según la norma NTC 3493(1993) la ceniza se catalogan en 2 clases:

2.4.1 Clase C: cenizas volantes producidas a partir de la combustión de lignitos y carbones sub-bituminosos donde el contenido de cal está por encima del 15%,

estos son requeridos en estructuras de altas resistencias iniciales, como hormigón pretensado además de ser muy útil para la estabilización de suelos.

2.4.2 Clase F: provenientes de la combustión de antracita o lignito, estas contienen cantidades de cal por debajo del 15% pero son superiores a las clases C pues poseen una combinación de sílice, aluminio y hierro. Modera el calor de hidratación durante el curado de la mezcla haciéndolo óptimo para hormigones de alta resistencia y producción en masa. Se recomienda usar en hormigones donde estén expuestos a aguas subterráneas.

2.4.3 Clase N: son puzolanas naturales, calcinadas o crudas, que cumplen con los requisitos indicados en esta norma, aplicables a puzolanas como: algunas tierras diatomáceas; pedernales y esquistos opalinos, tobas y cenizas volcánicas o piedra pómez.

Entre más alto sea el contenido de carbono en las cenizas volantes, más agua se necesita para producir una pasta normal. La incorporación de cenizas volantes reduce en general la demanda de agua, mejora la manejabilidad y reduce la segregación. Los beneficios asociados a las cenizas volantes pueden propiciar la reducción de la relación agua/cemento manteniendo la trabajabilidad. Estas tienen la propiedad de multiplicar las propiedades cementicias en la mezcla, reduciendo a su vez el porcentaje de poros.

En la tabla 5 se puede ver la comparación de la composición química del cemento portland y las cenizas volantes de ambas clases (Rajamane N.P., J. A. Peter, P.S. Ambily, 2007). Se observa la similitud entre los elementos que los componen, aunque existe una diferencia muy notoria y es la presencia de cal que tiene muy por encima el cemento Portland mientras las cenizas carecen de ella, pero a su favor presentan altas cantidades de silicatos reactivos que el cemento no posee. Una mezcla entre ambos componentes provoca un mejor producto de hormigón realzando las propiedades de ambos.

Tabla 5 Evaluación del comportamiento mecánico de morteros modificados con ceniza de localizaciones petroleras.

Componente Químico	Cenizas Volantes (clase F)	Cenizas Volantes (clase C)	Cemento Portland
SiO	54.90	39.90	22.60
Al₂O₃	25.80	16.70	4.30
Fe₂O₃	6.90	5.80	2.40
CaO	8.70	24.30	64.40
MgO	1.80	4.60	2.10
SO₃	0.60	3.30	2.30
Na₂O & K₂O	0.60	1.30	0.60

Fuente: Canals, 2007.

Entre algunas de las ventajas que presenta la inclusión de este material a la mezcla de concreto están: resistencia al ataque de sulfatos, tiempo de fraguado, reducción de sangrado, reducción del calor de hidratación, disminución de la permeabilidad en el concreto.

Los beneficios pueden ir de la mano al momento de reducir costos ya que se podría pensar en sustituir el cemento por las cenizas volantes en ciertos porcentajes de proporciones.

3. METODOLOGIA

La dosificación del mortero se hizo mediante la adición de ceniza como porcentaje del cemento, con variaciones de 10%, 20%, 30%, 40% y 50%. Las muestras totales de morteros fueron ensayados a las 24 horas, 3 días, 7 días y 28 días se componen de un total de 144 especímenes. Cuando se va a preparar un mortero con adición de ceniza volante, se deben caracterizar los materiales posteriormente definir aquellos que se pueda utilizar para preparación de la mezcla o pasta. El procedimiento que se siguió para lapreparación de la mezcla fue el siguiente:

3.1 CARACTERIZACION DEL MATERIAL GRANULAR Y LA CENIZA

La caracterización del agregado fino y la ceniza incluyó las pruebas de granulometría, gravedad específica y materia orgánica para la arena. La ceniza fue sometida a granulometría y contenido de materia orgánica.

3.1.1Análisis granulométrico del agregado fino y la ceniza. La etapa de la caracterización de los agregados finos y la ceniza se inició con el ensayo de granulometría, basado en la norma NTC 77(ICONTEC, 2004). Se tomó una muestra de la arena adyacente a los laboratorios de materiales de construcción, la cual se redujo por cuarteo manual para obtener las cantidades requeridas para la realización de todos los ensayos que se efectuaron. Cabe resaltar que este procedimiento se realizó tanto para el agregado fino (arena) como para la ceniza.

Cada una de las muestras cuarteadas se escogió como un ensayo. Éste comenzó con el secado de la muestras a una temperatura entre $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ y se determinó la masa de las mismas. Después de secado, se lavaron las muestras sobre un tamiz de $75\ \mu\text{m}$ (No. 200); seguido a esto, se secaron y se determinó su masa. Este procedimiento se hizo para determinar la cantidad de material fino que pasó a través del tamiz.

Figura 1 Ejecución del ensayo de granulometría



Después de lavadas y secadas las muestras, se seleccionó la cantidad de materiales finos para realizar el análisis granulométrico. Luego, se escogió el grupo de tamices adecuados, colocándolos en orden decreciente por tamaño de abertura. Seguido a esto, inició el proceso de tamizado haciendo pasar las muestras por los tamices, empezando por el de mayor abertura. A medida que se avanzaba en el proceso, se iba determinando la cantidad de material retenido en cada tamiz.

Una vez terminado todo el proceso, se procedió a realizar los cálculos necesarios. El ensayo de granulometría se realizó cuatro(4) veces para el agregado fino (arena) y 2 veces para la ceniza volante. De este ensayo se obtuvo el módulo de finura del material que se ensayó. (Figura 1)

3.1.2 Contenido de materia orgánica en arena. De cada una de las muestras cuarteadas se escogió una porción para el ensayo. Éste se inició preparando una solución de hidróxido de sodio al 3 %. Los agregados finos se dejaron al aire y se tomaron cerca de 450 g para el ensayo. Se colocó el material en el frasco de ensayo hasta completar un volumen aproximado de 130 ml. Se le añadió la solución de hidróxido hasta lograr que el volumen total de agregado y líquido fuera aproximadamente de 200ml. Después, se agitó el frasco y se dejó reposar por 24 horas.

Para definir con mayor precisión el color del líquido de la muestra ensayada, se utilizaron cinco vidrios de color (Figura 2). El resultado del ensayo fue el número de la placa orgánica, cuyo color haya sido similar al color del líquido de la muestra.

Figura 2. Ensayo de Materia Orgánica



3.1.3 Contenido de Materia Orgánica en la Ceniza. Se realizó el método tomando una muestra de ceniza (Figura 3), siendo el objetivo determinar el porcentaje o contenido de materia orgánica mediante el método de pérdida por ignición. Se llevó la muestra al horno durante seis (6) horas a 45°Cy se entregaron datos así;

- a. Peso del crisol + suelo seco antes de ignición
- b. Peso del crisol + suelo después de la ignición
- c. Peso del crisol

Figura 3. Determinación de Materia Orgánica en la Ceniza.



3.1.4 Gravedad Específica del agregado fino. En este ensayo se analizó la unidad de masa con respecto al volumen que puede ocupar la arena o el agregado fino al momento de mezclar todas las materias primas que formaran la pasta además de observar la humedad natural que posee el agregado fino mediante un procedimiento que conlleva la captación de 1 kilogramo de árido que se introdujo en el horno en un molde a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, allí se espero a poder manipular el molde con el árido para después meterse en agua durante 24 horas. Luego de esto se decantó el exceso de agua evitando la pérdida de finos, allí se esparció la muestra sobre una superficie plana no absorbente donde las corrientes de aire tibio o el sol pudieron llevar al árido a una condición superficialmente seca. Esperando que la muestra haya alcanzado tal estado se procedió a utilizar un molde en forma de cono sobre una superficie lisa, allí se vertió el árido dentro del cono dándole así una serie de 25 golpes a la muestra, se removió la arena suelta de la base y se levantó el molde verticalmente. Si la humedad superficial está todavía presente, el agregado conservará la forma del molde. Cuando el agregado fino se sienta levemente, ello indica que ha alcanzado la condición superficialmente seca.

Se llenó el picnómetro parcialmente con agua. Inmediatamente se introdujeron dentro del picnómetro $500\text{ g} \pm 10\text{ g}$ de agregado saturado y superficialmente seco, y se llenó con agua adicional hasta aproximadamente el 90 % de la capacidad. Se giró, invirtió y agitó el picnómetro para eliminar todas las burbujas de aire. Se ajusta su temperatura hasta $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, si es necesario por inmersión en agua en circulación, y se llevó el nivel del agua en el picnómetro hasta su capacidad calibrada. Se determina la masa total del picnómetro, con la muestra y el agua.

3.1.5 Equivalente de Arena. Éste ensayo consistió en introducir la muestra de árido en una probeta llena de una solución floculante (compuesta por glicerina, formaldehído y cloruro cálcico anhidro). La probeta se sacudió vigorosamente de izquierda a derecha manteniéndola en posición horizontal, realizando 90 ciclos en unos 30 segundos, recorriendo unos 20 centímetros. Posteriormente se añadió agua y se dejó reposar durante 20 minutos. Tras ese tiempo el árido limpio se depositó en el fondo, mientras las partículas arcillosas, o no, contaminantes se situaron en suspensión en la parte intermedia, quedando en la parte superior el líquido relativamente limpio. Leyendo en la probeta las alturas del árido limpio (h_1)

y de las partículas contaminantes (h_2), se define el equivalente de arena como:
Ecuación 1

$$EA = \frac{h_1}{h_2} * 100$$

Figura 4. Equivalencia de arena.



3.1.6 Caracterización del Cemento. El proceso de caracterización del cemento se realizó mediante el análisis del peso específico el cual consiste en establecer la relación entre una masa de cemento (gr) y el volumen (ml) de líquido que ésta masa desplaza en el matraz de Le Chatelier.

El ensayo inició sumergiendo el frasco de Le Chatelier en un baño de agua a temperatura de calibración, ésta era de 20°C, dejándolo reposar allí durante un tiempo. Luego, se llenó el frasco con ACPM hasta un punto situado entre 0 y 1ml (). Seguido a esto, se secó el frasco por encima del nivel del líquido después de haberlo vertido y se tomó la primera lectura. Se agregó el cemento Boyacá, aproximadamente 64 g en pequeñas cantidades y cuidadosamente. Luego de agregar todo el cemento, se colocó el tapón y se giró en posición inclinada, con el fin de sacarle el aire atascado.

Una vez el frasco fue sumergido en el baño de agua, se hicieron lecturas cada 5 minutos hasta que se obtuvo un valor constante. La densidad del cemento fue calculada de acuerdo a la Ecuación 2, que se muestra a continuación:

$$Densidad = \frac{Masa\ del\ cemento\ (g)}{Volumen\ desplazado\ (cm^3)}$$

3.1.7 Caracterización Del Cemento-Ceniza. Teniendo en cuenta que los morteros se prepararon con porcentajes de ceniza que buscaban remplazar la cantidad original de cemento, se realizó el ensayo de peso específico para cada una de las adiciones realizadas (10%, 20%, 30%, 40% y 50% de ceniza como porcentaje en peso del cemento); mediante el análisis del peso específico el cual consiste en establecer, la relación entre una masa cemento-ceniza (gr) y el volumen (ml) de líquido que ésta masa desplaza en el matraz de Le Chaletier.

El ensayo inició sumergiendo el frasco de Le Chatelier en un baño de agua a temperatura de calibración, ésta era de 20°C, dejándolo reposar allí durante un tiempo. Luego, se lleno el frasco con ACPM hasta un punto situado entre 0 y 1ml (Figura 5). Seguido a esto, se secó el frasco por encima del nivel del líquido después de haberlo vertido y se tomó la primera lectura, Se agregó el cemento Boyacá junto con su respectivo porcentaje de ceniza, aproximadamente 50 g en pequeñas cantidades y cuidadosamente. Luego de agregar toda la mezcla cemento-ceniza, se colocó el tapón y se giró en posición inclinada, con el fin de sacarle el aire atascado.

Una vez el frasco fue sumergido en el baño de agua, se hicieron lecturas cada 5 minutos hasta que se obtuvo un valor constante. La densidad de la mezcla cemento-ceniza fue calculada de acuerdo a la Ecuación3, que se muestra a continuación:

$$Densidad = \frac{Masa\ del\ cemento\ +\ masa\ de\ la\ ceniza\ (g)}{Volumen\ desplazado\ (cm^3)}$$

Figura 5. Caracterización de Cemento-Ceniza



3.1.8 Tiempo de Fraguado. Se pesaron 500 gramos de cemento. Luego se añadió la cantidad de agua previamente determinada del laboratorio anterior de consistencia normal del cemento o dado el caso mediante experimentación de prueba y error. Después de haber logrado una consistencia óptima se procedió a introducir la pasta en el aparato de Vicat y posteriormente se trasladó la muestra a un área húmeda del laboratorio. Inmediatamente se procedió a dejar caer la aguja de 1 milímetro de diámetro durante 30 segundos sobre la muestra esperando así que esta atravesase la altura total de la formaleta del Vicat (Figura 6).

A partir de ese momento se hicieron lecturas de 60 minutos hasta encontrar el tiempo de fraguado inicial, el cual se alcanzó en la mayoría de ensayos al cabo de 90 minutos aproximadamente. Posteriormente, se realizaron lecturas de intervalos de 15 minutos hasta encontrar el tiempo de fraguado final o que la aguja no penetrara más de 1 milímetro la capa ya al parecer endurecida de la muestra. Se recomendó que la aguja se fuese cambiando de posición en la muestra para que esta no cayera en el mismo sitio. Al cabo de tener todos los valores admisibles para cada uno de los porcentajes de cemento-ceniza se procedió a colocar estos valores en una gráfica y se determinó el tiempo de fraguado interpolando de la misma para una penetración de 25 milímetros.

Figura 6. Tiempo de Fraguado



3.1.8 Ensayo de Fluidez de Morteros en la Mesa de Flujo. Se siguió la norma NTC 111. Luego se llenó el molde, se limpió y se secó respectivamente la plataforma de la mesa de flujo, teniendo cuidado de secar el agua que está alrededor de la base del molde. Después de un (1) minuto de haber terminado la

operación de mezclado, se retiró el molde, levantándolo e inmediatamente se deja caer la mesa de flujo desde una altura de 12.7 milímetros ($\frac{1}{2}$ ") 25 veces en 15 segundos. Luego se mide el diámetro de la base de la muestra, por lo menos en cuatro puntos equidistantes y se calcula el diámetro promedio.(Figura 7)

Figura 7. Prueba de fluidez



Los resultados de fluidez se interpretaron considerando que la fluidez es el aumento del diámetro de la muestra, expresado como un porcentaje del diámetro de la base mayor del molde (Tabla 6 Información para interpretación de ensayo de mesa de flujo), según la ecuación 4:

$$\% \text{ Fluidez} = \frac{\text{Diámetro promedio} - 101.6 \text{ mm}}{101.6 \text{ mm}} * 100$$

Tabla 6 Información para interpretación de ensayo de mesa de flujo

FLUIDEZ %	CONSISTENCIA	CONDICIÓN DE COLOCACIÓN	EJEMPLO DE TIPOS DE ESTRUCTURA	EJEMPLO DE SISTEMA DE COLOCACIÓN	DE DE
80 – 100	Dura (seca)	Secciones sujetas a vibración	Reparaciones, recubrimiento de túneles, galerías, pantallas de cimentación, pisos	Proyección neumática, vibradores de formaleta	con de
100 – 120	Media (plástica)	Sin vibración	Pega de mampostería, baldosines, pañetes y revestimientos	Manual con palas y palustres	
120 – 150	Fluida (húmeda)	Sin vibración	Pañetes, rellenos de mampostería estructural, morteros autonivelantes para pisos	Manual, bombeo, inyección	

Fuente: Rivera López, Gerardo Antonio. Concreto Simple. (Ajustada), año

El ensayo de fluidez se realizó para la pasta sin adición de ceniza y posteriormente, para la pasta con adición de ceniza, cuidando que la fluidez de la pasta no estuviese muy hidratada puesto que al incluir este residuo las propiedades físicas de la pasta se ven afectadas haciendo que su manejabilidad parezca casi imposible al momento de su uso.

3.1.10 Preparación de los Especímenes de Mortero. Se determina el volumen de mortero requerido para preparar los especímenes de cada grupo de experimentos. Se debe tener en cuenta el porcentaje de desperdicio.

Con el volumen conocido, y teniendo en cuenta la Tabla 2, se optó por utilizar la dosificación de un mortero rico, el cual requiere 800 kg por m³ de mortero. De esta manera, se determina la cantidad de cemento requerida para preparar el total de especímenes.

Posteriormente, se toma el peso obtenido y teniendo en cuenta el peso específico del cemento, se procede a determinar el volumen de cemento. Con este valor y considerando que la dosificación recomendada es 1:1, se requeriría el mismo volumen de cemento que de arena. Con el volumen de arena y la densidad aparente de la arena se halla el peso de arena requerido para preparar las muestras. Se mezclan los materiales y se procede a la elaboración de los especímenes de mortero.

Sobre un platón para amasado, se esparció una muestra de arena. Posteriormente, se hizo un hueco en el centro del montón y se vertió el cemento con la adición de ceniza que se trabajó. Nuevamente, se hizo un hueco para derramar el agua. La mezcla se fue amasando y una vez homogénea, se introdujo en los moldes previamente engrasados. (Figura 8)

Figura 8. Elaboración de especímenes



La matriz experimental seguida en el estudio fue la indicada en la Tabla 7 y Tabla 8. La notación A/C_i representa la relación agua cemento para la muestra i , habiéndose realizado especímenes con dos tipos de relación agua cemento. Así mismo, las granulometrías han sido identificadas como MFi , entendiéndose que i corresponde a las muestras 1 y 2 de arena, las cuales tuvieron módulos de finura diferentes.

Tabla 7. Matriz experimental

Módulo de Finura 1

No. Especímenes	Relación A/C y MF	Proporciones ceniza vs cemento
6	A/C1, MF1	10%Ceniza+90%Cemento
6	A/C1, MF1	20%ceniza+80%cemento
6	A/C1, MF1	30%ceniza+70%cemento
6	A/C1, MF1	40%ceniza+60%cemento
6	A/C1, MF1	50%ceniza+50%cemento
6	A/C1, MF1	Cemento
6	A/C2, MF1	10%Ceniza+90%Cemento
6	A/C2, MF1	20%ceniza+80%cemento
6	A/C2, MF1	30%ceniza+70%cemento
6	A/C2, MF1	40%ceniza+60%cemento
6	A/C2, MF1	50%ceniza+50%cemento
6	A/C2, MF1	Cemento

Tabla 8. Matriz Experimental

Módulo de Finura 2

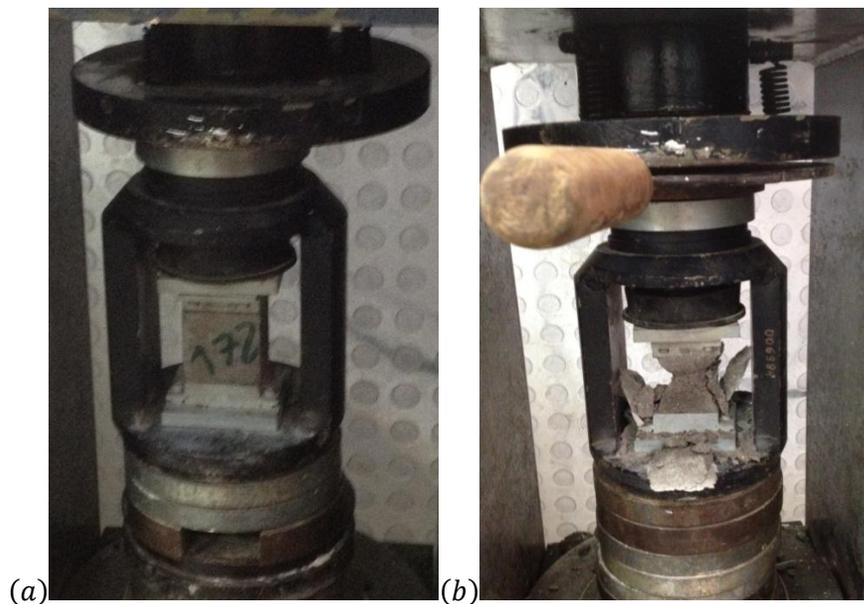
No. Especímenes	Relación A/C y MF	Proporciones ceniza vs cemento
6	A/C ₁ , MF ₂	10%Ceniza+90%Cemento
6	A/C ₁ MF ₂	20%ceniza+80%cemento
6	A/C1, MF ₂	30%ceniza+70%cemento
6	A/C1, MF ₂	40%ceniza+60%cemento
6	A/C1, MF ₂	50%ceniza+50%cemento
6	A/C ₁ , MF ₂	Cemento
6	A/C2, MF2	10%Ceniza+90%Cemento
6	A/C2 MF2	20%ceniza+80%cemento
6	A/C2, MF2	30%ceniza+70%cemento
6	A/C2, MF2	40%ceniza+60%cemento
6	A/C2, MF2	50%ceniza+50%cemento
6	A/C2, MF2	Cemento

Para garantizar que los morteros se prepararían con dos módulos de finura diferentes se ajustó el material granular (clasificado como arena), mediante una separación manual considerando:

- Material pasa tamiz No. 3/8 hasta pasa No. 200, corresponde a la arena con Módulo de Finura MF_1 .
- Material pasa tamiz No. 8 hasta pasa No. 200, corresponde a la arena con Módulo de Finura MF_2 .

3.1.11 Análisis Mecánico. Los especímenes se ensayaron con la Norma NTC 220. Las muestras fueron sobre puestas en una máquina la cual arroja la capacidad en kilogramos que resiste cada espécimen, los cuales se prepararon en moldes de dimensiones de 50 mm x 50 mm x50 mm. Según el tiempo de muestreo recomendado, se ensayaron a las 24 horas, 3 días, 7 días y 28 días de cada porcentaje los cuales van desde el 100% cemento hasta 50% cemento y 50% ceniza. Se prepararon tres especímenes, una selección de muestra por conveniencia, considerando la disponibilidad de formaleta al interior del laboratorio. (Figura 9; a y b)

Figura9. Prueba a Compresión de cubos de mortero (cemento y cemento-ceniza)



4. RESULTADOS

4.1 CARACTERIZACION DEL AGREGADO NATURAL

Una vez lavado y secado el material se procedió al tamizado utilizando la serie de tamices indicada en la norma correspondiente. Los tamices para la muestra de arena 1 fueron 38",No. 4,No. 8,No. 16,No. 30,No. 50,No. 100,No 200,Fondo.Para la muestra 2 fueron No. 8,No. 16,No. 30,No. 50,No. 100,No. 200,Fondo. La Figura 10 y Figura 11 representan las curvas granulométrías de las muestras preparadas con la serie granulométrica anteriormente descrita.

Figura 10 Granulometría correspondiente a la muestra de $MF_1= 2,65$ Curva granulométrica

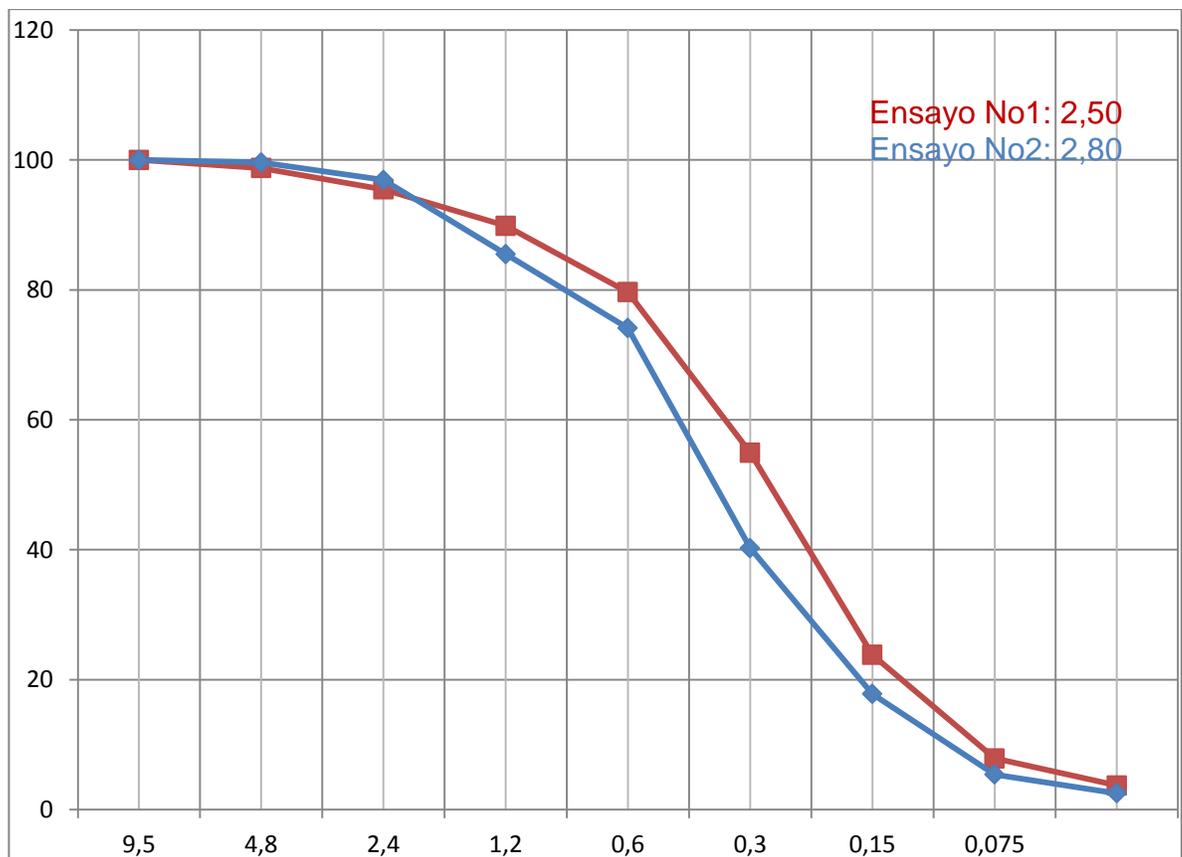
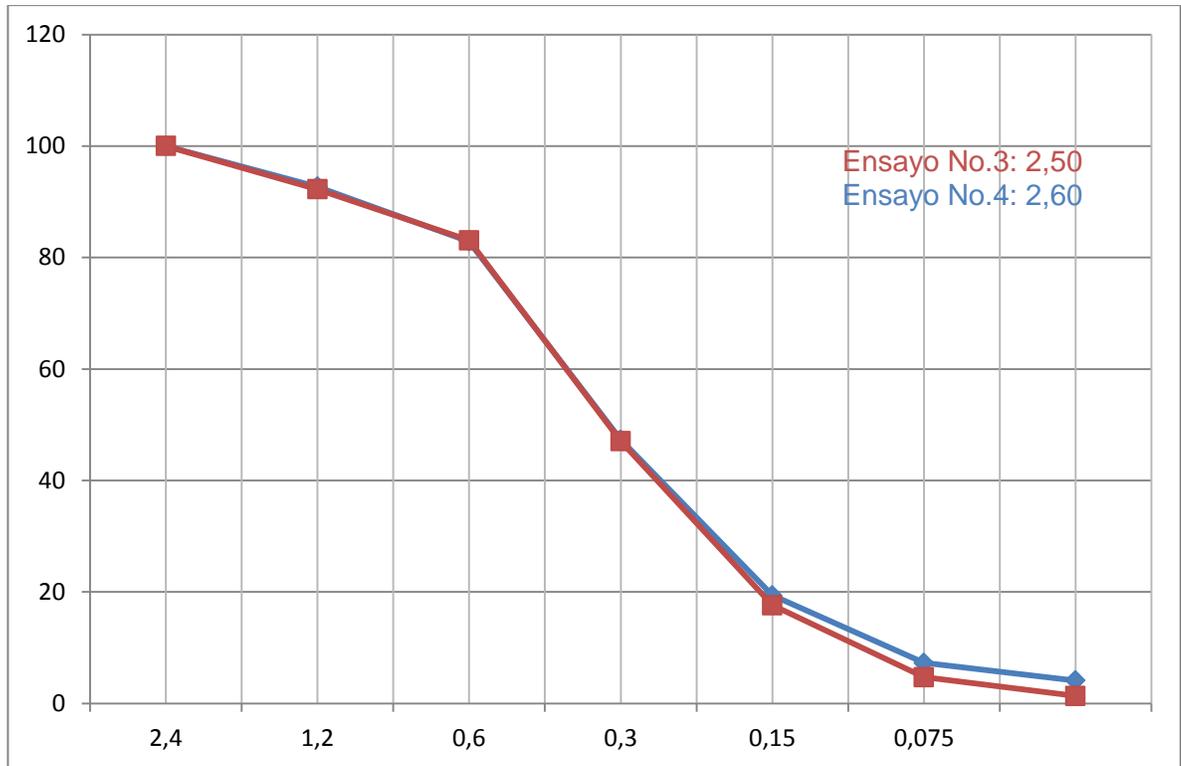


Figura 11 Granulometría correspondiente a la muestra de MF₂= 2,55 Curva granulométrica

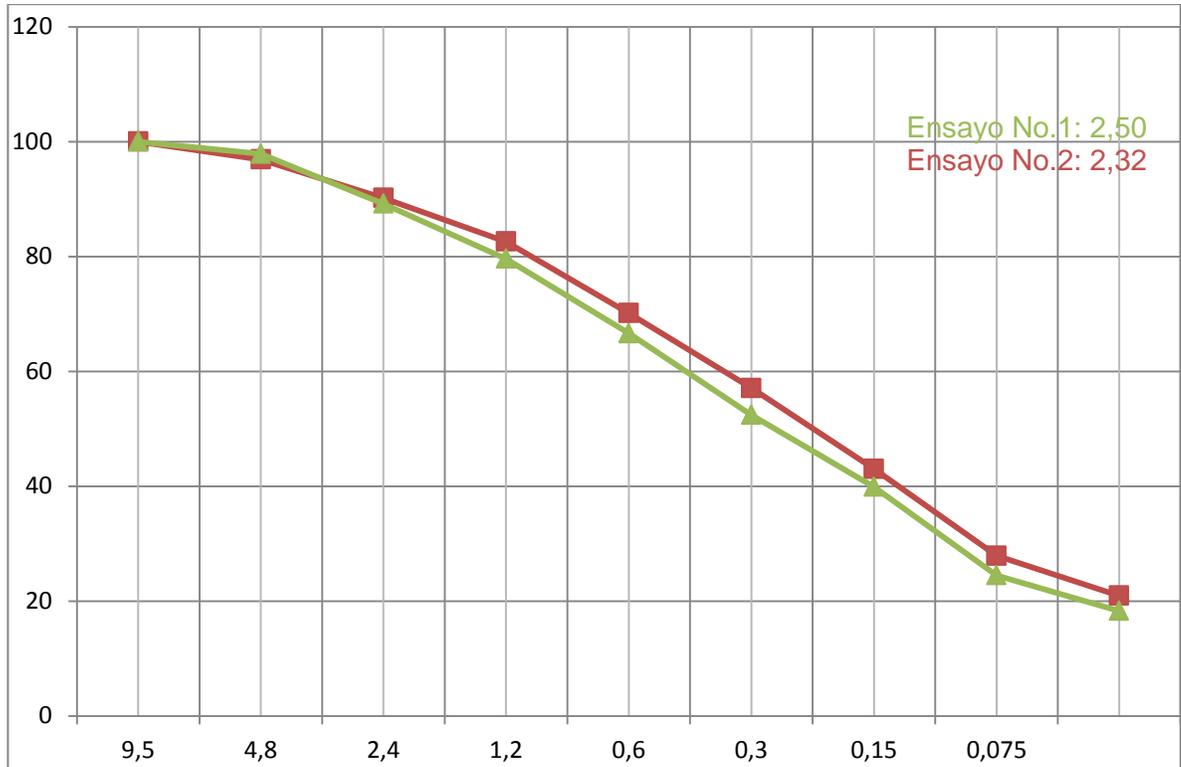


Según la tabla de clasificación de suelos AASTHO (Anexo 1) el material se define como una arena y está clasificada como A-3, arena fina no plástica. Los módulos de finura de las arenas utilizadas correspondieron a 2.65 y de 2.55, lo cual permite clasificar las arenas como finas. Los resultados parciales de este ensayo se encuentran en el Anexo 2.

4.2 CARACTERIZACION DE LA CENIZA

Por otra parte el proceso de tamizado de la ceniza la cual se extrajo de unos bultos que estaban a disposición para ser ensayados, se introdujo en un molde en el horno por 24 horas y al día siguiente se hizo su respectivo tamizado utilizando la serie de tamices No. 3/8", No. 4, No. 8, No. 16, No. 30, No. 50, No. 100, No. 200, Fondo. El resultado del módulo de finura coincidió de manera natural con los agregados finos por una pequeña variación, para el caso de la ceniza fue de 2.5 y 2,32; ambos datos se promediaron dejándose un Módulo de Finura para la ceniza de 2,41. La figura 12 muestra el comportamiento de la curva granulométrica de la ceniza. El Anexo 3 incluye los datos de laboratorio correspondientes a este ensayo.

Figura 12. Granulometría correspondiente a la muestra de ceniza con un valor promedio de Módulo de Finura de 2,41.



4.3 GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL AGREGADO FINO Y LA CENIZA

La gravedad específica de la arena se determinó siguiendo el procedimiento del picnómetro (NTC 237). Los valores de gravedad específica obtenidos corresponden a valores convencionales de arenas utilizadas para preparación de concretos en el medio. Resultando así en $2,51 \text{ g/cm}^3$ (Ver Anexo 4). Así mismo, los valores de gravedad específica de la ceniza fue de $2,38 \text{ g/cm}^3$, al respecto el valor fue el esperado ya que osciló entre los $2,0$ y $2,9 \text{ g/cm}^3$. (Ver anexo 5).

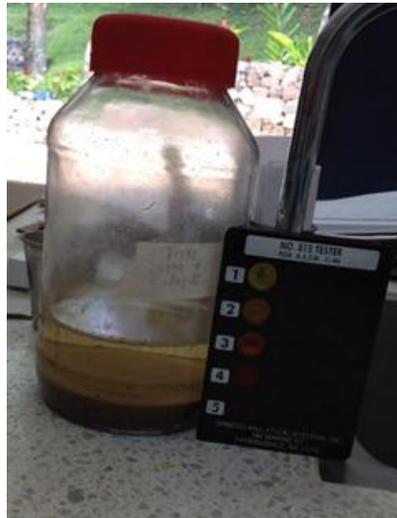
4.4 EQUIVALENTE DE ARENA

El peso equivalente de la arena se determinó siguiendo el procedimiento descrito en la Norma I.N.V. E-133 (Ver Anexo 6, Ensayo de Peso equivalente). Los resultados muestran que su porcentaje está por encima del 50 % demostrando de esta manera que es una arena muy pura.

4.5 CONTENIDO MATERIA ORGÁNICA EN AGREGADO FINO

La determinación del contenido de materia orgánica se hizo por el método de la tabla de vidrio de color estándar donde se encuentran cinco tonalidades las cuales indican la contaminación del agregado fino. Se observa que la arena es una arena limpia según la carta de coloración que dio amarillo o la Numero 1. (Figura 13)

Figura 13. Ensayo de contenido de materia orgánica en arena



4.6 CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA EN LA CENIZA

Se realizó el método tomando una muestra de ceniza ya secado, siendo el objetivo determinar el porcentaje o contenido de materia orgánica mediante el método de pérdida por ignición. Se entiende en la ceniza que aquello que fue evaporado por el proceso de ignición era el material orgánico disponible. El resultado fue de 4.8 % de materia orgánica. (Ver Anexo 7).

4.7 PESO ESPECÍFICO PARA LAS DIFERENTES MEZCLAS DE CENIZA CEMENTO

Teniendo en cuenta que la ceniza se añadió al cemento, se realizaron ensayos de peso específico del compuesto ceniza-cemento, en los diferentes porcentajes de ceniza añadido (Tabla 9).

Tabla 9. Peso específico de las diferentes muestras

100%cemento	2.75	gr/cm ³
50% ceniza-50%cemento	2.59	gr/cm ³
60% ceniza-40%cemento	2.56	gr/cm ³
70%cemento-30%ceniza	2.62	gr/cm ³
80%cemento-20%ceniza	2.69	gr/cm ³
90%cemento-100%ceniza	2.67	gr/cm ³

4.8 CONSISTENCIA NORMAL Y TIEMPO DE FRAGUADO

El ensayo de consistencia normal permite determinar la cantidad de agua necesaria para realizar la prueba de tiempo de fraguado de la pasta. Un total de seis ensayos de tiempo de fraguado fueron realizados con el fin de verificar el efecto de la ceniza en el fraguado de un mortero modificado con este material. La Tabla 10 permite indicar la variación del contenido de agua en cada adición de ceniza.

Tabla 10. Ensayo de Consistencia Normal

100%cemento	180 ml
50% ceniza-50%cemento	130 ml
60% ceniza-40%cemento	140 ml
70%cemento-30%ceniza	150 ml
80%cemento-20%ceniza	155 ml
90%cemento-10%ceniza	170 ml

El tiempo de fraguado para la arena; se encuentran registradas en la Figura 14 a la Figura 19, por medio de grafica de Penetración versus Tiempo. En los anexos 8, 9, 10, 11, 12 y 13 se encuentra el detalle de los datos de laboratorio tomados en cada ensayo.

Figura14. Tiempo de fraguado para morteros preparados para 100 % de cemento

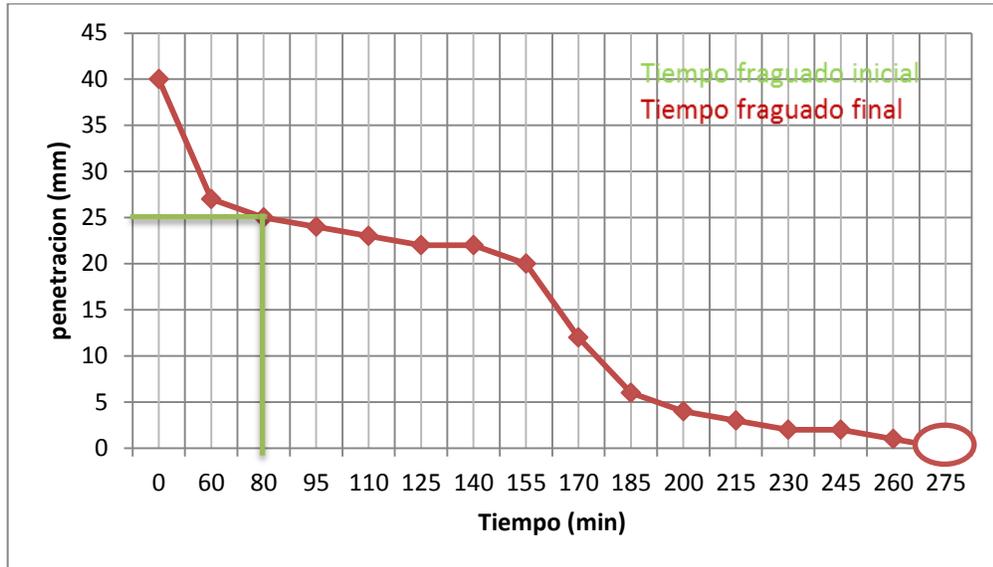


Figura 15. Tiempo de fraguado para morteros preparados para 50 % de cemento-50% de ceniza

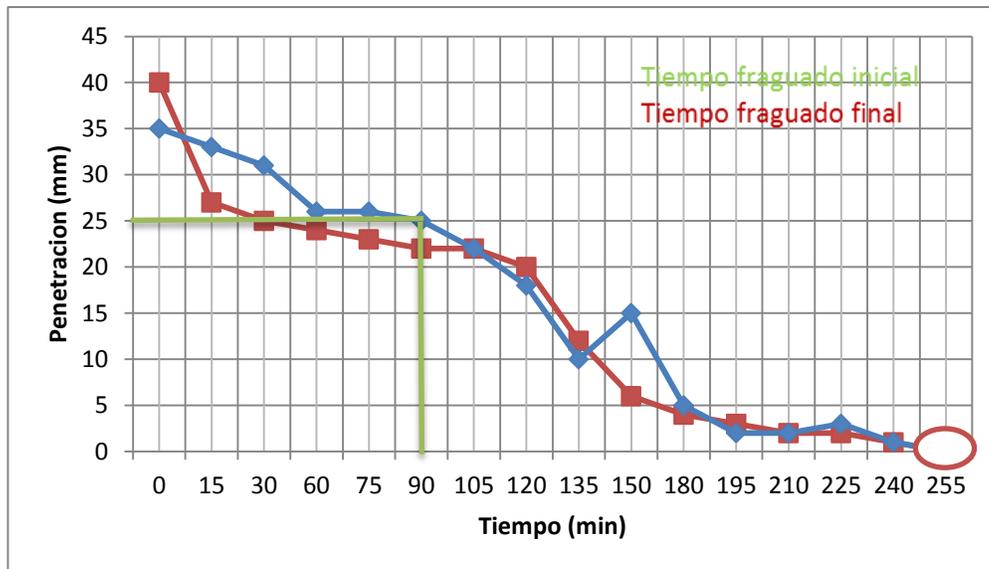


Figura16. Tiempo de fraguado para morteros preparados para 60 % de cemento-40% de ceniza

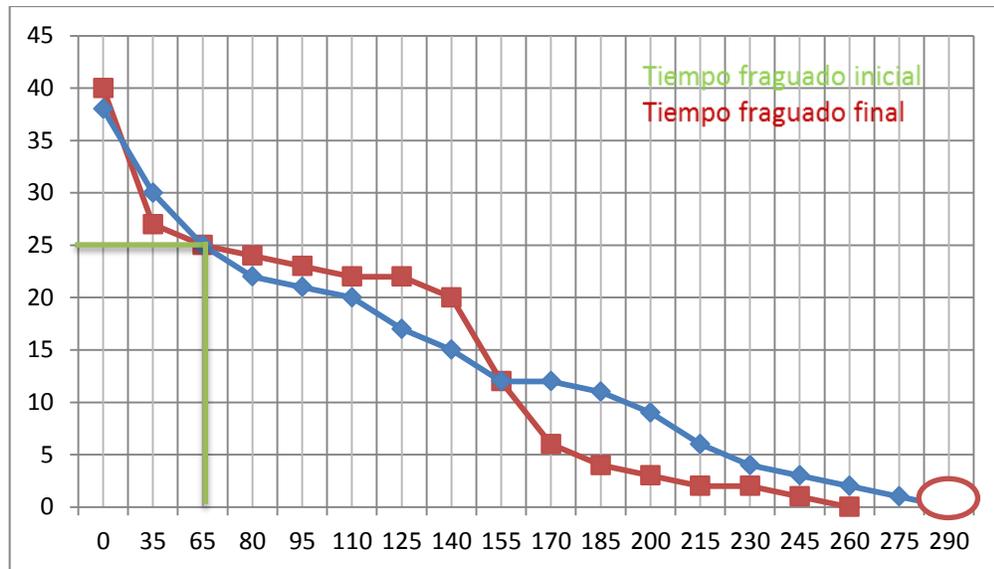


Figura 17. Tiempo de fraguado para morteros preparados para 70 % de cemento-30% de ceniza

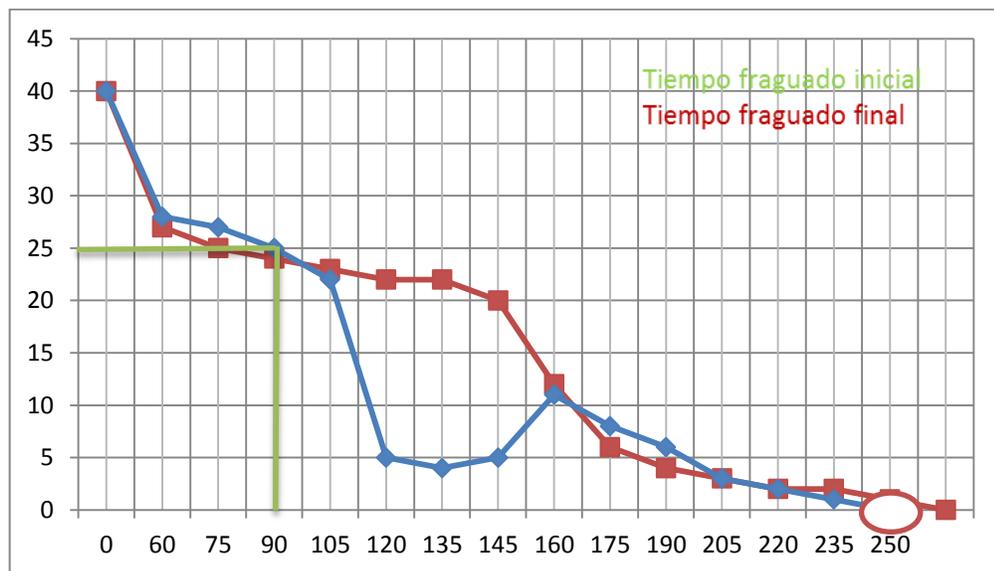


Figura 18. Tiempo de fraguado para morteros preparados para 80 % de cemento-20% de ceniza

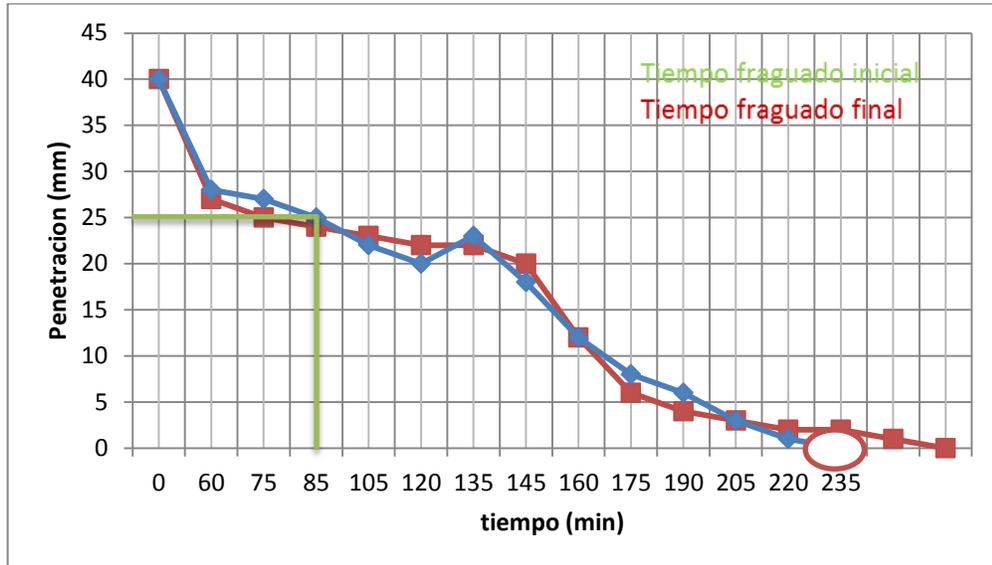
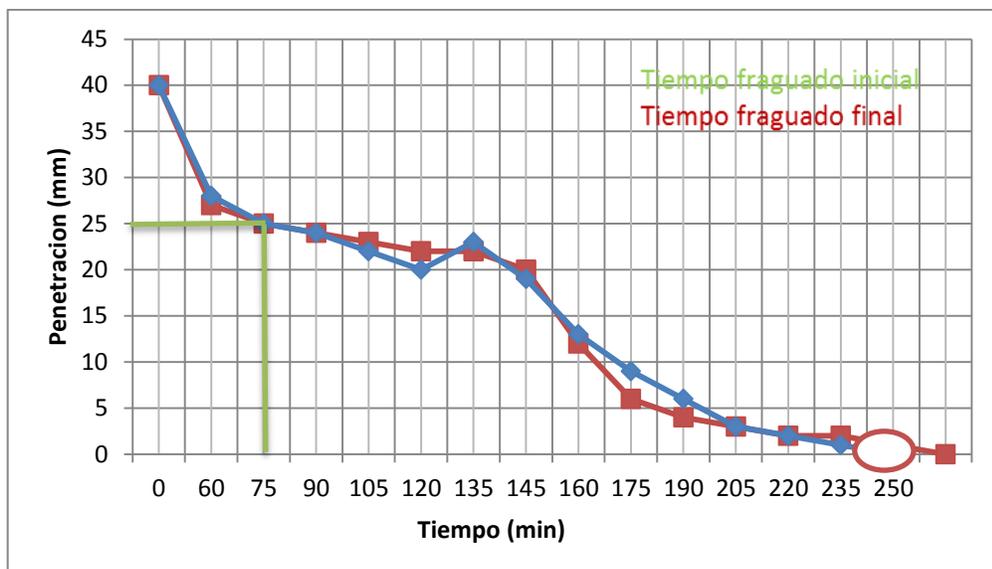


Figura 19. Tiempo de fraguado para morteros preparados para 90 % de cemento-10% de ceniza



4.9 ENSAYO DE FLUIDEZ.

Teniendo en cuenta que para los experimentos se utilizaron dos módulos de finura, se presentan los resultados de fluidez obtenidos con las distintas dosificaciones. La Tabla 11 resume la fluidez en las distintas dosificaciones cuando el agregado utilizado tenía un Módulo de Finura de 2,65. Entre tanto, la Tabla 12 resume la fluidez para él, Módulo de Finura de 2,55.

Tabla 11. Fluidez mdf1=2.65

MUESTRA	AGUA AÑADIDA (ml)	% FLUIDEZ
100 % CEMENTO	115	74.70
50% CEMENTO	100	56.70
50% CENIZA		
60% CEMENTO	102	87.00
40% CENIZA		
70% CEMENTO	103	73.70
30% CENIZA		
80% CEMENTO	105	70.80
20% CENIZA		
90% CEMENTO	107	68.10
10% CENIZA		

Tabla 12. Fluidez mdf2=2.55

MUESTRA	AGUA AÑADIDA (ml)	% FLUIDEZ
100 % CEMENTO	112	75.69
50% CEMENTO	97	65.60
50% CENIZA		
60% CEMENTO	100	64.86
40% CENIZA		
70% CEMENTO	102	57.73
30% CENIZA		
80% CEMENTO	104	64.62
20% CENIZA		
90% CEMENTO	106	74.70

4.10 ENSAYO DE COMPRESION

Los especímenes de mortero fabricados fueron ensayados según la norma NTC 220. Los resultados del ensayo a compresión se presentan en la Tabla 13 a la Tabla 17.

Tabla 13. Resultados de resistencia a la compresión con morteros preparados con MF1 y MF2 100% cemento

Tiempo del ensayo	Resultados a compresión (KN)	Promedio Resistencia(Mpa)	Desviación Estándar	Módulo Finura
24 horas	10,7	4,492	0,473	2,65
	11,4			
	11,6			
3 días	16,5	5,88	1,670	
	13,2			
	14,4			
7 días	65,8	22,252	9,650	
	46,6			
	54,5			
28 días	73,4	29,12	6,521	
	66			
	79			
24 horas	9,2	3,57	0,462	2,55
	8,4			
	9,2			
3 días	12,9	5,15	0,252	
	12,6			
	13,1			
7 días	59,3	20,72	8,227	
	53,1			
	43			
28 días	81	33,99	3,691	
	85,6			
	88,3			

Tabla 14. Resultados de resistencia a compresión en diferentes periodos de Tiempo para morteros con proporción 50% cemento y 50% ceniza

Tiempo del ensayo	Resultados a compresión	Promedio Resistencia (Mpa)	Desviación Estándar	Módulo Finura
24 horas	4,5	1,71	0,208	2,65
	4,2			
	4,1			
3 días	1,7	1,21	1,301	
	3,1			
	4,3			
7 días	20,5	7,25	2,098	
	16,5			
	17,4			
28 días	19	7,71	1,222	
	20,6			
	18,2			
24 horas	2,4	1,32	0,794	2,55
	3,9			
	3,6			
3 días	4,4	1,76	0,100	
	4,5			
	4,3			
7 días	15,7	6,24	0,656	
	16,2			
	14,9			
28 días	17,8	7,39	0,702	
	18,4			
	19,2			

Tabla 15. Resultados de compresión de especímenes de mortero con MF1 y MF2 preparados con 60% de cemento y 40% de ceniza

Tiempo del ensayo	Resultados a compresión	Promedio Resistencia (mpa)	Desviación Estándar	Módulo Finura
24 horas	6,1	2,28	0,529	2,65
	5,9			
	5,1			
3 días	6,1	2,388	0,231	
	5,7			
	6,1			
7 días	41,8	16,548	0,751	
	40,5			
	41,8			
28 días	36,7	15,96	5,717	
	36,5			
	46,5			
24 horas	4,4	1,772	0,451	2,55
	4,9			
	4			
3 días	6	2,52	0,265	
	6,4			
	6,5			
7 días	19,3	8,052	1,443	
	21,8			
	19,3			
28 días	25,3	14,32	9,179	
	42,3			
	39,8			

Tabla 16. Resultados de compresión de especímenes de mortero con MF1 y MF2 preparados con 70% de cemento y 30% de ceniza

Tiempo del ensayo	Resultados a compresión	Promedio Resistencia (Mpa)	Desviación Estándar	Módulo Finura
24 horas	8,5	3,188	0,611	2,65
	7,3			
	8,1			
3 días	8,6	3,612	0,379	
	9,3			
	9,2			
7 días	18,6	7,252	0,569	
	18,3			
	17,5			
28 días	54	20,48	3,483	
	52,3			
	47,3			
24 horas	11	3,92	1,039	2,55
	9,2			
	9,2			
3 días	14,3	6,092	0,950	
	15,2			
	16,2			
7 días	40,1	15,08	2,081	
	36,4			
	36,6			
28 días	34,4	16,692	8,021	
	40,5			
	50,3			

Tabla 17. Resultados de compresión de especímenes de mortero con MF1 y MF2 preparados con 80% de cemento y 20% de ceniza

Tiempo del ensayo	Resultados a compresión	Promedio Resistencia (Mpa)	Desviación Estándar	Módulo Finura
24 horas	8,6	3,412	0,115	2,65
	8,6			
	8,4			
3 días	11,9	4,532	0,666	
	11,5			
	10,6			
7 días	17,6	6,8	0,721	
	17,2			
	16,2			
28 días	59,1	22,4	4,694	
	58,3			
	50,6			
24 horas	11,2	4,56	0,346	2,55
	11,8			
	11,2			
3 días	17,6	7,32	0,755	
	18,2			
	19,1			
7 días	42,7	16,732	0,751	
	41,4			
	41,4			
28 días	64,1	21,892	8,320	
	48,2			
	51,9			

Tabla 18. Resultados de compresión de especímenes de mortero con MF1 y MF2 preparados con 90% de cemento y 10% de ceniza

Tiempo del ensayo	Resultados a compresión	Promedio Resistencia (Mpa)	Desviación Estándar	Módulo Finura
24 horas	11,3	4,332	0,503	2,65
	10,9			
	10,3			
3 días	12,6	5,308	0,586	
	13,7			
	13,5			
7 días	32,6	16,148	6,768	
	43,5			
	45			
28 días	67	25,508	5,090	
	66,4			
	57,9			
24 horas	13,4	5,332	0,115	2,55
	13,2			
	13,4			
3 días	21,4	9,052	1,801	
	24,7			
	21,8			
7 días	47,6	18,64	1,908	
	44,4			
	47,8			
28 días	65	24,08	4,187	
	57,3			
	58,3			

5. ANALISIS DE RESULTADOS

Con relación a la caracterización de los agregados y la ceniza.

La arena fue clasificada como una arena tipo A3 de acuerdo a la carta de la AASHTO. La ceniza, por su composición granulométrica, también se clasificó como material fino. En cuanto al contenido de materia orgánica, la arena no presentaba contenido que pudiera generar conflicto en la preparación del mortero, aspecto que fue verificado según el criterio de colorimetría; la ceniza presentó un 4.8% de materia orgánica lo cual es consecuente con los valores esperados para este material. Se infiere, que este porcentaje de materia orgánica no afecta la calidad del mortero, aunque es necesario hacer pruebas confirmativas para verificar este hecho, las cuales harán parte de estudios posteriores.

En cuanto a la gravedad específica, la arena arrojó un valor de $2,51 \text{ g/cm}^3$, catalogándola así como agregado fino. Mientras que la ceniza arrojó un valor de gravedad específica de $2,36 \text{ g/cm}^3$; resultado que coincide con el valor ya averiguado en estudios previo que puede oscilar entre $2,1$ y $2,9 \text{ g/cm}^3$.

Con relación a la consistencia normal.

La preparación de las muestras para el ensayo de tiempo de fraguado, requerían verificar la consistencia normal para adición de diferentes porcentajes de ceniza. Se observa, en los resultados de la Tabla 10 que para obtener la consistencia normal en la pasta, a medida que se aumenta contenido de ceniza, se disminuye el contenido de agua. Pudiera ser esto, entonces, un indicador que cementos con adiciones de ceniza podrían ser utilizados en zonas en donde halla escasez de agua.

Con relación al tiempo de fraguado

Los resultados se resumen en la Tabla 18 se resumen los datos de tiempo de fraguado. La determinación de las consistencias permitió el inicio de los tiempos de fraguado. Los resultados muestran para el módulo de finura 1, la mezcla de cemento-ceniza que tardó menos tiempo (**60 min**) en llegar al fraguado inicial fue la de 60% Cemento -40% Ceniza; pero a su vez fue la que tardó más en alcanzar el tiempo de fraguado final (**285 min**). Y aquella mezcla que se tardó menos

tiempo para llegar al tiempo final de fraguado fue la de 70% Cemento – 30% Ceniza.

Tabla 19 Tiempos de fraguado

Porcentajes	Fraguado Inicial (min)	Fraguado Final (min)
100% cemento	75	270
50% Cemento -50% ceniza	85	235
60% Cemento -40% ceniza	60	285
70% Cemento -30% ceniza	90	225
80% Cemento -20% ceniza	105	240
90% Cemento -10% ceniza	90	255

Con relación a la fluidez

Se observa que las mezclas preparadas con 100 % de cemento presentaron valores de fluidez muy similares para ambos módulos de finura. Así mismo, se ratifica que la adición de ceniza disminuye el requerimiento de agua. La mezclas para ambos módulos de finura con ceniza muestra según la Tabla 1 que su consistencia se cataloga en Dura (seca) ya que el porcentaje de fluidez varía entre un 55% y 87%.

Con relación a la resistencia a compresión

Para 24 horas, 3 días, 7 días y 28 días se observa que la proporción de 90% de cemento y 10% de ceniza arrojaron valores de resistencia similares a los testigos (sin ceniza), aunque la fluidez fue menor (Tabla 19 a Tabla 22). Se destaca que la resistencia a las 24 horas y 3 días en los morteros preparados con Módulo de finura 2, reportó un incremento frente a la resistencia de la testigo (Tabla 23 y Tabla 24). Sin embargo, en las resistencias a los 7 días y a los 28 días, en estas mismas muestras, se evidencia que solamente en las dosificaciones de 90% cemento y 10% de ceniza se obtuvieron valores cercanos al testigo.

Tabla 20. Resistencia a compresión a las 24 horas de fundido el mortero MF1

Proporciones	Resistencia promedio (MPa)	% Fluidez	MF
100% Cemento	4,49	74,70	2,65
50% Cem - 50% Cen	1,71	56,70	
60% Cem - 40% Cen	2,28	87,00	
70% Cem - 30% Cen	3,19	73,70	
80% Cem - 20% Cen	3,41	70,80	
90% Cem - 10% Cen	4,33	68,10	

Tabla 21. Resistencia a compresión a los 3 días de fundido el mortero MF1

Proporciones	Resistencia promedio (MPa)	% Fluidez	MF
100% Cemento	5,88	74,70	2,65
50% Cem - 50% Cen	1,21	56,70	
60% Cem - 40% Cen	2,39	87,00	
70% Cem - 30% Cen	3,61	73,70	
80% Cem - 20% Cen	4,53	70,80	
90% Cem - 10% Cen	5,31	68,10	

Tabla 22. Resistencia a compresión a los 7 días de fundido el mortero MF1

Proporciones	Resistencia promedio (MPa)	% Fluidez	MF
100% Cemento	22,25	74,70	2,65
50% Cem - 50% Cen	7,25	56,70	
60% Cem - 40% Cen	16,55	87,00	
70% Cem - 30% Cen	7,25	73,70	
80% Cem - 20% Cen	6,8	70,80	
90% Cem - 10% Cen	16,15	68,10	

Tabla 23. Resistencia a compresión a los 28 días de fundido el mortero MF1

Proporciones	Resistencia promedio (MPa)	% Fluidez	MF
100% Cemento	29,12	74,70	2,65
50% Cem - 50% Cen	7,71	56,70	
60% Cem - 40% Cen	15,96	87,00	
70% Cem - 30% Cen	20,48	73,70	
80% Cem - 20% Cen	22,40	70,80	
90% Cem - 10% Cen	25,51	68,10	

Tabla 24. Resistencia a compresión a las 24 horas de fundido el mortero MF2

Proporciones	Resistencia promedio (MPa)	% Fluidez	MF
100% Cemento	3,57	75,69	2,55
50% Cem - 50% Cen	1,32	65,60	
60% Cem - 40% Cen	1,77	64,86	
70% Cem - 30% Cen	3,92	57,73	
80% Cem - 20% Cen	4,56	64,62	
90% Cem - 10% Cen	5,33	74,70	

Tabla 25. Resistencia a compresión a los 3 días de fundido el mortero MF2

Proporciones	Resistencia promedio	% Fluidez	MF
100% Cemento	5,15	75,69	2,55
50% Cem - 50% Cen	1,76	65,60	
60% Cem - 40% Cen	2,52	64,86	
70% Cem - 30% Cen	6,10	57,73	
80% Cem - 20% Cen	7,32	64,62	
90% Cem - 10% Cen	9,05	74,70	

Tabla 26. Resistencia a compresión a los 7 días de fundido el mortero MF2

Proporciones	Resistencia promedio	% Fluidez	MF
100% Cemento	20,72	75,69	2,55
50% Cem - 50% Cen	6,24	65,60	
60% Cem - 40% Cen	8,05	64,86	
70% Cem - 30% Cen	1,48	57,73	
80% Cem - 20% Cen	16,73	64,62	
90% Cem - 10% Cen	18,64	74,70	

Tabla 27. Resistencia a compresión a los 28 días de fundido el mortero MF2

Proporciones	Resistencia promedio	% Fluidez	MF
100% Cemento	33,99	75,69	2,55
50% Cem - 50% Cen	7,39	65,60	
60% Cem - 40% Cen	14,32	64,86	
70% Cem - 30% Cen	16,69	57,73	
80% Cem - 20% Cen	21,89	64,62	
90% Cem - 10% Cen	24,08	74,70	

CONCLUSIONES

Con relación a la caracterización de los agregados y la ceniza

La arena y la ceniza fueron clasificadas como material fino. Se encontró que la arena no presentó un contenido de materia orgánica mayor al 5%. Igual, ocurrió con la ceniza. Sin embargo, se recomienda en estudios posteriores que se realicen pruebas confirmativas para verificar este hecho. Así mismo, los valores de gravedad específica para ambos materiales correspondieron a valores en el rango de material fino.

Con relación a la consistencia normal

Las distintas mezclas de mortero preparadas con los porcentajes de ceniza permiten concluir que se requiere menor cantidad de agua para lograr este estado. Lo anterior, permite predecir que mezclas de mortero preparadas con ceniza representan un beneficio para el ambiente, por menor consumo de agua, siendo útiles entonces en zonas donde halla escasez de agua.

Con relación al tiempo de fraguado

Las mezclas de mortero que presentaron menor tiempo de fraguado inicial fueron las que presentaron mayor tiempo de fraguado final. Esto se logró en las dosificaciones de 60% de cemento y 40% de ceniza. Se deduce que este tipo de morteros son viables en obras que requieran acabados especiales en la superficie, ya que tendría más tiempo para lograr dicho acabado. Sin embargo, la resistencia mecánica de estas mezclas no fue la esperada. Se evidenció también que las mezclas con mayor contenido de cemento y porcentaje reducido de ceniza (10% o 20%) presentaron menores tiempos de fraguado final y resistencias cercanas a la testigo. Lo cual permite inferir que una menor proporción de ceniza sería recomendable.

Con relación a la fluidez

Las mezclas preparadas con 100 % de cemento presentaron valores de fluidez muy similares para ambos módulos de finura. Así mismo, se ratifica que la adición de ceniza disminuye el requerimiento de agua. La mezclas para ambos módulos

de finura con ceniza permitieron su clasificación como dura (seca) con un porcentaje de fluidez varía entre un 55% y 87%.

Con relación a la resistencia a compresión

Se ratifica que la proporción de 90% de cemento y 10% de ceniza resulta la más recomendada para morteros. Se hace necesaria la continuación del estudio hacia pruebas de durabilidad.

Los resultados presentados permiten correlacionar que el módulo de finura menor está incidiendo favorablemente en resultados mayores de compresión de morteros preparados con los diferentes porcentajes de ceniza, llegando a superar el testigo, a las 24 horas y 3 días. Sin embargo, a los 7 y a los 28 días no alcanzan al testigo.

En resumen:

Las cenizas son residuos que resultan viables para su aplicación en morteros. Sin embargo, se deben continuar los estudios por ejemplo utilizando aditivos que mejoren las resistencias y aumenten la durabilidad.

BIBLIOGRAFIA

- CANALS A, (2007). Estudio de la aplicabilidad de las cenizas volantes, de la planta térmica de Mudunuru (India), en materiales de construcción. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Chiguay Velásquez, Jassna Elizabeth, ANALISIS RAZON AGUA/CEMENTO CON MORTERO DE CEMENTO BLANCO, Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Constructor, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile, 2007, pp 53.
- http://www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_const/Tema9.pdf
Cátedra de Ingeniería Rural
Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real.
- ICONTEC, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Norma 220, DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DEMORTEROS DE CEMENTO HIDRÁULICO USANDOCUBOS DE 50 mm ó 50,8 mm DE LADO, Bogotá, 2004.
- ICONTEC, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Norma 118, MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR ELTIEMPO DE FRAGUADO DEL CEMENTOHIDRÁULICO MEDIANTE EL APARATO DE VICAT, Bogotá, 2004.
- ICONTEC, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Norma 110, MÉTODO PARA DETERMINAR LA CONSISTENCIANORMAL DEL CEMENTO HIDRÁULICO, Bogotá, 2008.
- ICONTEC, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Norma 221, CEMENTOS. MÉTODO DE ENSAYO PARADETERMINAR LA DENSIDAD DEL CEMENTOHIDRÁULICO, Bogotá, 1999.
- ICONTEC, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Norma 111, ESPECIFICACIONES PARA LA MESA DE FLUJO USADA EN ENSAYOS DE CEMENTO HIDRAULICO, Bogotá, 2004.

- ICONTEC, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Norma 3493. INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA. CENIZAS VOLANTES Y PUZOLANAS NATURALES, CALCINADAS O CRUDAS, UTILIZADAS COMO ADITIVOS MINERALES EN EL CONCRETO DE CEMENTO PORTLAND, Bogotá, 1993.
- ICONTEC, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Norma 4018, INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. ESCORIA DE ALTO HORNO GRANULADA Y MOLIDA PARA USO EN CONCRETO Y MORTEROS, Bogotá, 1995.
- ICONTEC, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Norma 237, INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. MÉTODO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD Y LA ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO, Bogotá, 1995.
- ICONTEC, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Norma 127, CONCRETOS. MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LAS IMPUREZAS ORGÁNICAS EN AGREGADO FINO PARA CONCRETO, Bogotá, 2000.
- ICONTEC, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Norma 77, CONCRETOS, MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ANÁLISIS PORTAMIZADO DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS, Bogotá, 2007.
- INVIAS Norma I.N.V. E – 133, EQUIVALENTE DE ARENA DE SUELOS Y AGREGADOS FINOS.
- Izaguirre, A. , Lanas, J. , Álvarez, J.I. , Cement and Concrete Research, Ageing of lime mortars with admixtures: Durability and strength assessment, Disponible en internet <http://ees.elsevier.com/CEMCON/default.asp>.
- Juárez Badillo, Eulalio, Mecánica de Suelos, LIMUSA SA, Tomo 1, México, 2005, pp. 644.
- Newman, John, Seng, Choo Ban, Advanced Concrete Technology Constituent Materials, Civil engineering, Great Britain, Butterworth-Heinemann, 2003, pp. 288.

- Ordoñez, Gabriel, Materiales de Construcción, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, FACULTAD DE INGENIERIA, ESCUELA DE CIVIL, Año, pp.222.
- Rajamane, N.P., Peter J. A., and Ambily P.S. (2007) Prediction of compressive strength of concrete with fly ash as sand replacement material. Cement and Concrete Composites, vol. 29, pp. 218-223.
- RILEM, Fly Ash in Concrete Properties and Performance, Report of Technical Committee 67-FAB, The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures, Edited by K.Wesche, An Imprint of Chapman & Hall London, 1991. Disponible en internet en <http://es.scribd.com/doc/56621395/2-Fly-Ash-in-Concrete-K-1-Wesche>, consultado el 8 de julio de 2012.
- Rivera López, Gerardo Antonio, Concreto Simple, BSERRANO, Popayán, Universidad del Cauca, 1992, pp. 292.
- Sánchez de Guzmán, Diego, Concretos y Morteros: Manejo y Colocación en Obra, 2^{da} edición. Bogotá: ASOCRETO, 1998. pp. 174.
- Santaella Valencia, Luz Elena, Caracterización física-química y mineralógica de las cenizas volantes, Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 2001, Julio, número 010, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, pp. 47-62.

ANEXOS

ANEXO A. Tabla de clasificación de suelos según la AASTHO

TABLA N° 1 : Clasificación de Suelos según AASHTO

CLASIFICACION GENERAL	Materiales Granulares (igual o menor del 35% pasa a el tamiz N° 200)							Materiales Limo - Arcillosos (más del 35% que pasa el tamiz N° 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
GRUPOS	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5
SUB - GRUPOS											
% que pasa el Tamiz:											
N° 10	50 máx.										
N° 40	30 máx.	50 máx.	51 máx.								
N° 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	
Características del Material que pasa el tamiz N° 40											
Límite Líquido			NO PLÁSTICO	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 máx.
Índice de Plasticidad	6 máx.	6 máx.		10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Tipos de Material	fragmentos de piedra grava y arena		Arena fina	Grava, arenas limosas y arcillosas				Suelos Limosos		Suelos Arcillosos	
Terreno de Fundación	Excelente a Bueno							Regular a Deficiente			

NOTA: El índice de plasticidad de los suelos A-7-5 es igual o menor que su Límite Líquido 30, el de los A-7-6 mayor que su Límite Líquido (fig. 1) se halla indicada la relación entre lo LL e IP de los materiales finos. Dicho de otro modo, el grupo A-7 es subdividido en A-7-5 ó A-7-6 dependiendo del Límite Plástico (L.P.)

Si el LP \geq 30, la clasificación es A-7-6

Si el LP < 30, la clasificación es A-7-5

Fuente: Tomado de la norma AASTHO M 145 (2003)

ANEXO B. Granulometría del agregado fino

Arena muestra No1	peso inicial	1424			
	peso después de lavado	1380,2			
	abertura (mm)	peso ret	% ret	%ret total	%pasa total
					100
3/8"	9,5	17,8	1,25	1,25	98,75
No4	4,8	47	3,3	4,55	95,45
8"	2,4	80,2	5,6	10,15	89,85
16"	1,2	145,2	10,2	20,35	79,65
30"	0,6	351,8	24,71	45,06	54,94
50"	0,3	443,2	31,12	76,18	23,82
100"	0,15	226,8	15,93	92,11	7,89
200"	0,075	59	4,17	96,28	3,72
fondo		53	3,72	100,0	0,00
MODULO DE FINURA	% ret/100	2,50			

Arena Muestra N02	peso inicial	1350			
	peso después de lavado	1315,8			
tamiz	abertura mm	peso retenido	% retenido	% ret total	% pasa total
					100
3/8"	9,5	5,4	0,40	0,40	99,60
No 4	4,8	36,5	2,70	3,10	96,90
8"	2,4	153,9	11,40	14,50	85,50
16"	1,2	153,6	11,38	25,88	74,12
30"	0,6	457,2	33,87	59,75	40,25
50"	0,3	303	22,44	82,19	17,81
100"	0,15	167,4	12,40	94,59	5,41
200"	0,075	38,8	2,87	97,47	2,53
fondo		0	0,00	97,47	2,53
MODULO DE FINURA	% ret/100	2,80			

Arena muestra No 3	peso inicial	1619			
	peso después de lavado	1552,5			
	abertura (mm)	peso ret	% ret	%ret total	%pasa total
					100
8	2,4	118	7,29	7,29	92,71
16	1,2	159,2	9,83	17,12	82,88
30	0,6	576,4	35,60	52,72	47,28
50	0,3	451,8	27,91	80,63	19,37
100	0,15	195,8	12,09	92,72	7,28
200	0,075	51,2	3,16	95,89	4,11
fondo		66,6	4,11	100,00	0,00
MODULO DE FINURA	% ret/100	2,50			

Arena muestra No4	peso inicial	1519			
	peso después de lavado	1498,8			
	abertura (mm)	peso ret	% ret	%ret total	%pasa total
					100
8	2,4	118	7,77	7,77	92,23
16	1,2	139,2	9,16	16,93	83,07
30	0,6	547,4	36,04	52,97	47,03
50	0,3	447,2	29,44	82,41	17,59
100	0,15	195,8	12,89	95,30	4,70
200	0,075	51,2	3,37	98,67	1,33
fondo		20,2	1,33	100	0,00
MODULO DE FINURA	% ret/100	2,6			

ANEXO C. Granulometría de la ceniza

ceniza muestra 1	peso inicial	1594,4			
	peso después de lavado	1302,89			
	abertura (mm)	peso ret	% ret	%ret total	%pasa total
					100
3/8"	9,5	33,88	2,12	2,12	97,88
No4	4,8	138,32	8,68	10,80	89,20
8"	2,4	152,68	9,58	20,38	79,62
16"	1,2	207,13	12,99	33,37	66,63
30"	0,6	226,65	14,22	47,58	52,42
50"	0,3	199,7	12,53	60,11	39,89
100"	0,15	245,85	15,42	75,53	24,47
200"	0,075	98,62	6,19	81,71	18,29
fondo		291,51	18,28	100,00	0,00
MODULO DE FINURA	% ret/100	2,50			

ceniza muestra 2	peso inicial		945,4		
	peso después de lavado		747,46		
TAMIZ	abertura (mm)	peso ret	% ret	%ret total	%pasa total
					100
3/8"	9,5	29,38	3,11	3,11	96,89
No4	4,8	63,38	6,70	9,81	90,19
8"	2,4	71,68	7,58	17,39	82,61
16"	1,2	117,73	12,45	29,85	70,15
30"	0,6	123,38	13,05	42,90	57,10
50"	0,3	133,23	14,09	56,99	43,01
100"	0,15	142,8	15,10	72,09	27,91
200"	0,075	65,88	6,97	79,06	20,94
fondo		197,94	20,94	100,00	0,00
MODULO DE FINURA	% ret/100	2,32			

ANEXO D. Gravedad Específica del agregado fino

Agregado saturado	500	g
picnómetro con agua (B)	617,89	g
picnómetro agua + agregado (C)	918,35	g
Ge	2,51	g/cm ³

Para la obtención de estos valores de gravedad específica, nos guiamos de las fórmulas que presenta la NTC 237, en donde dice:

$$\text{Gravedad específica de masa (SSD)} = \frac{500}{B + 500 - C} ; \text{ Donde}$$

B = Peso del frasco (picnómetro) con agua, gramos

C = Peso del frasco + la muestra + el agua, hasta la marca de calibración

500 = Peso del agregado fino saturado usado en gramos

ANEXO E. Gravedad Específica de la ceniza

45 gr ceniza		
medida # 1	0,3	
medida # 2	19,4	
Ge	2,36	g/cm^3

ANEXO F. Equivalente de arena.

prueba # 1		Ea
Lectura Arcilla	3,4	
Lectura Arena	3	88,24
Prueba #2		
Lectura Arcilla	3,4	
Lectura Arena	3,1	91,18
Prueba #3		
Lectura Arcilla	3,6	
Lectura Arena	3,1	86,11

Ea	88,51
-----------	-------

Anexo G. Materia orgánica ceniza

Peso del trisol	65,6	gr
Peso trisol +suelo seco	104,32	gr
Peso trisol +suelo calcinado	102,47	gr
% materia orgánica	0,048	4,8

Anexo H. Datos recolectados de tiempo de fraguado

Tiempos de Fraguado para:

Mezcla 100% Cemento (160 ml agua – 5 mm penetración)

(170 ml – 7 mm)

(180 ml – 9 mm)

Tiempo (min)	Penetración (mm)	
0	40	
60	28	
75	25	Tiempo fraguado inicial
90	23	
105	23	
120	22	
135	22	
150	20	
165	6	
180	4	
195	3	
210	2	
225	2	
240	1	
255	1	
270	0	Tiempo fraguado final

Anexo I. Mezcla 50% Cemento 50% Ceniza (115 ml agua – 5 mm penetración)

(130 ml – 10 mm)

Tiempo (min)	Penetración (mm)	
0	35	
15	32	
30	35	
60	26	
65	26	
75	26	
85	25	Tiempo fraguado inicial
100	22	
115	26	
130	10	
145	15	
160	5	
175	2	
190	2	
205	3	
220	1	
235	0	Tiempo fraguado final

**Anexo J. Mezcla 60% Cemento 40%
Ceniza (14 ml agua – 10 mm
penetración)**

Tiempo (min)	Penetración (mm)	
0	38	
35	30	
60	25	Tiempo fraguado inicial
75	22	
90	21	
105	20	
120	15	
135	15	
150	12	
165	12	
180	12	
195	9	
210	6	
225	4	
240	3	
255	2	
270	1	
285	0	Tiempo fraguado final

**Anexo K. Mezcla 70% Cemento 30%
Ceniza (150 ml agua – 10 mm
penetración)**

Tiempo (min)	Penetración (mm)	
0	40	
60	36	
75	34	
90	25	Tiempo fraguado inicial
105	22	
120	5	
135	4	
150	5	
165	3	
180	2	
195	2	
210	1	
225	0	Tiempo fraguado final

**Anexo L. Mezcla 80% Cemento 20%
Ceniza (155 ml agua – 11 mm
penetración)**

Tiempo (min)	Penetración (mm)	
0	40	
60	29	
75	30	
90	30	
105	25	Tiempo fraguado inicial
120	24	
135	21	
150	14	
165	14	
180	8	
195	4	
210	2	
225	1	
240	0	Tiempo fraguado final

**Anexo M. Mezcla 90% Cemento 10%
Ceniza (170 ml agua – 9 mm
penetración)**

Tiempo (min)	Penetración (mm)	
0	40	
60	30	
75	28	
90	25	Tiempo fraguado inicial
105	23	
120	22	
135	22	
150	20	
165	6	
180	4	
195	3	
210	2	
225	2	
240	1	
255	0	Tiempo fraguado final

Anexo N. Medida de Fluidiez

MESA DE FLUJO MDF1
100% CEMENTO

LECTURA DE MESA DE FLUJO (mm)	
	180
	176
	179
	175
PROMEDIO	177,5
MEDIDA DE FLUIDEZ	74.70%

50% CEMENTO-50% CENIZA

LECTURA DE MESA DE FLUJO (mm)	
	154
	161
	160
	162
PROMEDIO	159,3
MEDIDA DE FLUIDEZ	56.70%

60% CEMENTO-40% CENIZA

LECTURA DE MESA DE FLUJO (mm)	
	190
	189
	185
	196
PROMEDIO	190,0
MEDIDA DE FLUIDEZ	87.00%

70% CEMENTO- 30% CENIZA

LECTURA DE MESA DE FLUJO (mm)	
	175
	172
	180
	179
PROMEDIO	176,5
MEDIDA DE FLUIDEZ	73.70%

80% CEMENTO-20% CENIZA

LECTURA DE MESA DE FLUJO (mm)	
	174
	172
	171
	177
PROMEDIO	173,5
MEDIDA DE FLUIDEZ	70.80%

90%CEMENTO-10%CENIZA

LECTURA DE MESA DE FLUJO (mm)	
	173
	170
	175
	165
PROMEDIO	170,8
MEDIDA DE FLUIDEZ	68.10%

MESA DE FLUJO MDF2

100% CEMENTO

LECTURA DE MESA DE FLUJO (mm)	
	176
	172
	181
	185
PROMEDIO	178,5
MEDIDA DE FLUIDEZ	75.69%

70% CEMENTO-30% CENIZA

LECTURA DE MESA DE FLUJO (mm)	
	152
	156
	162
	171
PROMEDIO	160,3
MEDIDA DE FLUIDEZ	57.73%

50% CEMENTO-40% CENIZA

LECTURA DE MESA DE FLUJO (mm)	
	173
	160
	171
	169
PROMEDIO	168,3
MEDIDA DE FLUIDEZ	65.60%

80% CEMENTO-20% CENIZA

LECTURA DE MESA DE FLUJO (mm)	
	169
	168
	164
	168
PROMEDIO	167,3
MEDIDA DE FLUIDEZ	64.62%

60% CEMENTO-40% CENIZA

LECTURA DE MESA DE FLUJO (mm)	
	165
	165
	171
	169
PROMEDIO	167,5
MEDIDA DE FLUIDEZ	64.86%

90% CEMENTO-10% CENIZA

LECTURA DE MESA DE FLUJO (mm)	
	176
	175
	177
	182
PROMEDIO	177,5
MEDIDA DE FLUIDEZ	74.70%