



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MORTERO DE CEMENTO Y CAL CON
ADICIÓN DE POLVO DE BARRO COCIDO**

David Estuardo Ortiz Wolford

Asesorado por la Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol

Guatemala, mayo de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MORTERO DE CEMENTO Y CAL CON
ADICIÓN DE POLVO DE BARRO COCIDO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

DAVID ESTUARDO ORTIZ WOLFORD

ASESORADO POR LA INGA. DILMA YANET MEJICANOS JOL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, MAYO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
EXAMINADOR	Ing. Fredy Adolfo Alvarado Hernández
EXAMINADOR	Ing. Dennis Salvador Argueta Mayorga
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO Y EVALUACION DE MORTERO DE CEMENTO Y CAL CON ADICIÓN DE POLVO DE BARRO COCIDO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha marzo de 2015.



David Estuardo Ortiz Wolford



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Guatemala, 26 de febrero de 2019

Ingeniero
José Gabriel Ordoñez Morales
Área de Materiales y Construcciones Civiles
COORDINADOR

Ingeniero Ordoñez

Me dirijo a usted para informarle, que he revisado el trabajo de graduación: **DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MORTERO DE CEMENTO Y CAL CON ADICIÓN DE POLVO DE BARRO COCIDO**, elaborado con el estudiante universitario David Estuardo Ortiz Wolford, quien contó con la asesoría de la suscrita.

Considerando que el trabajo desarrollado por el estudiante universitario Ortiz Wolford, satisface los requisitos exigidos en el reglamento de graduación, por lo cual recomiendo su aprobación.

Atentamente,

"Id y enseñad a todos"


Inga. Civil Dilma Yanet Mejicanos Jol
Col. 5947
ASESORA


Dilma Y. Mejicanos Jol
Ingeniera Civil
Col. 5947



USAC

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala,
24 de abril de 2019

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MORTERO DE CEMENTO Y CAL CON ADICIÓN DE POLVO DE BARRO CÓCIDO** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil David Estuardo Ortiz Wolford quien contó con la asesoría de la Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

RESPECTO Y ENSEÑANZA A TODOS

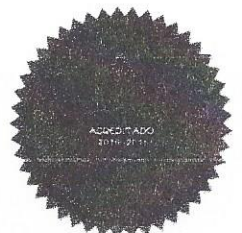
Ing. Civil José Gabriel Ordóñez Morales
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES

USAC

/mrrm.



Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen de la Asesora Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol y del Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante David Estuardo Ortiz Wolford DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MORTERO DE CEMENTO Y CAL CON ADICIÓN DE POLVO DE BARRO COCIDO da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, mayo 2019

/mmm.



Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua

Universidad de San Carlos
de Guatemala

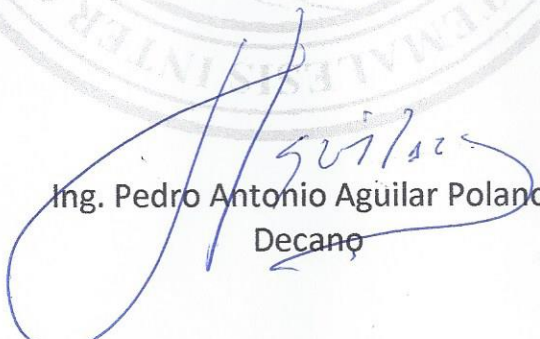


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 277.2019

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MORTERO DE CEMENTO Y CAL CON ADICIÓN DE POLVO DE BARRO COCIDO**, presentado por el estudiante universitario: **David Estuardo Ortiz Wolford**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, mayo de 2019

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por guiarme y sostenerme hasta este momento de mi vida, a pesar de las dificultades que surgieron en el camino y porque hoy veo cumplirse un tiempo muy esperado.
- Mis padres** Edgar René Ortíz Monterroso y Eva Patricia Wolford de Ortíz, por su amor, esfuerzo y apoyo incondicional durante este recorrido.
- Mis hermanos** Jenniffer, Jackeline y Emmanuel Ortiz Wolford, por su cariño y apoyo presentes desde nuestra niñez.
- Mis abuelos** Samuel Wolford (q. d. e. p), Marta Julia de Wolford (q. d. e. p), Marco Antonio Ortíz (q. d. e. p) y Herminia Monterroso.
- Mis tíos** Por su cariño y estar siempre pendientes de mi formación universitaria, animándome a culminarla.
- Mis amigos** Por tantos momentos compartidos.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por orquestar este logro, colmarme de bendiciones y permitirme lograr una de las metas más importantes de mi vida.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Especialmente a la Facultad de Ingeniería, por permitirme realizar mis estudios y formarme como un profesional de bien.
CII / USAC	Por abrirme las puertas y permitir realizar la elaboración experimental de mi trabajo de graduación.
Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol	Por creer en mí, compartir su conocimiento y asesorarme en este trabajo de graduación.
Sección de Agregados, Concretos y Morteros	Por compartir experiencias y amistad en los últimos años de estudio y durante el proceso de investigación.
Mi familia	Por apoyarme durante todo este tiempo y mostrarme su cariño a lo largo de mi carrera universitaria.
Mis amigos	Wilmer López, Luis Lucero y Julio Álvarez, por caminar juntos en esta aventura.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XVII
OBJETIVOS	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. BARRO COCIDO	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Producción de barro cocido	2
1.2.1. Métodos de producción	3
1.2.1.1. Producción artesanal.....	3
1.2.1.2. Producción industrial	4
1.3. Calidad de ladrillo de barro cocido	4
1.3.1. Requisitos físicos	5
1.3.2. Evaluación del control de calidad	6
1.4. Costos de producción	7
1.5. Alcances de productos de barro cocido	8
1.5.1. En la construcción	8
1.5.2. En el manejo de residuos	9
1.5.3. En el aprovechamiento de residuos	9
1.6. Desechos de barro cocido	10
1.6.1. Definición	10
1.6.2. Cantidades en peso que se genera.....	10
1.6.3. Obtención.....	11

1.6.4.	Propiedades.....	11
1.6.5.	Aplicaciones.....	11
1.6.6.	Utilización actual del desecho	12
1.6.7.	Lugar de descarga de los desechos actuales.....	12
1.7.	Proceso de residuos	13
1.7.1.	Pulverización	13
1.7.1.1.	Mecanismos	13
1.7.1.2.	Selección del dispositivo pulverizador	14
1.7.2.	Trituración.....	14
1.7.2.1.	Máquinas para trituración y molienda ..	14
1.7.2.1.1.	Trituradoras de aplicación de presión	15
1.7.2.1.2.	Trituradoras por choque	17
1.7.2.2.	Costos de trituración	18
1.7.2.3.	Ventajas de trituración.....	19
1.7.3.	Etapas de trituración.....	19
2.	PROPIEDADES DE LOS MORTEROS.....	21
2.1.	Tipos de mortero según Norma ASTM C 1329	21
2.2.	Especificaciones según Norma NTG 41050 (ASTM C 270-10).....	21
2.3.	Propiedades en estado plástico	23
2.3.1.	Trabajabilidad	23
2.3.2.	Retención de agua.....	24
2.3.3.	Contenido de aire	25
2.3.4.	Velocidad de endurecimiento	25
2.4.	Propiedades en estado endurecido.....	25

2.4.1.	Adherencia.....	25
2.4.2.	Resistencia a compresión.....	26
2.4.3.	Resistencia a tensión.....	26
2.4.4.	Permeabilidad.....	26
2.5.	Materiales.....	27
2.5.1.	Cal.....	27
2.5.1.1.	Tipos de cal	27
2.5.1.1.1.	Cal viva	27
2.5.1.1.2.	Cal hidratada.....	28
2.5.1.1.3.	Cal hidráulica	28
2.5.2.	Cemento	28
2.5.2.1.	Cemento puzolánico.....	28
2.5.2.2.	Cemento Portland.....	29
2.5.3.	Polvo de barro cocido	29
2.5.3.1.	Características del barro	30
2.5.3.2.	Ventajas por cocción	30
3.	DISEÑO PRÁCTICO DE MORTERO Y ENSAYOS	35
3.1.	Equipo utilizado.....	35
3.2.	Realización de las muestras	35
3.2.1.	Mezcla tradicional	35
3.2.2.	Mezcla de prueba	36
3.2.2.1.	Dosificación del mortero patrón de comparación	36
3.2.2.2.	Dosificación de las muestras experimentales	37
3.2.2.3.	Selección del tamaño de partícula del barro cocido	38
3.2.3.	Materiales utilizados en las mezclas	38

3.2.3.1.	Polvo de barro cocido.....	39
3.2.3.2.	Agregado fino	41
3.2.3.3.	Cal hidratada	46
3.2.3.4.	Cemento puzolánico.....	46
3.2.3.5.	Agua para el mezclado.....	48
3.3.	Ensayos en estado plástico	48
3.3.1.	Trabajabilidad según Norma NTG 41003 h13 (ASTM C1437-07).....	49
3.3.2.	Retención de agua ASTM C1506.....	50
3.3.3.	Contenido de aire NTG 41003 h3 (ASTM C 185- 08).....	51
3.3.4.	Velocidad de endurecimiento según Norma NTG 41003 h10 (ASTM C191-08)	52
3.4.	Ensayo en estado endurecido	54
3.4.1.	Realización de ensayos a compresión según Norma NTG 41003 h4 (ASTM C109/C109M-11b) ..	54
3.4.2.	Realización de ensayos a tensión según Norma INV E - 327	56
3.4.3.	Realización de ensayos por adherencia en juntas de mampostería.....	58
3.5.	Comparación de resultados entre ambas dosificaciones.....	62
3.5.1.	Peso de las muestras	62
3.5.2.	Carga aplicada a las muestras	63
3.5.3.	Resistencia a compresión	64
4.	RESULTADOS.....	65
4.1.	Datos obtenidos en ensayos a morteros	65
4.2.	Tabulación de resultados.....	66
4.3.	Presentación de resultados	70

4.3.1.	Resistencia a la compresión.....	72
4.3.2.	Resistencia a la tensión.....	76
4.3.3.	Resistencia a la adherencia.....	80
4.4.	Análisis e interpretación de resultados.....	83
CONCLUSIONES.....		85
RECOMENDACIONES.....		89
BIBLIOGRAFÍA.....		91
ANEXOS.....		95

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Trituradora tipo cono.....	15
2.	Trituradora tipo mandíbula.....	16
3.	Trituradora tipo rodillo.....	17
4.	Trituradora por impacto	18
5.	Micrografía de partículas de arcilla calcinada con aumento de 2000X.....	31
6.	Micrografía de partículas de ceniza volante con aumento de 1000X ...	32
7.	Homogenización y mezclado de los morteros.....	39
8.	Material pulverizado para mezclas experimentales	39
9.	Agregado fino.....	42
10.	Granulometría del agregado fino.....	45
11.	Ensayo de flujo	49
12.	Determinación del flujo	50
13.	Determinación de la retención de agua.....	51
14.	Determinación del tiempo de fraguado o velocidad de endurecimiento	53
15.	Ensayo de compresión a cubos de mortero de 50 mm.....	56
16.	Ensayo a tensión en briquetas de mortero.....	57
17.	Modelo de prismas de bloques de concreto y ladrillos cerámicos para el ensayo de adherencia en juntas.....	59
18.	Ensayo de adherencia en bloques de concreto	60
19.	Ensayo de adherencia en ladrillos de barro cocido.....	61
20.	Diagramas de aplicación de carga	64

21.	Gráfica de velocidad de endurecimiento o tiempo de fraguado.....	71
22.	Resistencia a compresión en mezclas con adición de polvo de barro cocido	74
23.	Resistencia a compresión en mezclas con sustitución del cemento con polvo de barro cocido	75
24.	Resistencia a tensión en mezclas con adición de polvo de barro cocido.....	78
25.	Resistencia a tensión en mezclas con sustitución de cemento por polvo de barro cocido	79
26.	Resistencia por adherencia en juntas de unidades de <i>block</i> de concreto a 28 días	81
27.	Resistencia por adherencia en juntas de unidades de ladrillo tubular de barro cocido a 28 días	82

TABLAS

I.	Dimensiones nominales de ladrillos de barro cocido	5
II.	Requisitos para la especificación por proporciones.....	21
III.	Requisitos para la especificación por propiedades.....	22
IV.	Clasificación de puzolanas	32
V.	Dosificación de materiales para ensayo de flujo, por 300 g de muestra de cemento	37
VI.	Análisis químico de la muestra mediante fluorescencia de rayos X	40
VII.	Requisitos granulométricos para morteros de albañilería.....	42
VIII.	Características físicas del agregado fino utilizado	43
IX.	Porcentaje que pasa para el agregado fino utilizado	44
X.	Composición química del cemento.....	47
XI.	Contenido de aire en mezclas de mortero de cemento y cal realizadas.....	52

XII.	Cantidad de materiales para elaboración de cubos y briquetas [g]	63
XIII.	Análisis químico del polvo de barro cocido utilizado en sustitución del cemento dentro de las mezclas	66
XIV.	Ensayos en mortero fresco.....	67
XV.	Variación de flujos por muestra	68
XVI.	Resistencia a compresión.....	72
XVII.	Resistencia a la tensión.....	77
XVIII.	Resistencia por adherencia en juntas de <i>block</i> clasificación "C" a los 28 días.....	80
XIX.	Resistencia por adherencia en juntas en ladrillos tubulares de barro cocido a los 28 días	82
XX.	Resumen de resultados de las mejores mezclas experimentales de adición y sustitución.....	84

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm	Centímetro
cm²	Centímetro cuadrado
g	Gramo
kg	Kilogramo
kg/cm²	Kilogramo por centímetro cuadrado
kg/m³	Kilogramo por metro cúbico
PSI	Libra por pulgada cuadrada
±	Más/menos
MES	Mezcla por sustitución
ml	Mililitro
mm	Milímetro
mm²	Milímetro cuadrado
#	Número
Al₂O₃	Óxido de aluminio
CaO	Óxido de calcio
Fe₂O₃	Óxido de hierro
SiO₂	Óxido de silicio
%	Porcentaje
pulg	Pulgada
pulg²	Pulgada cuadrada
fm	Resistencia a la compresión del mortero
Rt	Resistencia a la tensión del mortero

GLOSARIO

Agregado	Material inorgánico natural o artificial cuyas dimensiones están comprendidas entre los límites fijados, según norma están clasificados como fino y grueso; ocupa aproximadamente el 75 % del volumen del concreto.
Aluminato	Compuesto químico formado por aluminio en combinación con otras bases.
ASTM	Sociedad Americana para el Ensayo e Inspección de los Materiales, por sus siglas en inglés American Society for Testing and Materials.
Carbonatación	Reacción entre el dióxido de carbono y un hidróxido u óxido para formar carbonato.
Cemento hidráulico	Es un aglomerante que fragua, endurece y desarrolla resistencia por reacción química con el agua, tanto en el aire como debajo del agua.
Coguanor	Comisión Guatemalteca de Normas.
Cohesión	Atracción mutua a través de la cual los elementos de una sustancia se mantienen unidos.

Curado	Proceso a través del cual se mantiene el concreto y mortero en la condición húmeda y a una temperatura favorable, a fin de que se desarrollen las propiedades deseadas del material. El curado garantiza la hidratación y el endurecimiento satisfactorio de los materiales cementantes.
Dosificación	Proceso de medición, por peso o volumen, de los materiales y su introducción en la mezcladora para una cantidad de concreto o mortero.
Etrignita	Compuesto presente durante la hidratación del cemento, responsable del fraguado rápido del mismo.
Fraguado	Grado en el cual el concreto fresco perdió su plasticidad y se endurece.
Hidratación	Es la reacción entre el cemento hidráulico y el agua, a través de la cual se forman nuevos compuestos que confieren resistencia al concreto.
Hidróxido	Son compuestos iónicos formados por un metal (catión) y un elemento del grupo hidróxido (anión). Se trata de compuestos ternarios, aunque tanto su formulación y nomenclatura son idénticos a las de los compuestos binarios.

Mortero	Mezcla de materiales aglomerantes, agregado fino y agua, que puede contener aditivos y normalmente se usa para unir unidades de mampostería.
Pasta	Constituyente del concreto y mortero, consiste en cemento y agua.
pH	Símbolo químico que representa el logaritmo del recíproco de la concentración de iones de hidrógeno en átomos gramo por litro, usado para expresar la acidez y la alcalinidad (base) de la solución en una escala de 0 a 14, donde menos que 7 representa acidez y más que 7 alcalinidad.
Portlandita	Hidróxido de calcio, principal producto cristalino resultante de la hidratación del cemento.
Prisma	Cuerpo geométrico compuesto por dos o más elementos de mampostería. Generalmente se elabora para determinar comportamientos bajo esfuerzos de ensayo.
Puzolana	Materiales silíceos y aluminosos, tales como la ceniza volante o el humo de sílice, que por sí mismos poseen poco o ningún valor cementante, pero que, cuando están finamente molidos y en presencia de agua, reaccionan con el hidróxido de calcio a temperaturas normales, para formar compuestos que poseen propiedades cementantes.

Rigidez	Es una medida de la resistencia a las deformaciones elásticas producidas por un material, que contempla la capacidad de un elemento estructural para soportar esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones.
Segregación	Separación de los componentes del concreto fresco (agregados y mortero), resultando en una mezcla sin uniformidad.
Silicato	Sal formada por combinación del ácido silicio y una base, se puede obtener por fusión conjunta de la sílice con un carbonato de metal alcalino.
Sustitución	Productos que sustituyen al cemento en pequeñas proporciones durante el mezclado, con el propósito de producir una modificación en algunas de sus propiedades originales o en el comportamiento del concreto en su estado fresco y/o en estado endurecido.
Trabajabilidad	Propiedad del concreto y mortero fresco que determina sus características de trabajo, es decir, la facilidad para su mezclado, colocación, moldeo y acabado.
Tricálcico	Compuesto químico con tres moléculas de calcio.

RESUMEN

El trabajo de investigación muestra el análisis del uso de polvo de barro cocido como adición y sustitución de la cantidad de cemento en mezclas de mortero de cemento y cal en pequeñas cantidades, con el fin de determinar si el uso del barro cocido en la mezcla tiene un efecto favorable o desfavorable en la resistencia y trabajabilidad, para establecer un método que mitigue la contaminación generada por la producción de elementos de arcilla cocida, promoviendo el reúso de los desechos como alternativa viable que favorezca al sector de la construcción.

Estos resultados se determinan realizando ensayos a compresión, tensión y adherencia en estado endurecido para cada mezcla. Al obtener los resultados se comparan y analizan, para así determinar la mejor proporción de arcilla que se utilizará en la mezcla, siendo como adición o sustitución del cemento.

Para realizar la investigación se usaron nueve diseños de mezcla de mortero de cemento y cal, utilizando polvo de barro cocido como sustitución del cemento en las mezclas en diferentes proporciones para cuatro diseños de mezcla y como adición para otras cuatro, variando estos porcentajes en 5 unidades respectivamente, desde 5 % hasta 20 %. Estas mezclas, con las proporciones de polvo de barro ya definidas, se comparan con una mezcla patrón, la cual no contiene el material arcilloso. Por cada mezcla elaborada se realizaron ensayos de flujo, tiempo de fraguado, retención de agua con el mortero en estado fresco y contenido de aire para las mezclas en sustitución del cemento.

La mayoría de estos ensayos están basados en especificaciones que contemplan las normas Coguanor y ASTM. Los ensayos se realizaron en la Sección de Agregados, Concretos y Morteros del CII y en el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso.

Los resultados obtenidos muestran que el uso de polvo de barro cocido en mezclas de mortero de cemento y cal, en proporciones controladas, aumenta significativamente la resistencia del mortero endurecido. Este comportamiento es más evidente en las mezclas que se realizaron como sustitución del cemento.

El polvo de barro trabaja como una puzolana natural dentro del mortero, siendo este un producto de una arcilla calcinada, provocando un aumento de resistencia a edades avanzadas. El uso controlado de polvo de barro cocido brinda una mayor trabajabilidad en la mezcla de mortero fresco, sin aumentar significativamente la cantidad de agua. Estos resultados favorables demuestran que es factible y recomendable el uso de polvo de barro cocido en mezclas de mortero de cemento y cal, toda vez cumpla con los requisitos para su utilización.

OBJETIVOS

General

Establecer una solución para el manejo de los desechos que resultan de la producción de ladrillos de barro cocido en Guatemala, aprovechando este material para el uso estructural en un mortero.

Específicos

1. Elaborar morteros que contengan el desperdicio de barro cocido.
2. Encontrar la proporción adecuada del mortero de investigación que se ajuste a la muestra patrón.
3. Determinar las características físicas y propiedades mecánicas del mortero en investigación.
4. Clasificar el mortero de acuerdo a la Norma ASTM C 109 (tipo N o S).
5. Establecer la variación de resistencia y su comportamiento a los 28 días, considerando la edad máxima para alcanzar el 100% de su resistencia de diseño.
6. Calcular la variación de costos al implementar polvo de barro cocido como desecho para la elaboración de mortero con la dosificación seleccionada.

INTRODUCCIÓN

La investigación impulsa una solución para la problemática que existe en las ladrilleras industriales y artesanales nacionales, a manera de reutilizar el material considerado como desperdicio, esto por no alcanzar los estándares internos de calidad, ayudando a disminuir potenciales riesgos en los actuales o futuros depósitos de desechos. Pulverizar estos desechos beneficiaría al sector de la construcción, elaborando morteros de pega para mampostería, siendo el caso de esta investigación.

Para efectos de la presente investigación se tomaron morteros para usos en estructuras de mampostería, según clasificación “N” y “S”. Estos tipos de morteros son efectivos para resistir inclemencias del clima, tipo de recubrimiento, como también resistencias a compresión relativamente altas. Un dato importante a considerar es que los morteros conformados por cal/cemento en promedio, los de tipo S, desarrollan $\frac{2}{3}$ más resistencia que los morteros tipo N, para esto se realizará una serie de diseños de morteros de cemento y cal, en proporciones según el peso del cemento. En cuatro diseños de mezcla se adicionará el polvo de barro cocido en porcentajes del peso del cemento y en otras cuatro se sustituirá el cemento en los mismos porcentajes por polvo de barro cocido, y se compararán con un diseño de mortero sin polvo de barro, al cual se le denomina mortero patrón, esto para determinar si las mezclas que obtengan los resultados esperados, al evaluar las características físicas y mecánicas del diseño de mezcla, pueden ser clasificadas como morteros tipo “N” o “S”.

Inicialmente se presenta una descripción de qué es el barro cocido, los alcances que ha tenido en la construcción y su proceso de fabricación. Además, también se describen generalidades del manejo y aprovechamiento de residuos, así como las propiedades de los morteros según normativas de estandarización.

Posteriormente se formulan los diseños de mezcla, describiendo los materiales usados, sus características físicas, los ensayos en estado fresco y endurecido que se realizaron en cada una de las pruebas del desarrollo experimental, finalizando con un consolidado, análisis y comparación de resultados de los ensayos realizados con el mortero patrón.

1. BARRO COCIDO

1.1. Antecedentes

Previo a la aparición de la rueda y la escritura, pocas innovaciones fueron revolucionarias en la calidad de vida del hombre, a no ser por los objetos de la cerámica. Su producción era sencilla y de bajo costo, pues casi siempre se utilizaba arcilla. Hacia la época del hombre de Cromañón se remonta la muestra más antigua de cerámica cocida al fuego, llamada también barro cocido, hace 25,000 años, cuando con el uso de arcilla mezclada con polvo de hueso los cazadores recolectores comenzaron a cocer estatuillas con una finalidad quizás ritualista.

La cerámica no llegó a su apogeo hasta que los hombres y las mujeres se asentaron definitivamente en comunidades y comenzaron a indagar procedimientos capaces de hacerles la vida más cómoda, más atractiva y más fácil.

Sin embargo, aun cuando vasijas de arcilla cruda se usaron anteriormente en algunas regiones, el secreto de cocer el barro para endurecerlo permanentemente no parece haberse conocido en las regiones del oriente más próximas al Mediterráneo, hasta el año 7 000 antes de Cristo, aproximadamente. La cocción del barro provocó una transformación radical en la manera de vivir desde el momento en que empezó a utilizarse. Dicha técnica proporcionaba un método cómodo y rápido para fabricar, no solo utensilios de cocina y recipientes para almacenar, sino también un crecido número de artículos, desde ladrillos, lámparas y chimeneas, hasta comederos, moldes y

pesos para los telares. Y, donde la piedra era escasa, se utilizaban para las labores del campo azadones y hoces de arcilla cocida.

Un ejemplo de la antigüedad y el uso del barro cocido en la construcción se encuentra en la antigua ciudad de Mohenjo – Daro, abandonada hace unos 4,000 años en Pakistán, en el valle del Río Indo. Construida según un plano cuadriculado, las calles rectas y paralelas estaban bordeadas de edificios construidos en ladrillo de barro cocido, resistente a la intemperie, donde casi todos los alojamientos tenían un baño de ladrillos impermeables con canales de drenaje para evacuar el agua.

El principal impulso de esta técnica lo recibe España y el viejo mundo de los arquitectos musulmanes de Siria, que hicieron uso del ladrillo. La exaltación del ladrillo en España tiene su monumento más representativo en el Castillo de Coca, erigido en el año 1400. El ladrillo persiste en España con la arquitectura renacentista y barroca.

El ladrillo es el más difundido de los materiales tectónicos, ha tenido mucha importancia en la arquitectura española y su vigencia se mantiene en los criterios actuales. La técnica de fabricación de materiales de barro cocido utilizada en España se popularizó en América Latina.

1.2. Producción de barro cocido

Los materiales cerámicos han sido empleados desde tiempos muy remotos hasta el presente, debido a sus múltiples propiedades, difícilmente presentes en otros productos.

Productos como el ladrillo, bloque tubular, piso y teja, son el resultado de una apropiada combinación de arcilla y agua, en algunos casos arena como un tercer elemento.

El proceso de manufactura depende de la tecnología y grado de mecanización empleado, variando desde el antiguo proceso artesanal hasta el industrial. Sin embargo, independientemente de la tecnología empleada, existen ciertas operaciones básicas efectuadas de diferente manera:

- Extracción o explotación de las materias primas
- Preparación
- Moldeo y corte
- Secado
- Cocción
- Selección

1.2.1. Métodos de producción

La fabricación del ladrillo de buena calidad depende directamente del tipo de arcilla que se utilice, homogenización de la mezcla y que presente propiedades plásticas para que, durante el proceso de secado, el ladrillo no sufra deformaciones perjudiciales o se agriete. El proceso de fabricación, independientemente si se realiza de manera industrial o artesanal, mantiene algunas fases fundamentales y similitudes entre sí.

1.2.1.1. Producción artesanal

Es un proceso tradicional usado durante décadas y trasladado por generaciones. Consiste en la elaboración de productos de barro cocido donde

cada pieza se fabrica individualmente y llega a ser distinta a las demás por emplear métodos empíricos de producción. Es un trabajo que se le atribuye al artesano.

1.2.1.2. Producción industrial

En este método de producción se utiliza maquinaria especializada para una demanda alta de producción, en donde el proceso es automatizado. Se tiene un estricto control de calidad en cada fase de producción y el artículo de barro cocido es manejado por el operario al final de la selección del producto terminado.

1.3. Calidad de ladrillo de barro cocido

Debido al proceso al que se somete una pieza de barro para ser formada y horneada a altas temperaturas, según a las técnicas y el equipo utilizado que generalmente influyen en el producto final, es necesario verificar y validar las características que presenta cada pieza, apegándose a los estándares nacionales.

Bajo los parámetros que califican la calidad del producto final en las ladrilleras más importantes del país, se ha determinado un promedio del uno por ciento de un lote mensual de productos fabricados, como material de tercera mano que puede ser vendido por un valor de noventa quetzales la tonelada.

Del mismo lote de productos fabricados en un mes, el tres por ciento se considera como desperdicio total, sin ningún valor para la empresa, considerándose para un manejo de desechos.

1.3.1. Requisitos físicos

Varían según distintas regiones o naciones, dependen también de las condiciones de uso de la pieza fabricada. Sin embargo, algunos aspectos a considerar son:

- Color uniforme
- Regularidad en sus dimensiones y forma
- Homogeneidad en su masa
- Capacidad a resistir esfuerzos

Las dimensiones nominales de los ladrillos de barro cocido que se hacen en Guatemala se muestran a continuación:

Tabla I. Dimensiones nominales de ladrillos de barro cocido

Tipo	Clase	Dimensiones, en cm		
		Largo	Ancho	Espesor
Tipo A. Ladrillos hechos con maquina	Clase P, o perforado	23	11	6,5 (*)
		23	14	6,5 (*)
	Clase T, o tubular	23	11	6,5 (*)
		23	14	6,5 (*)
		29	11	6,5 (*)
		29	14	6,5 (*)
		29	11	9
		29	14	9
		29	14	11
		23	11	11
		29	14	14
		23	23	11

Continuación de la tabla I.

Tipo B. Ladrillos hechos a mano	Clase M, o macizo (tayuyo)	23	11	6,5 (*)
		23	14	6,5 (*)
(*) Dimensiones más usadas. Las demás se fabrican a pedido especial, así como otras de uso menos frecuente que no se indican en la tabla.				

Fuente: elaboración propia.

1.3.2. Evaluación del control de calidad

En los procesos de producción artesanal no existen controles de calidad específicos, como los que establecen las normas nacionales. Se manejan controles generales o secundarios, los cuales permiten distinguir de manera visual los requerimientos en cada una de las fases de producción.

- Materia prima libre de residuos (materia orgánica)
- Granulometría adecuada para el mezclado
- Distribución de los ladrillos en el horno
- Tiempo de cocción
- Coloración uniforme de piezas terminadas
- Inspección final (libre de fisuras, grietas o manchas)

El control de calidad en la fabricación de ladrillos es indiscutible para la producción industrial, con estándares de calidad dictados por normas que garanticen la aceptabilidad en el mercado.

Este proceso toma en cuenta los siguientes controles:

- Materia prima libre de residuos (materia orgánica)
- Inspección visual de la calidad del barro
- Control del barro en el proceso de mezclado
- Grado de plasticidad de la mezcla
- Estricto control en la dimensión de las piezas
- En la cámara de secado
- Control visual del producto terminado
- Control de calidad final

1.4. Costos de producción

El costo variará según la forma de producción y el método que se utilice; desde procesos por extrusión o prensado en seco, ambas técnicas utilizadas a escala industrial, o producidos de manera artesanal.

Dentro del país es frecuente encontrar producción de ladrillo de manera artesanal, siendo utilizado para abastecer la demanda de la población local. Existen diversos puntos donde se producen ladrillos y baldosas de barro cocido, por ejemplo en el Departamento de Guatemala, Chinautla, El Progreso, El Tejar Chimaltenango, este último se conoce porque produce piezas de barro cocido desde 1576 y su producto se comercializa incluso hacia el interior del país.

En la actualidad las microempresas suelen tener una producción anual de entre 100,000 a 115,000 ladrillos, con un costo aproximado de Q. 0.50 la unidad, obteniendo un valor anual cerca de Q. 55,000.00 en producción. El destino es principalmente para satisfacer la demanda local, la comercialización se realiza en forma empírica, no se aplican los estudios y técnicas de mercadeo.

Por otra parte, dos de las fábricas que mantienen un mayor volumen de producción, ambas ubicadas al norte de la capital, son Las Cruces e Industria Materiales de Construcción (INMACO). Estas emplean procesos de producción industrial, procurando controles de calidad según normativas locales, para asegurar la calidad del producto. Los costos de producción y precios de venta son evidentemente más altos que los ladrillos producidos de manera artesanal.

1.5. Alcances de productos de barro cocido

Culturas antiguas utilizaron materiales como barro, piedra, hueso, entre otros, para cubrir sus necesidades diarias. Al saber que el barro, al ser sometido a altas temperaturas, se vitrifica y se obtienen propiedades como dureza, la evolución del uso de este material fue evidente, desde utensilios domésticos hasta elementos de uso en la construcción.

1.5.1. En la construcción

Este material ha tenido relevante influencia en la construcción debido a su versatilidad en elementos constructivos y las propiedades que este desarrolla. Desde tiempos remotos, en ciudades antiguas se ha visto este material utilizado para la construcción de edificaciones, inicialmente como adobe, sin embargo hoy en día, con las tecnologías y las altas exigencias de calidad, se obtienen elementos de barro mucho más confiables y aprovechables para el uso de la construcción. La versatilidad de este material en la construcción va desde elementos netamente estructurales hasta elementos ornamentales.

En el campo de la construcción, las aplicaciones del barro se encuentran en elementos como ladrillos, tejas, tubos, alfarería ornamental, baldosas, azulejos y otros.

En la actualidad las arcillas comerciales, usadas en los elementos anteriormente descritos, llamadas también arcillas para la construcción, figuran entre los recursos minerales más importantes por sus altos volúmenes de explotación y producción.

1.5.2. En el manejo de residuos

En Latinoamérica la gestión de los desechos generados en el sector de la construcción tiene poco control en la mayoría de países. Aun cuando existen leyes, reglamentos e instituciones que regulan la gestión de los desechos sólidos, los responsables de la procedencia de estos desechos no demuestran un interés especial en este asunto.

Sin embargo, en países vecinos como México, Colombia y Brasil existen proyectos o programas de instituciones estatales o privadas que llevan a cabo el reciclaje de este tipo de material. Los residuos constituyen un porcentaje significativo de los desechos totales del país, pero como no son directamente nocivos a la salud, su disposición final no tiene un enfoque prioritario. En Guatemala los desechos de las construcciones son manejados en forma conjunta, es decir, no existe un sistema de clasificación, por lo que es limitada la reutilización o el reciclaje de cualquier tipo de residuo.

1.5.3. En el aprovechamiento de residuos

Pocas iniciativas se han desarrollado para utilizar un material calificado como desecho en el ámbito constructivo. Sin embargo, existen proyectos como este trabajo de investigación, y otros más, que tienen el fin de determinar los resultados que pueden obtenerse utilizando este material como adición en

concretos o morteros, y así emplearlo como alternativas económicas en pro del desarrollo de la construcción y el manejo de residuos.

1.6. Desechos de barro cocido

Debido a las grandes cantidades de material que se considera desperdicio o desecho en los procesos de fabricación de unidades de barro cocido, es necesario reivindicar las propiedades de este material y orientarlo a iniciativas viables en el sector de la construcción, para lograr mitigar el desaprovechamiento de este al considerarlo como desecho.

1.6.1. Definición

Se entiende como desecho de barro cocido al material que al final del proceso de producción no ha sido seleccionado como aprobado en la inspección de calidad, por incumplir con las especificaciones que este debe alcanzar.

1.6.2. Cantidades en peso que se genera

Actualmente existen empresas de producción industrial de productos de barro cocido, que manejan un porcentaje entre uno al tres por ciento de material no calificado (desecho), siendo este porcentaje un estimado que supera las noventa toneladas métricas de desperdicios, en temporadas bajas de producción, según los estándares de volúmenes de producción mensual de estas compañías.

1.6.3. Obtención

Es un problema para estas empresas lidiar con este índice de pérdidas, por lo que actualmente venden el material a terceros a un precio muy bajo, incluso sin costo alguno si las unidades se han fracturado o han sido dañadas en su totalidad, lo que resulta entonces es obtener este material directamente en las plantas de producción de forma sencilla, únicamente será necesario cargar con costos de transporte.

1.6.4. Propiedades

Los residuos de ladrillo de barro cocido tienen un alto contenido de materiales refractarios (40 % de alúmina y 30 % de sílice, como mínimo). Su punto de fusión es alto y, debido al efecto de cocción en el barro, el material adquiere una serie de propiedades mecánicas como dureza, resistencia a soportar cargas, resistencia a altas temperaturas, refracción del calor, resistencia a la corrosión química y física, entre otras.

1.6.5. Aplicaciones

Una de las aplicaciones más comunes utilizando el material de barro cocido destinado como desecho, triturado y llevado a tamaños de partículas específicas, es la elaboración de concretos refractarios por las excelentes propiedades de soportar altas temperaturas para este tipo de material o la creación de elementos que aíslen el calor. Sin embargo, un estudio reciente demostró que la utilización de residuos de barro cocido como agregados en mezclas asfálticas puede ser útil en lugares donde la carga aplicada sea reducida, como caminamientos o banquetas, pero no es factible en carreteras

destinadas a tránsito vehicular, a menos que se establezcan procedimientos efectivos y económicos en la impermeabilización previa de este material.

1.6.6. Utilización actual del desecho

Actualmente muchas empresas dedicadas a la producción de elementos de barro cocido no pueden reutilizar su producto terminado como materia prima, luego de no cumplir con los estándares de calidad y ser reusado en la producción, debido a los cambios que este ha sufrido durante su proceso de cocción, por lo que se convierte en un desecho o residuo.

Esta cantidad de material producido por las industrias tiene poco o nulo provecho para las empresas, debido a su incapacidad de reutilizarlo en el proceso de crear nuevos productos.

1.6.7. Lugar de descarga de los desechos actuales

En la actualidad la alternativa más utilizada para la eliminación de estos residuos de construcción y/o demolición es el vertido o, en algunos casos, en la construcción de muros de contención. Es importante considerar que estos desechos ocupan un gran volumen dentro de los vertederos municipales, lo cual reduce el tiempo de vida útil de los mismos, generando a su vez un gran problema, debido a la falta de lugares de depósito apropiados. Por otra parte, frecuentemente son empleados por parte de particulares para realizar rellenos, sin considerar los daños ocasionados desde el punto de vista ecológico.

1.7. Proceso de residuos

Generalmente, para considerar el reúso de un material, es necesario que este disponga de las características necesarias para que cumpla la función por la cual se está reusando. En este caso especial, es necesario obtener una granulometría adecuada del material para utilizarse en mezclas de mortero de cemento y cal. Estas características se obtienen por trituración y/o pulverización.

1.7.1. Pulverización

Es el procedimiento mediante el cual un cuerpo sólido se convierte en pequeñas partículas de polvo, por medio del uso de equipo y maquinaria específica.

1.7.1.1. Mecanismos

Entre los mecanismos de pulverización se encuentran aquellos que reducen de manera drástica los sólidos, siendo mecanismos por compresión o cascanueces y tipo de martillo. Para materiales blandos o anteriormente triturados hasta un tamaño adecuado, están los mecanismos de desgarramiento y roce o desgaste.

También existe la pulverización en húmedo. La ultrasonificación constituye una técnica eficaz para la molienda en húmedo y la pulverización de partículas. Además de los procesos de dispersión y desaglomeración, la molienda húmeda es una aplicación importante de los dispositivos ultrasónicos Hielscher. Este tipo de molienda es particularmente adecuada para procesar a tamaño micro y manométrico materiales como cerámica, trihidróxido de alúmina, sulfato de bario, carbonato de calcio y óxidos metálicos.

1.7.1.2. Selección del dispositivo pulverizador

Esta selección dependerá de algunos factores como el tamaño de partícula al que quiere llevarse el material (reducción), el grado de dureza que caracteriza al material, el tipo de mecanismo que realizará el trabajo, y si la modalidad de pulverización será en húmedo o en seco. Sin embargo, se seleccionará el dispositivo adecuado una vez se conozcan las propiedades actuales del material a pulverizar y las condiciones finales que se esperan obtener.

1.7.2. Trituración

Es un proceso diseñado para disminuir el tamaño de los objetos mediante el uso de la fuerza, para romper y reducir el objeto en una serie de piezas de volumen más pequeñas o compactas.

Para la fabricación del cemento, las materias primas deben ser divididas en partículas pequeñas, mediante trituración y luego por molienda.

En general las materias primas provenientes de canteras tienen tamaños significativamente grandes, por lo que es necesario reducir el tamaño de las mismas mediante trituración y poder continuar con el proceso. Para esto se emplean diferentes tipos de trituradoras.

1.7.2.1. Máquinas para trituración y molienda

Existen diferentes tipos de trituradoras; sin embargo, existen solamente dos principios básicos sobre los cuales el proceso de trituración opera, conocidos como choque y compresión.

1.7.2.1.1. Trituradoras de aplicación de presión

Son dispositivos diseñados para reducir el tamaño de objetos mediante el uso de la fuerza, generando presión en las mismas para romper y fragmentar el objeto en una serie de piezas más pequeñas o compactas. Estas se emplean especialmente en la construcción o minería, para romper rocas y reducir su tamaño.

- Trituradora tipo cono: en este tipo de trituradora el movimiento del cono permite que piezas de roca caigan libremente por gravedad y luego son atrapadas en la parte baja cuando el cono vuelve a su posición original.

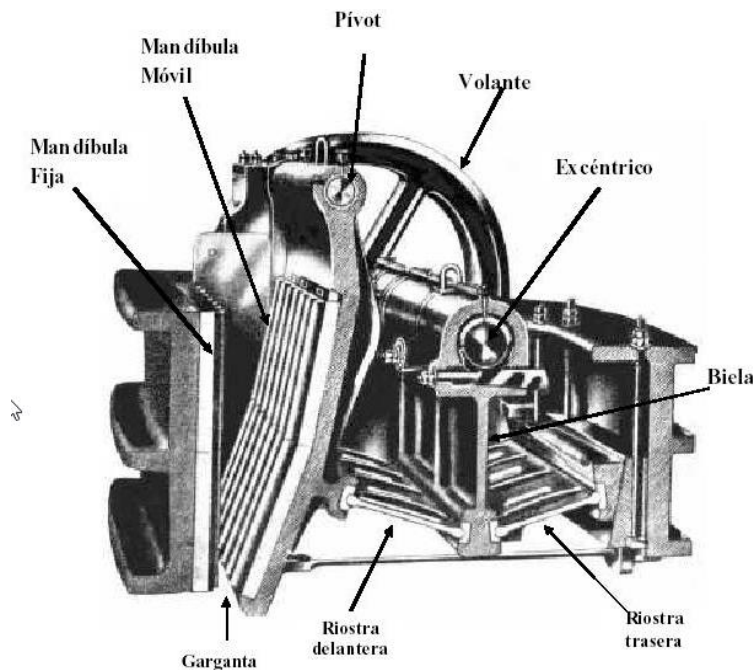
Figura 1. Trituradora tipo cono



Fuente: BlogsPot. *Trituradora tipo cono*. <http://apuntes-ing-mecanica.blogspot.com/2014/01/trituradoras-quijadas-i.html>. Consulta: 17 de febrero de 2019.

- Trituradora de mandíbulas: consisten de una parte fija y una quijada móvil, encerradas en una cajuela que crea la cámara de trituración. La sección transversal entre la parte fija y la parte móvil de la quijada se reduce a medida que se acerca al final de la descarga de la cámara de trituración. El método de reducción de tamaño en una trituradora de quijada es por compresión. Estas pueden ser de dos o de una quijada.

Figura 2. Trituradora tipo mandíbula

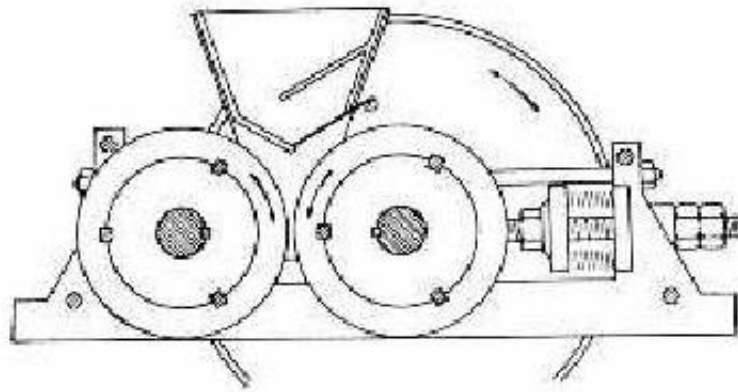


Fuente: BlogsPot. *Trituradora tipo mandíbula*. <http://apuntes-ing-mecanica.blogspot.com/2014/01/trituradoras-quijadas-i.html>. Consulta: 17 de febrero de 2019.

- Trituradora tipo rodillo: consiste en dos soportes pesados de uno o dos rodillos. Cada rodillo es manejado por un sistema de tracción en forma de V. Cada rodillo cuenta con dientes de diferentes tamaños o número, dependiendo de la aplicación del rodillo.

- Un rodillo usado para la trituración primaria requiere dientes de mayor tamaño y más espaciados, en tanto que un rodillo usado para la trituración secundaria requiere de dientes de menor tamaño y más cercanos.

Figura 3. **Trituradora tipo rodillo**



Fuente: BlogsPot. *Trituradora tipo rodillo*. <http://apuntes-ing-mecanica.blogspot.com/2014/01/trituradoras-quijadas-i.html>. Consulta: 17 de febrero de 2019.

1.7.2.1.2. Trituradoras por choque

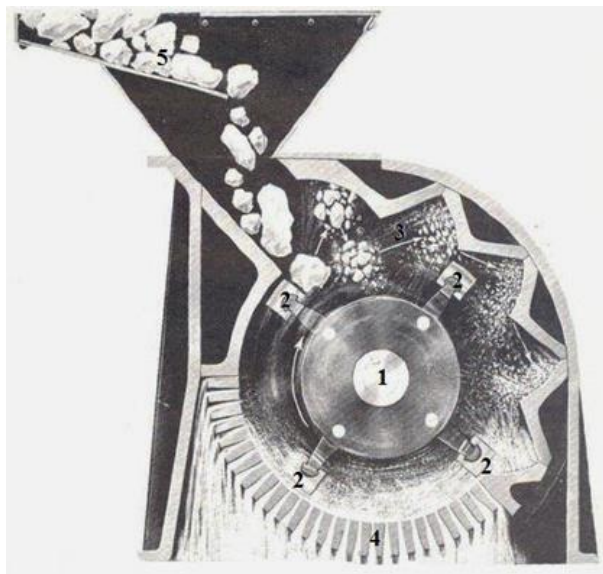
Estas aprovechan la energía de un golpe o impacto para romper el material y reducirlo a piezas más pequeñas. Generalmente este tipo de trituradoras proporcionan mejores curvas graduadas en relación a las de presión, así como un buen factor de forma.

- Trituradora por impacto o de martillos: en este sistema se tiene un eje central que tiene varios martillos, los cuales giran a altas revoluciones.

Las rocas entrantes en la trituradora son golpeadas por los martillos en contra de la estructura de corazas.

- Esta acción puede repetirse varias veces en el paso del material. Un grupo de barras de acero ubicadas en la parte baja de la sección de martillos llevan a cabo la selección entre el material de tamaño adecuado.

Figura 4. **Trituradora por impacto**



Fuente: BlogsPot. *Trituradora por impacto*. <http://apuntes-ing-mecanica.blogspot.com/201/04/trituradoras-de-impacto-i.html>. Consulta: 17 de febrero de 2019.

1.7.2.2. Costos de trituración

Los costos para obtener el material en cuestión para su utilización en la construcción varían dependiendo del tamaño de granulometría que se dispone reducir y el equipo o maquinaria que se ocupe de realizar la tarea. Para fines de

esta investigación, se determinó realizar la tarea manualmente, bajo criterios de rendimiento horas/hombre.

El promedio para obtener 15 kilogramos de material se estableció en un día laboral de 8 horas para un ayudante de albañil, realizando las actividades de triturar, pulverizar y tamizar el material, obteniendo un valor promedio de cinco quetzales por cada kilo de polvo de barro cocido tamizado, con lo que se recomienda utilizar volúmenes grandes de material para ser pulverizado con equipo mecanizado y reducir costos.

1.7.2.3. Ventajas de trituración

La trituración permite que diferentes tipos de materiales puedan volver a ser nuevamente aprovechados, reduciendo posibles volúmenes de desperdicio y/o riesgos de contaminación. Es comúnmente usada en el área de construcción, para proveer agregados de buena calidad utilizados en mezclas de concreto o asfalto, ya que el tamaño final de los agregados puede ser ajustado bajo estándares específicos y ser obtenidos por trituración y molienda, debido a la versatilidad de los equipos que generalmente se utilizan.

1.7.3. Etapas de trituración

Dentro del proceso de trituración (reducción de tamaño de los gruesos), puede haber 2 ó 3 etapas diferentes, esto depende del material que se desea triturar y el tamaño con que se recibe de la cantera. Las etapas son primaria, secundaria y terciaria, cada una recibe una reducción típica.

- Primaria n = 5 veces
- Secundaria n = 8 veces

- Terciaria $n = 6$ veces

Como regla general se puede decir que, si el material a ser triturado es abrasivo, requerirá de dos etapas para su trituración. Únicamente trituradoras que pueden alcanzar un grado de reducción de 50 o más veces en una simple operación son aquellas que funcionan bajo el principio de impacto para lograr la reducción de tamaño necesario.

Los factores que deben considerarse para la selección de trituración primaria, secundaria o terciaria son:

- Características del material.
- Capacidad promedio requerida.
- Tamaño del producto o apertura de descarga de la trituradora.
- Método de explotación y equipo de excavación (determina el tamaño máximo esperado).

No existe un proceso estándar de trituración, la selección del proceso ideal debe estar basada en cada caso particular, considerando la calidad del material y las características del sitio de extracción. Hay una gran variedad de máquinas para reducir el tamaño de partículas gruesas, las cuales pueden o no variar en sus principios de operación.

2. PROPIEDADES DE LOS MORTEROS

2.1. Tipos de mortero según Norma ASTM C 1329

Las especificaciones de esta norma cubren tres tipos de mortero de cemento para uso donde se requiere mortero de albañilería. Las mezclas de mortero se clasifican en tipo N, S o M.

2.2. Especificaciones según Norma NTG 41050 (ASTM C 270-10)

Esta especificación cubre los morteros de pega para uso en la construcción de estructuras de unidades de mampostería no reforzada y reforzada, en que se basa el presente trabajo de investigación.

Se cubren cuatro tipos de morteros de pega en cada una de las dos especificaciones incluidas: especificaciones por proporciones y por propiedades.

Tabla II. **Requisitos para la especificación por proporciones**

Mortero	Tipo	Proporciones por volumen (Materiales comandantes)							Proporciones de agregado (medio en condiciones húmedo suelto)	
		Cemento Hidráulico	Cemento para mortero de pega			Cemento de Mampostería				Cal hidratada o de cal pasta
			M	S	N	M	S	N		
Cemento – cal	M	1	---	---	---	---	---	---	Más $\frac{1}{4}$	
	S	1	---	---	---	---	---	---	Más $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{2}$	

Continuación de la tabla II.

	N	1	---	---	---	---	---	---	Más 1/2 a 1 1/4	
	O	1	---	---	---	---	---	---	Más 1 1/4 a 2 1/2	
Cemento para mortero de pega	M	1	---	---	1	---	---	---	---	No menos que 2 y no más que 3 veces la suma de los volúmenes separados de materiales cementantes
	M	---	1	---	---	---	---	---	---	
	S	1/2	---	---	1	---	---	---	---	
	S	---	---	1	---	---	---	---	---	
	N	---	---	---	1	---	---	---	---	
	O	---	---	---	1	---	---	---	---	
Cemento de mampostería	M	1	---	---	---	---	1	---	---	
	M	---	---	---	---	1	---	---	---	
	S	1/2	---	---	---	---	---	1	---	
	S	---	---	---	---	---	1	---	---	
	N	---	---	---	---	---	---	1	---	
	O	---	---	---	---	---	---	1	---	

Fuente: elaboración propia, según Norma NTG - 41050.

Tabla III. **Requisitos para la especificación por propiedades**

Mortero	Tipo	Resistencia a la compresión promedio mínima MPa (lb/pulg ²)	Retención de agua mínima %	Contenido de aire máximo % B	Proporción de agregado (medido en condiciones húmedo suelto)
Cemento - cal	M	17,2 (2500)	75	12	No menos que 2 1/4 y no más que 3 1/2 veces de los volúmenes separados de materiales cementantes
	S	12,4 (1800)	75	12	
	N	5,2 (750)	75	14 ^c	
	O	2,4 (350)	75	14 ^c	
Cemento para mortero de pega	M	17,2 (2500)	75	12	
	S	12,4 (1800)	75	12	
	N	5,2 (750)	75	14 ^c	
	O	2,4 (350)	75	14 ^c	

Continuación de la tabla III.

Cemento de mampostería	M	17,2 (2500)	75	18	
	S	12,4 (1800)	75	18	
	N	5,2 (750)	75	20 ^D	
	O	2,4 (350)	75	20 ^D	
<p>^A Únicamente para mortero preparado en laboratorio ^B Véase la nota 5 de la norma ^C Cuando el refuerzo estructural está embebido en un mortero cemento - cal, o en un mortero de cemento para mortero de pega, el máximo contenido de aire debe ser 12 % ^D Cuando el estructural está embebido en un mortero de cemento de mampostería, el máximo contenido de aire debe ser 18 %</p>					

Fuente: elaboración propia.

2.3. Propiedades en estado plástico

En esta etapa el mortero es plástico y trabajable, lo que permite su colocación en obra. Superada esta fase, el mortero se endurecerá hasta consolidarse, por ello es preciso diferenciar diversas propiedades y exigencias en función del estado en que se encuentre el mortero; el flujo y velocidad de endurecimiento resaltan como los más importantes en esta fase.

2.3.1. Trabajabilidad

Es una propiedad de los morteros en estado fresco, referida a la facilidad de manipulación de una mezcla, es decir manejar la mezcla sin producir segregación, el tiempo en que la mezcla es trabajable sin que fragüe o seque, facilidad al momento de su colocación y la capacidad para retener agua aún en contacto con superficies absorbentes.

Es una combinación de varias propiedades, incluyendo plasticidad, consistencia, cohesión y adherencia, las cuales pueden ser medidas bajo pruebas de laboratorio. Es también determinada por la graduación de los agregados, su proporción y el contenido de aire. El ajuste final de la trabajabilidad dependerá del contenido de agua.

2.3.2. Retención de agua

Es la medida de la habilidad de un mortero, bajo condiciones de succión y evaporación, a retener el agua mezclada en la mezcla. Según la Norma NTG 41096 (ASTM C 91-05), la retención de agua se define como la razón o cambio de fluidez de un mortero, luego de ser sometido a una presión de succión constante de 254 milímetros de mercurio, durante un período de sesenta segundos.

En términos prácticos se refiere a la capacidad del mortero de mantener su plasticidad cuando queda en contacto con la superficie sobre la que va a ser colocado. Utilizar cal en la mezcla puede mejorar la retención de agua, o aumentar el contenido de finos en la arena, o emplear aditivos plastificantes o incorporadores de aire.

Esta propiedad influye directamente en la velocidad de endurecimiento y en la resistencia final, debido a que, si un mortero no retiene el agua necesaria, no permitirá la hidratación del cemento.

2.3.3. Contenido de aire

Es la capacidad del mortero de generar burbujas de aire dentro de la mezcla durante el mezclado.

2.3.4. Velocidad de endurecimiento

Se denomina velocidad de endurecimiento o tiempo de fraguado al período de tiempo que existe entre el fraguado inicial, donde la mezcla de cemento pierde su plasticidad, hasta el fraguado final, donde la consistencia de la mezcla ha alcanzado un valor muy apreciable en el desarrollo de su resistencia.

El fraguado inicial y final se determinan arbitrariamente por el ensayo de resistencia a la penetración. Generalmente los tiempos de fraguado final e inicial de un mortero están entre 2 y 24 horas, y dependen de la composición de la mezcla y de condiciones ambientales.

2.4. Propiedades en estado endurecido

Son aquellas que se presentan luego del proceso de hidratación, pasando de un estado plástico a uno rígido. Después de que la mezcla ha fraguado, esta gana resistencia y se endurece. Las propiedades más relevantes del mortero endurecido son resistencia y durabilidad.

2.4.1. Adherencia

Se refiere a la propiedad específica que define el grado de contacto entre el mortero y otra superficie, comúnmente en piezas de mampostería.

2.4.2. Resistencia a compresión

Es la resistencia que presentará la mezcla endurecida una vez que se haya llevado por completo la fase de fraguado, esta resistencia dependerá del buen manejo y la calidad de los materiales utilizados en la mezcla.

“La resistencia a la compresión del mortero es algunas veces usada como el criterio principal para seleccionar el tipo de mortero, ya que es relativamente fácil de medir y comúnmente se relaciona con otras propiedades como la resistencia a la tensión y la absorción del mortero.”¹

2.4.3. Resistencia a tensión

La poca capacidad del concreto o mortero a la tensión le ayuda a disminuir los agrietamientos que se pueden producir por la influencia de tensiones inducidas por restricciones estructurales, cambios volumétricos u otros fenómenos, generalmente el valor de la capacidad a la tensión se encuentra alrededor del 9% de la capacidad a compresión en concretos de peso y resistencia normal.

2.4.4. Permeabilidad

Depende de la porosidad de la mezcla y de los agregados, y se atribuye a la capacidad de ser atravesado por un fluido (agua, aire, vapor de agua) a causa de una diferencia de presión entre las dos superficies opuestas del material.

¹ Norma Técnica Guatemalteca NTG - 41050. *Mortero de pega para unidades de mampostería*. Especificaciones. p. 21.

2.5. Materiales

Previo a realizar mezclas de mortero, es de vital importancia conocer la calidad de los componentes que lo constituyen, por lo que un adecuado control de los agregados, componentes aglutinantes como cemento o cal, agua y aditivos, tendrán un rol determinante en la calidad y desarrollo del mortero.

2.5.1. Cal

La piedra caliza (CaCO_3), que contiene cantidades variables de carbonato de magnesio (MgCO_3) de hasta 30% aproximadamente, es la materia prima para la producción de cal. Con frecuencia se encuentran presentes el dióxido de silicio, la alúmina y el óxido de hierro, en pequeñas cantidades.

El término cal designa toda forma física en la que se presenta el óxido de calcio. Se obtiene como resultado de la calcinación de las rocas calizas o dolomitas.

2.5.1.1. Tipos de cal

A partir de la caliza se pueden obtener tres productos principales: cal viva, hidratada e hidráulica.

2.5.1.1.1. Cal viva

Se obtiene por medio de la descomposición térmica de la caliza (bajo condiciones controladas de temperatura), desprendiéndose dióxido de carbono y produciéndose los óxidos de calcio y magnesio.

2.5.1.1.2. Cal hidratada

Se obtiene por medio del proceso de apagado de la cal. Tratando la cal viva con suficiente agua para satisfacer la afinidad química por el agua en la condición de hidratación se obtiene un polvo seco llamado cal hidratada.

La mayor parte de la cal se consume en la forma apagada (hidratada), como ingrediente de mortero o yeso. La mayor parte del mortero que se utiliza actualmente es de cal y cemento, y consiste en 1 parte de cemento por 1 o 2 de cal y una variedad de proporciones en arena, con suficiente agua para darle una plasticidad adecuada.

2.5.1.1.3. Cal hidráulica

Es producido al calcinar una caliza que contiene grandes cantidades de sílice y aluminio, suficientes para que el material fragüe y se endurezca debajo del agua.

2.5.2. Cemento

Tiene propiedades adhesivas y cohesivas, que le dan la capacidad de aglutinar los agregados o áridos para conformar el concreto. Sus propiedades dependen de la composición química, grado de hidratación, finura, tiempos de fraguado, calor de hidratación y la resistencia mecánica que desarrolla.

2.5.2.1. Cemento puzolánico

Son cementos con adición de puzolanas, sean naturales o artificiales, las cuales molidas a temperaturas ordinarias y en presencia de agua reaccionan

químicamente con el hidróxido de calcio, dando lugar a compuestos que tienen propiedades hidráulicas y aglomerantes.

A diferencia del cemento Portland, el tiempo del fraguado de los cementos puzolánicos es más lento, pero con la ventaja que la cal liberada en la hidratación del Clinker provoca con la edad un incremento en la resistencia mecánica y química, superando en ambas al cemento Portland.

2.5.2.2. Cemento Portland

El cemento Portland es característico de un tipo de cemento hidráulico de silicatos calcinados de calcio. Los cementos son materiales hidráulicos, significa que dependen de la reacción con agua en vez de aire para desarrollar su dureza, esta reacción química producida al agregar agua se conoce como hidratación.

El inglés José Aspdin, en 1824, calcinó una mezcla de cal apagada y arcilla, y obtuvo un producto hidráulico sin cal en libertad al que llamó cemento Portland, porque una vez endurecido se parece en color y dureza a la piedra de construcción de Portland.

2.5.3. Polvo de barro cocido

Se conoce como el material obtenido luego de un proceso de trituración y molienda, con el fin de reducir el tamaño de partículas, que se le da a piezas de material arcilloso sometido a altas temperaturas para su cocción.

2.5.3.1. Características del barro

El barro o arcilla tiene las propiedades que la han hecho muy útil para el uso del ser humano desde la antigüedad. Una de sus características más importante es su plasticidad. Se produce cuando se agrega una cantidad determinada de agua, con la que se hace moldeable para adquirir cualquier forma. Otra característica es que al evaporarse el agua en el proceso de secado, la pieza se encoge. Puede resistir altas temperaturas sin mostrar cambios. Puede presentar variedad de coloración después de la cocción debido a la presencia del óxido de hierro y carbonato de calcio.

2.5.3.2. Ventajas por cocción

La cocción del barro a elevadas temperaturas provoca la vitrificación en los tres materiales que componen la mezcla en los ladrillos de barro: cal, óxido de hierro y arena. El efecto de la cocción en la arcilla produce en los elementos una mayor dureza y resistencia.

El proceso de cocción produce una calcinación en la arcilla, modificando así sus propiedades, por lo que usar este material como adición en una mezcla de cemento Portland o cemento adicionado, debido a sus características puzolánicas, contribuirá a mejorar las propiedades de los concretos o morteros endurecidos.

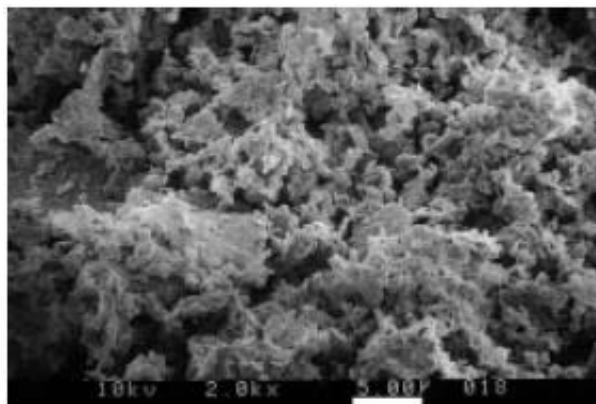
La puzolana es un material silícico aluminoso que, al estar en la forma de polvo y en presencia del agua, reacciona con el hidróxido de calcio liberado por la hidratación del cemento Portland, para formar silicato de calcio hidratado y otros compuestos cementantes. Las puzolanas también se clasifican como materiales cementantes suplementarios o como aditivos minerales. Las arcillas

calcinadas (puzolanas naturales) pueden ser utilizadas como sustitutas parciales al cemento, regularmente oscilan entre 15 % y 35 % y también ayudan a resistir ataques por sulfato, controlan la reactividad álcali-agregado y reducen la permeabilidad.

Debido a que las puzolanas cambian significativamente las propiedades en estado endurecido de las mezclas con cemento Portland y cemento adicionado, también tienen un efecto en las características de concretos o morteros en estado fresco, afectando en algunos casos la trabajabilidad y contenido de aire.

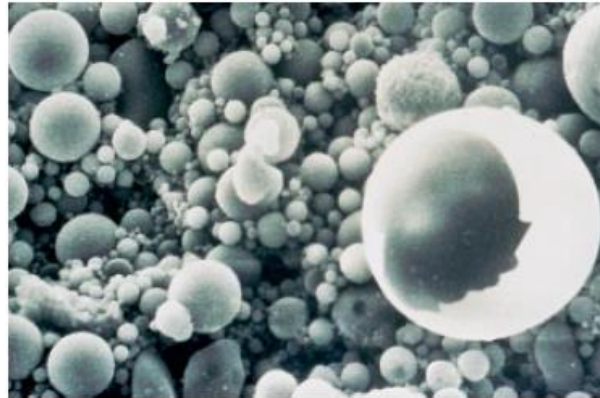
A continuación se presenta una comparación entre las partículas de dos puzolanas diferentes, arcilla calcinada y ceniza volante, respectivamente, por medio del microscopio electrónico de barrido (SEM).

Figura 5. **Micrografía de partículas de arcilla calcinada con aumento de 2000X**



Fuente: KOSMATKA, Steven; et al. *Diseño y control de mezclas de concreto*. p. 82.

Figura 6. **Micrografía de partículas de ceniza volante con aumento de 1000X**



Fuente: KOSMATKA, Steven; et al. *Diseño y control de mezclas de concreto*. p. 78.

Según su procedencia, las puzolanas se clasifican de la siguiente manera:

Tabla IV. **Clasificación de puzolanas**

Descripción	Clasificación
Puzolanas naturales crudas o calcinadas, tal como las diatomitas; tobas y cenizas volcánicas, calcinadas o sin calcinar, y materiales que requieren calcinación para inducir propiedades satisfactorias.	N
Ceniza volante que se produce por la calcinación de carbón antracítico o bituminoso. Esta clase de cenizas volantes poseen propiedades puzolánicas.	F

Continuación de la tabla IV.

Ceniza volante que se produce por la calcinación de carbón sub-bituminoso o lignito. Esta clase de ceniza volante, además de tener propiedades puzolánicas, también tiene propiedades cementantes.	C
--	---

Fuente: elaboración propia.

3. DISEÑO PRÁCTICO DE MORTERO Y ENSAYOS

3.1. Equipo utilizado

De la misma manera en que las normas rigen los procedimientos para realizar adecuadamente los ensayos, así también las normas y especificaciones técnicas rigen los equipos que deben ser utilizados, para garantizar la veracidad de los resultados obtenidos.

3.2. Realización de las muestras

Las mezclas experimentales, mezcla patrón, con la que se comparan, y los ensayos de laboratorio se realizaron en la Sección de Agregados, Concretos y Morteros del Centro de Investigaciones de Ingeniería, bajo los lineamientos indicados en las normas citadas. Los ensayos de control de calidad se dividen en ensayos al mortero fresco y endurecido, los que se discutirán más adelante.

3.2.1. Mezcla tradicional

Se toma como base, según las tablas II y III, la elaboración de una mezcla de mortero de cemento y cal que cumpla con las características de resistencias, según las clasificaciones N y S, sobre las cuales se irán modificando únicamente la cantidad de polvo de barro cocido para las mezclas trabajadas como adición y las cantidades de cemento, sustituyéndolas con el polvo de barro cocido, para las mezclas trabajadas en sustitución.

3.2.2. Mezcla de prueba

Las mezclas de prueba o experimentales se formularon con base en la dosificación de una mezcla patrón, en la que se va añadiendo polvo de barro cocido o sustituyendo la cantidad de cemento en peso con el material arcilloso, para posteriormente determinar el porcentaje de variación en resistencias y comparar estos datos obtenidos con los resultados del mortero de referencia (mezcla patrón).

3.2.2.1. Dosificación del mortero patrón de comparación

La dosificación del mortero patrón ha sido determinada en relación al peso del cemento, siendo la proporción de una parte de cemento media parte de cal y dos punto cinco partes de agregado fino en la mezcla.

Todas las mezclas experimentales, que contienen polvo de barro cocido en distintos porcentajes según el peso del cemento, serán comparadas y analizadas con esta referencia. Las mezclas que se realizaron como adición se presentan con la nomenclatura MEA seguida por la cantidad de porcentaje de peso respecto al cemento, y las que se realizaron como sustitución tiene la nomenclatura MES seguida por la cantidad de porcentaje de peso respecto al cemento que está siendo sustituido. La mezcla patrón, a la que son comparadas estas mezclas experimentales o de prueba, se presenta con la nomenclatura MEP.

Tabla V. **Dosificación de materiales para ensayo de flujo, por 300 g de muestra de cemento**

Diseño de mezcla	Cemento		Polvo de barro cocido		Cal		Agregado fino		Agua	
	Prop (%)	Peso (grs)	Prop (%)	Peso (grs)	Prop (%)	Peso (grs)	Prop (%)	Peso (grs)	Prop (%)	Peso (grs)
MEP	100	300	0	0	50	150	250	750	73	220
MEA - 5	100	300	5	15	50	150	250	750	80	239
MEA - 10	100	300	10	30	50	150	250	750	80	240
MEA - 15	100	300	15	45	50	150	250	750	82	245
MEA - 20	100	300	20	60	50	150	250	750	83	250
MES - 5	95	285	5	15	50	150	250	750	76	217
MES - 10	90	270	10	30	50	150	250	750	83	225
MES - 15	85	255	15	45	50	150	250	750	88	225
MES - 20	80	240	20	60	50	150	250	750	92	220

Fuente: elaboración propia.

3.2.2.2. Dosificación de las muestras experimentales

Las muestras experimentales han sido determinadas por adición de polvo de barro cocido a las mezclas y por sustitución del cemento con polvo de barro cocido, todas respecto al peso del cemento a intervalos de 5 %. Se inicia la primer mezcla experimental como adición al 5 % y sucesivamente hasta llegar a una al 20 %, mismo método utilizado para las mezclas realizadas como sustitución. La dosificación de los otros elementos que conforman la mezcla será exactamente la misma, con excepción de la cantidad de agua a lo largo de

cada mezcla experimental, la cual se determina por mantener un flujo entre 105 % a 115 %.

3.2.2.3. Selección del tamaño de partícula del barro cocido

Debido a que el proceso de trituración y molienda fue de manera manual, no utilizando maquinaria especializada, resulta casi imposible obtener un material con los parámetros establecidos en la Norma ASTM C618-08a, indicando que debe contener como máximo un 34 % de material retenido en el tamiz núm. 325, por lo que, para fines prácticos y mayor aprovechamiento del material triturado por molienda manual, se ha considerado ese mismo parámetro, pero sustituyendo el tamiz núm. 325 por un tamiz núm. 200.

3.2.3. Materiales utilizados en las mezclas

Previo a realizar una mezcla de mortero debe considerarse la calidad que tienen los componentes que constituyen la misma, por tanto, es necesario un adecuado control del cemento, agregados, aditivos, agua y las condiciones de amasado correctas que determinan la calidad del mortero. También mediante pruebas de laboratorio se debe conocer sus propiedades mecánicas, características físicas y químicas. Esto es de vital importancia para realizar una dosificación balanceada de los componentes y obtener un resultado eficiente y económicamente viable al uso que se le destinará al diseño de mortero.

A continuación se presentan las características físicas y químicas de los materiales en cuestión:

Figura 7. **Homogenización y mezclado de los morteros**



Fuente: elaboración propia.

3.2.3.1. **Polvo de barro cocido**

Posterior a la obtención de las unidades de ladrillo de barro cocido, estas muestras fueron transportadas a las instalaciones del Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII / USAC) para su almacenamiento y proceso de pulverización no mecanizada, previo a los estudios requeridos por las normas para el cumplimiento de la aplicación en mezclas de mortero de cemento y cal.

Figura 8. **Material pulverizado para mezclas experimentales**



Fuente: elaboración propia.

Una porción del producto pulverizado fue apartado y trasladado al Centro de Investigación y Desarrollo (I+D/CETEC) para realizar un análisis químico mediante el ensayo de Fluorescencia de Rayos X, esto para determinar la composición química y mineralógica del material.

Esta caracterización tiene por objetivo clasificar el polvo de barro cocido y determinar si cumple con los requisitos y especificadores básicos que exige la norma.

Tabla VI. **Análisis químico de la muestra mediante fluorescencia de rayos X**

Muestra de barro cocido		Clasificación de puzolanas por su origen
Elementos	(%)	
Al ₂ O ₃	25,70	A la sumatoria de estos tres elementos, 70 % Mínimo
SiO ₂	54,81	
Fe ₂ O ₃	8,80	
Sumatoria:	89,31	
SO ₃	0,00	4 % Máximo
P ₂ O ₅	0,00	3 % Máximo
LOI (950 °C)	3,39	10 % Máximo
CaO	1,94	Sin especificar (S/E)
Cr ₂ O ₃	0,07	
K ₂ O	1,09	
MgO	0,00	
MnO	0,21	
Na ₂ O	2,19	
TiO ₂	0,99	
Total	100,00	

Fuente: elaboración propia.

El grupo de silicio (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3) debe representar al menos al 70 % de la muestra estudiada, el contenido de trióxido de azufre (SO_3) como máximo debe representar el 4 % de la muestra, la humedad menor al 3 % y la pérdida por ignición no mayor al 10 %. La clasificación de puzolanas N describe a la muestra de barro cocido con propiedades puzolánicas, a diferencia de la clasificación C, la cual las describe no solo con propiedades puzolánicas sino también con propiedades cementantes.

- Según la clasificación de puzolanas, por su origen en la Norma ASTM C 618-08a y expresadas en la tabla V, el polvo de barro cocido se ubica en la clasificación N, ya que es una puzolana natural calcinada.

Además, con base en los resultados del análisis de laboratorio para determinar su composición química, se ubica en esta clasificación por cumplir con los requisitos químicos expresados en la tabla V.

3.2.3.2. Agregado fino

Para morteros de albañilería, el agregado fino debe ser arena natural o manufacturada, libre de cantidades perjudiciales de impurezas orgánicas. Las arenas manufacturadas son obtenidas en el proceso de triturar piedra, grava o escoria de alto horno enfriada y procesada para asegurar una adecuada granulometría.

Para que este agregado pueda ser utilizado en morteros de albañilería, debe ser granulado dentro de los siguientes límites, dependiendo si son arenas naturales o trituradas.

Figura 9. **Agregado fino**



Fuente: ALVAREZ GUILLÉN, Julio César. *Azúcar como aditivo retardante y modificador de resistencia para mezclas de concreto*. p. 54.

Tabla VII. **Requisitos granulométricos para morteros de albañilería**

Tamaño de Tamiz	Porcentaje que pasa (%)	
	Arena Natural	Arena Manufacturada
4,75 mm (No. 4)	100	100
2,36 mm (No. 8)	95 a 100	95 a 100
1,18 mm (No. 16)	70 a 100	70 a 100
600 μm (No. 30)	40 a 75	40 a 75
300 μm (No. 50)	10 a 35	20 a 40
150 μm (No. 100)	2 a 15	10 a 25
75 μm (No. 200)	0 a 5	0 a 10

Fuente: elaboración propia.

Cuando un agregado no cumple con los límites granulométricos en la tabla II, y que el contenido retenido entre dos tamices consecutivos cualesquiera no sobrepase el 50 % ni más del 25 % entre los tamices núm. 50 y núm. 100, se permite su utilización siempre que el mortero pueda cumplir con los requisitos de relación de agregado, retención de agua, contenido de aire y la resistencia a la compresión de las especificaciones descritas en Norma NTG 41050 (ASTM C270).

El agregado a emplearse en las mezclas proviene de una planta de procesamiento y distribución ubicada en el Municipio de Palín, Escuintla. Es producto manufacturado por la trituración de rocas ígneas, también llamadas rocas magmáticas, las cuales se ubican en el grupo de rocas basálticas. Las propiedades físicas del agregado se muestran a continuación.

Tabla VIII. **Características físicas del agregado fino utilizado**

Peso específico	2,67
Peso unitario compactado (Kg/m ³)	1 800,00
Peso unitario suelto (Kg/m ³)	1 670,00
Porcentaje de vacíos (%)	31,00
Porcentaje de absorción (%)	0,70
Contenido de materia orgánica	1
Pasa tamiz No, 200 (%)	4,80
Retenido Tamiz 6,35 (%)	0,00
Módulo de finura	2,72

Fuente: ALVAREZ GUILLÉN, Julio César. *Azúcar como aditivo retardante y modificador de resistencia para mezclas de concreto*. p. 51.

- La Norma NTG 41031 (ASTM C 104-04) para agregado fino, especifica que el porcentaje que debe pasar por el tamiz núm. 200 no puede ser mayor al 10 % para una arena manufacturada.

En la prueba que se realizó el porcentaje es de 4,80 %, por el cual sí cumple con las especificaciones de la norma.

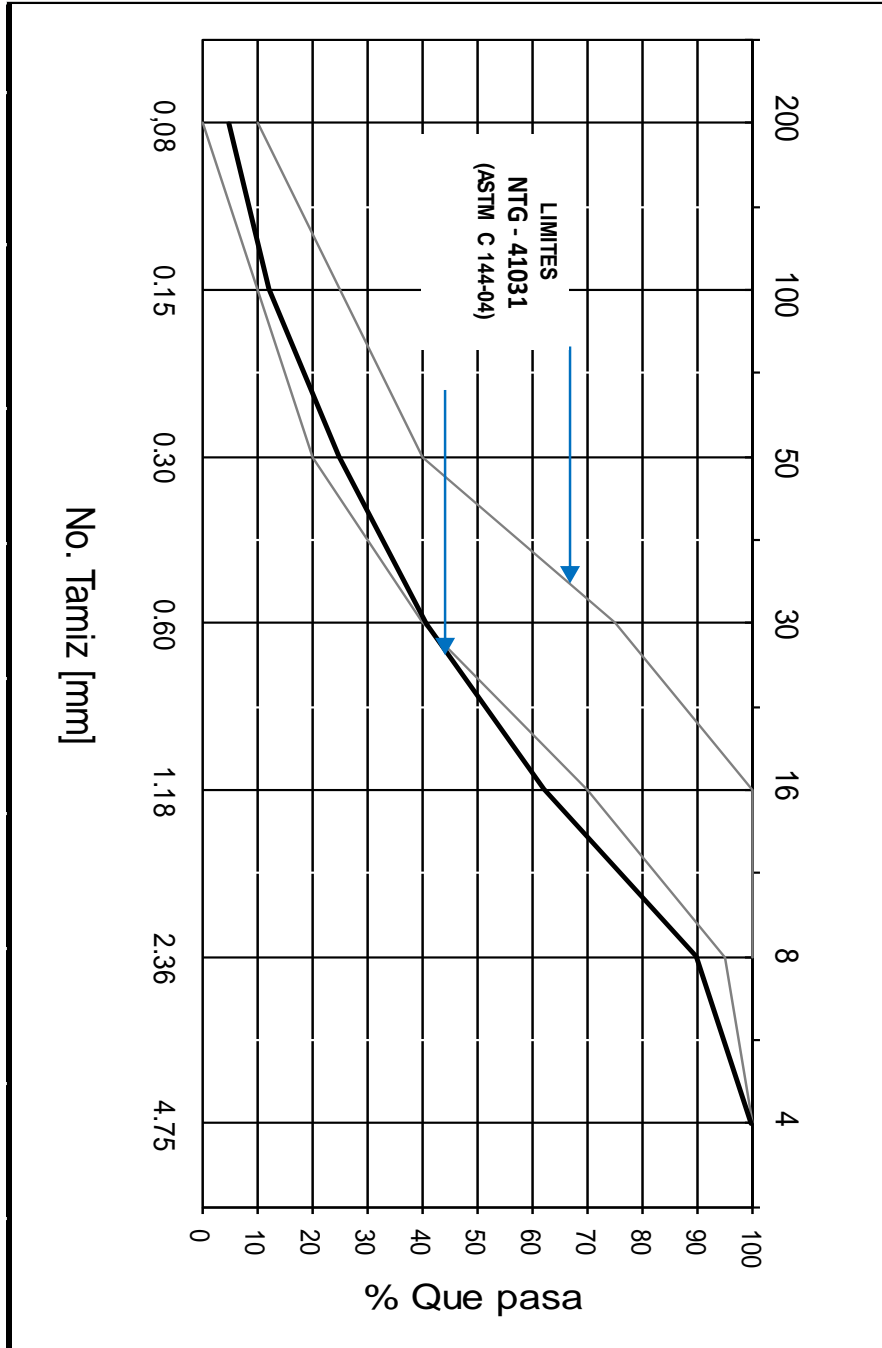
- Con relación al resultado del análisis de contenido de materia orgánica, la Norma NTG 41010 h-4 (ASTM C-40) establece que el máximo permisible es núm. 3, por lo que el resultado de núm. 1 define al agregado como un material libre de cantidades perjudiciales de impurezas orgánicas.
- El módulo de finura es de 2,72, por lo que, según la Norma NTG 41007 h-1 (ASTM C-33), se encuentra dentro de los límites, siendo estos de 2,30 a 3,10, cumpliendo como un agregado normal.

Tabla IX. **Porcentaje que pasa para el agregado fino utilizado**

Tamiz No.	4,75	2,36	1,18	0,60	0,30	0,15	0,08
% Que pasa	100,00	88,00	62,00	41,00	25,00	12,00	4,80

Fuente: ALVAREZ GUILLÉN, Julio César. *Azúcar como aditivo retardante y modificador de resistencia para mezclas de concreto*. p. 54.

Figura 10. Granulometría del agregado fino

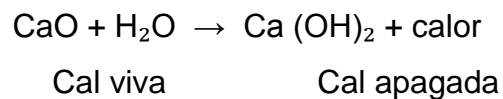


Fuente: elaboración propia.

- En la gráfica granulométrica de la figura 10, evidentemente se muestra el incumplimiento del agregado fino según los límites granulométricos presentados en la tabla VII. Sin embargo, el mortero cumple con requisitos de relación de agregado, retención de agua, contenido de aire, y la resistencia a la compresión, por lo que se considera válido el agregado.

3.2.3.3. Cal hidratada

Al hidratarse la cal, mezclándola con una cantidad apropiada de agua, se produce una reacción que se conoce como apagamiento:



El apagamiento va acompañado por una producción considerable de calor y un aumento de volumen, cuando se efectúa de acuerdo con los controles apropiados de fabricación, el producto apagado es un polvo fino y blanco que se cierne para eliminar los granos, produciendo así la cal hidratada.

Este tipo de cal, según la Norma NTG 41018 (ASTM C207), permite su uso, si se demuestra por su ensayo o por su registro de desempeño que no es perjudicial para la sanidad o estabilidad del mortero.

3.2.3.4. Cemento puzolánico

El cemento utilizado es de uso general con adición de puzolana, Portland tipo I (PM), con resistencia especificada a los 28 días de 4060 libras por pulgada cuadrada (psi), según Norma NTG 41095.

Tabla X. **Composición química del cemento**

Elementos presentes en el cemento portland	Forma de expresar el contenido	Contenido en % de óxidos
Si (Silicio)	SiO ₂	17,0 - 25,0
Ca (Calcio)	CaO	60,0 - 67,0
S (Azufre)	SO ₃	1,0 - 3,0
Fe (Hierro)	Fe ₂ O ₃	0,5 - 6,0
Al (aluminio)	Al ₂ O ₃	3,0 - 8,0
Na, K (Sodio, Potasio)	Na ₂ O y K ₂ O	8,8 - 1,0
Mg (Magnesio)	MgO	0 - 0,5

Fuente: NEVILLE, Adams; BROOKS, J.J. *Tecnología del concreto*. p. 19.

El aluminato tricálcico (C₃A) es uno de los cuatro componentes principales del cemento y en presencia del agua reacciona drásticamente con el yeso durante el proceso de hidratación, formando trisulfoaluminato cálcico (etrignita). Su función es regular, el fraguado acelerado del aluminato tricálcico y su temperatura de hidratación.

La velocidad de hidratación del concreto no es únicamente afectada por la composición química de este, sino también por su granulometría (finura de molienda), cantidad de agua en la mezcla y las temperaturas de los agregados que lo componen.

Dentro de las partículas de aluminato tricálcico se deposita el trisulfoaluminato cálcico, disminuyendo así la velocidad de reacción o fraguado. Al adicionar puzolana en el cemento, se genera una disminución del aluminato tricálcico, provocando que el cemento adquiera más resistencia ante ataques por sulfatos.

3.2.3.5. Agua para el mezclado

Las características del agua para las mezclas cumplen con las especificaciones para mezclas de mortero y concreto, estas especificaciones indican que puede utilizarse agua potable para consumo humano con un pH entre 6,0 y 9,2, sin partículas en suspensión, incolora y sin sabor; las impurezas en exceso pueden afectar el tiempo de fraguado y su resistencia.

La cantidad de agua en las mezclas se determinó al establecer la trabajabilidad deseada de acuerdo al ensayo de mesa de flujo.

3.3. Ensayos en estado plástico

El mortero debe mezclarse totalmente hasta obtener una homogeneidad en su apariencia, con todos sus componentes distribuidos correctamente. Debe tener una consistencia plástica y fluida para que pueda ser de fácil colocación en el sitio u obra donde se espera utilizar.

Es importante que el lugar en que se tome una porción de muestra de mortero tenga las mismas características que si se compara con otra porción, esto refleja un adecuado mezclado, ya que estas porciones deben ser realmente representativas en los ensayos de control.

Es correcto que todos los utensilios que serán utilizados para realizar las mezclas estén ligeramente húmedos, esto para una adecuada manipulación. Los ensayos en mezclas frescas se realizaron según los procedimientos y especificaciones descritas en las normas COGUANOR y ASTM, los cuales se describen a continuación.

3.3.1. Trabajabilidad según Norma NTG 41003 h13 (ASTM C1437-07)

La trabajabilidad se ha determinado por medio del ensayo de mesa de flujo, encontrando el agua hasta que la mezcla produzca un flujo que esté dentro de los parámetros que presenta la norma.

Se debe considerar que para realizar este ensayo es necesario que la temperatura y humedad relativa del aire en el cuarto de mezclado estén en los rangos de $23,0 \pm 4,0$ °C y de no menos de 50 %, respectivamente, como se especifica en la Norma NTG 41059 (ASTM C511).

Figura 11. **Ensayo de flujo**



Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Determinación del flujo**



Fuente: elaboración propia.

3.3.2. Retención de agua ASTM C1506

Una vez determinado el flujo de la muestra en estudio, el mortero se somete a una succión de vacío controlada durante 60 segundos, después de este tiempo se vuelve a realizar el ensayo de flujo de la misma manera descrita en el apartado 3.3.1.

La retención de agua es el flujo final dividido por el flujo inicial, expresado como un porcentaje. Para el caso de los morteros de pega, las normas exigen una retención mínima de agua del 75 % basada en un flujo inicial de 105 % a 115 %.

Figura 13. **Determinación de la retención de agua**



Fuente: elaboración propia.

3.3.3. **Contenido de aire NTG 41003 h3 (ASTM C 185-08)**

Se prepara un mortero con las proporciones establecidas de los elementos constituyentes, usando una cantidad de agua suficiente para obtener el flujo requerido. Se compacta el mortero en una medida de volumen conocido y se determina su masa.

Luego se calcula el contenido de aire a partir de la densidad medida del mortero, de las densidades conocidas de los constituyentes y de las proporciones de la mezcla del mortero. El equipo utilizado y el procedimiento de ensayo se describen en la Norma NTG-41003 h3.

Tabla XI. **Contenido de aire en mezclas de mortero de cemento y cal realizadas**

Tipo de mezcla	Flujo	Contenido de aire (% Vol.)
MEP	109	2,9
MES - 5	104	2,9
MES - 10	110	3,0
MES - 15	110	3,0
MES - 20	103	3,1

Fuente: elaboración propia.

3.3.4. Velocidad de endurecimiento según Norma NTG 41003 h10 (ASTM C191-08)

A la mezcla de mortero se le debe dar rápidamente una forma esférica con las manos, usando guantes de material no absorbente, lanzando la mezcla de una mano a la otra por seis veces a una distancia aproximada de 150 mm. Luego de esto, se toma el molde cónico truncado en una mano y con la otra se presiona la pasta moldeada hasta llenar el molde completamente por su base mayor, removiendo el exceso con la mano.

El molde se coloca por su base mayor sobre la placa no absorbente plana, y el exceso de pasta que aparezca sobre la base menor se retira con la llana pasándola oblicuamente, de manera que forme un pequeño ángulo respecto al borde superior del molde. De ser necesario, la parte superior del espécimen se debe alisar con una o dos pasadas del borde de la llana. Inmediatamente después de terminado el moldeo, se coloca el espécimen en el gabinete húmedo y se deja allí, sacándolo únicamente para las determinaciones del tiempo de fraguado.

El espécimen usado para determinar el tiempo de fraguado debe mantenerse dentro del gabinete húmedo durante 30 min después del moldeo. Se determina la penetración de la aguja de Vicat de 1mm en este instante y luego debe repetirse cada 15 min, hasta que se obtenga una penetración de 25 mm.

Se registra el tiempo de fraguado Vicat inicial, siendo el tiempo transcurrido entre el contacto inicial del cemento con el agua y el tiempo en que se obtienen 25 mm de penetración. Luego se registra el tiempo de fraguado Vicat final, siendo el tiempo transcurrido entre el contacto inicial del cemento con el agua y el tiempo en que la aguja de Vicat ya no deja una impresión circular completa en la superficie de la pasta de mortero.

El equipo utilizado en este ensayo es descrito en el método A (aparato de Vicat manual), de la Norma NTG-41003 h10.

Figura 14. **Determinación del tiempo de fraguado o velocidad de endurecimiento**



Fuente: elaboración propia.

3.4. Ensayo en estado endurecido

Para garantizar que las partículas de cemento dentro de la mezcla se hidraten adecuadamente y reaccionen en su totalidad, no es únicamente trabajo de la dosificación del agua dentro de la mezcla, sino también de un proceso de curado adecuado. Con esto se obtienen las propiedades mecánicas, como la resistencia a la tensión y adherencia.

Los ensayos al mortero endurecido proveen con exactitud el comportamiento que este tendrá ante los requerimientos de una obra, permitiendo verificar si el proporcionamiento de la mezcla de mortero es satisfactorio al cumplir con las resistencias esperadas.

3.4.1. Realización de ensayos a compresión según Norma NTG 41003 h4 (ASTM C109/C109M-11b)

Al hablar de la resistencia de los morteros, comúnmente se refiere a la resistencia a la compresión de un mortero endurecido. Esta etapa comienza con el fraguado final del mortero, de manera rápida los primeros días, y continúa de forma lenta al transcurrir el tiempo; dependiendo de las condiciones de curado y del tipo de mezcla realizada.

Generalmente se dice que la resistencia de los morteros se alcanza a los 28 días, sin embargo, esta evaluación puede realizarse a diferentes intervalos de tiempo según sea conveniente para monitorear la ganancia de resistencia, e incluso verificarla pasados 90 días, para determinar si ha perdido resistencia por posibles ataques de sulfatos, por las diferentes reacciones químicas en el proceso del fraguado.

Para los morteros que contienen polvo de barro cocido, el proceso puede verse demorado en el tiempo, en cuanto a alcanzar altas resistencias iniciales. Sin embargo, este retraso se compensa por la ganancia de resistencia de manera progresiva, hasta superar incluso mezclas de morteros tradicionales.

El ensayo consiste en aplicar una carga de compresión axial a cubos de 50 mm de mortero endurecido. Una máquina de compresión, cuya velocidad sea constante, aplica la carga hasta que ocurre la falla.

Se registra la máxima carga indicada por la máquina de ensayo y se calcula la resistencia a compresión como sigue:

$$f_m = P/A$$

Donde:

- F_m = resistencia a la compresión en MPa, o lb/plg²
- P = carga total máxima en N, (lb)
- A = área de la superficie cargada en mm² (plg²)

Las edades de ensayo a compresión para morteros con flujo constante, utilizando cementos adicionados, son 3, 7 y 28 días. Se ensayaron tres cubos de 50 mm por edad y se reporta la resistencia del promedio entre ellos.

Figura 15. **Ensayo de compresión a cubos de mortero de 50 mm**



Fuente: elaboración propia.

Los procedimientos de llenado de cubos, curado según la mezcla utilizada, almacenamiento y realización del ensayo a compresión en cubos de morteros, fueron realizados según las especificaciones de la Norma NTG 41003 h4.

3.4.2. Realización de ensayos a tensión según Norma INV E - 327

El ensayo consiste en aplicar una carga de tensión axial a briquetas de mortero endurecido. Una máquina de tensión, cuya velocidad sea constante, aplica la carga hasta que ocurre la falla.

Se registra la máxima carga indicada por la máquina de ensayo y se calcula la resistencia a tensión como sigue:

$$R_t = P/A$$

Donde:

- R_t = resistencia a la tensión en MPa, o lb/plg²
- P = carga total máxima en N, (lb)
- A = área de la superficie cargada en mm² (plg²)

Las edades de ensayo a tensión para morteros con flujo constante son 3, 7 y 28 días. Se ensayaron dos briquetas por edad y se reporta la resistencia del promedio entre ellos.

Figura 16. **Ensayo a tensión en briquetas de mortero**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 16 se muestra una briqueta colocada en la máquina, previa a realizar el ensayo de tensión.

3.4.3. Realización de ensayos por adherencia en juntas de mampostería

El ensayo se realizó en una probeta de tres piezas según la Norma Mexicana NMX-C-082-1974 (determinación del esfuerzo de adherencia de los ladrillos cerámicos y el mortero de las juntas), evaluando la resistencia ante un esfuerzo cortante directo cuando se genera la falla en las juntas. La adherencia se ve afectada por el esfuerzo normal a la junta horizontal, es decir por la carga vertical, generando un mecanismo resistente tipo Coulomb, con una resistencia por adherencia (cuando el esfuerzo normal es nulo) más una resistencia por fricción. La norma guatemalteca NGO 41024 h3 hace referencia al mismo tipo de ensayo para adherencia que la norma mexicana sobre ladrillos de barro cocido.

Aunque esta propiedad mecánica no es utilizada para el diseño de la mampostería, la adherencia es un parámetro importante para evaluar la calidad de la mampostería. Otros reglamentos suponen la falla del material por deslizamiento de las juntas horizontales, esto implica que la carga lateral resistente es función de la adherencia en la zona de contacto.

Para realizar un ensayo confiable es necesario alinear las superficies de apoyo y de carga que garanticen una base perpendicular a las cargas aplicadas. La norma propone las ecuaciones que evalúan el área de aplicación de la carga y el esfuerzo de adherencia, respectivamente.

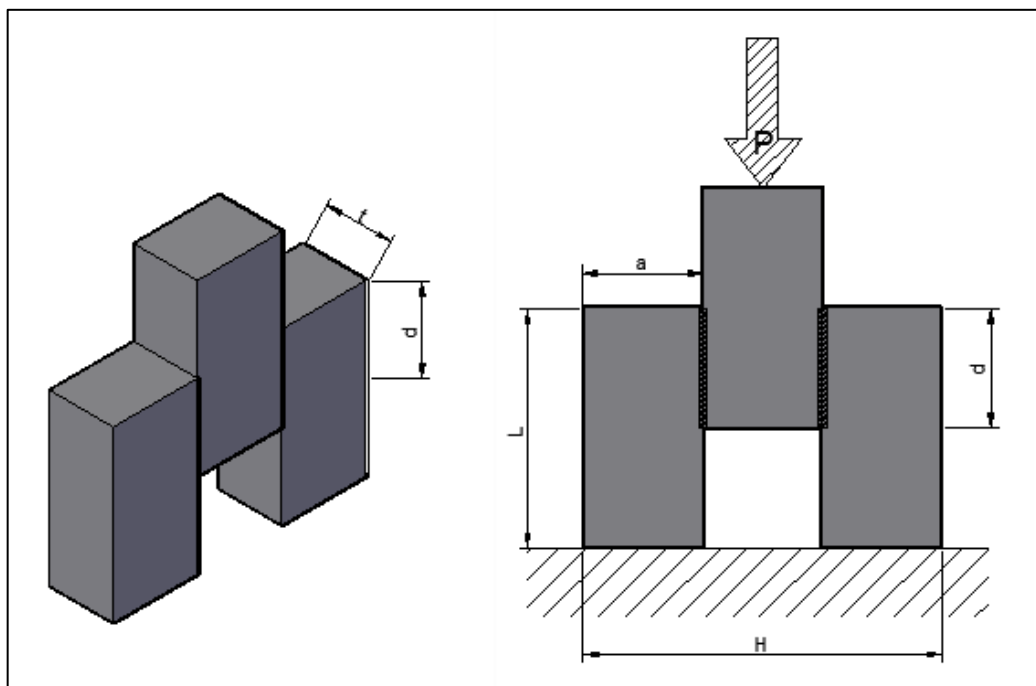
$$S = 2dt$$

$$\tau_a = \frac{P}{S}$$

Donde:

- d = dimensión del área de contacto entre pieza
- t = ancho de las piezas
- S = área de aplicación de carga
- P = carga actuante máxima
- τ_a = esfuerzo de adherencia

Figura 17. **Modelo de prismas de bloques de concreto y ladrillos cerámicos para el ensayo de adherencia en juntas**



Fuente: elaboración propia.

La figura 17 muestra la modulación de cómo cada prisma fue ensayado, tanto para bloques de concreto como para ladrillos de barro cocido, y los parámetros que se utilizan para calcular el esfuerzo de adherencia en las juntas.

Cada prisma fue cuidadosamente elaborado para que los rostros, superior e inferior, que están en contacto con las superficies de carga, estuviesen nivelados, esto con el fin de evitar excentricidades al momento de aplicar la carga y generar sesgo en los resultados.

Figura 18. **Ensayo de adherencia en bloques de concreto**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 18 se aprecia que la falla se produce por corte en los bloques de concreto, siendo la resistencia por adherencia del mortero en las juntas mayor a la resistencia por corte en los bloques de hormigón que conforman el prisma.

Se considera una adecuada adherencia por la superficie porosa de los bloques de concreto, debido a que los 6 prismas ensayados presentaron el mismo tipo de falla. Sin embargo, los resultados generan ambigüedad sobre la resistencia real de la adherencia de los morteros, debido al propio sesgo de resistencia en los bloques que conforman el ensayo.

Figura 19. **Ensayo de adherencia en ladrillos de barro cocido**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 19 se observa el prisma luego de finalizado el ensayo, demostrando una falla de adherencia por deslizamiento en las juntas, debido a la poca porosidad del ladrillo de barro cocido y su superficie regular, dificultando la adherencia de la mezcla en el espécimen de mampostería, ya que los 6 prismas ensayados presentan fallas por deslizamiento en la junta.

3.5. Comparación de resultados entre ambas dosificaciones

La investigación pretende aportar información acerca del comportamiento del polvo de barro cocido en un mortero de cemento y cal, con la finalidad de determinar si al sustituirlo por el cemento en mismas proporciones, o adicionarlo, es capaz de mantener o incrementar sus características mecánicas. Es por ello que se trabajaron proporciones de adición y sustitución del cemento, de 0 % al 20 %, en intervalos de 5 unidades.

3.5.1. Peso de las muestras

Debido a que la única variable es la cantidad de polvo de barro cocido presente en las mezclas, lo cual a la vez depende del peso del cemento, bien siendo adición en la mezcla o sustitución del cemento, los demás elementos permanecen constantes, siendo las cantidades de cal y agregado fino dentro de la mezcla. La cantidad de agua en las mezclas no es constante, ya que depende del flujo, entre un rango de 105 % a 115 %.

Tabla XII. **Cantidad de materiales para elaboración de cubos y briquetas [g]**

MEZCLAS	Cantidad de materiales para elaboración de cubos y briquetas [g]				
	Cemento	Polvo de barro	Cal Hidratada	Arena	Agua
MEP (Adición)	810	0	405	2025	648
MEP (Sustitución)	900	0	450	2250	657
MEA - 5	810	40,5	405	2025	645
MEA - 10	810	81	405	2025	648
MEA - 15	810	121,5	405	2025	661
MEA - 20	810	162	405	2025	765
MES - 5	855	45	450	2250	649,8
MES - 10	810	90	450	2250	672,3
MES - 15	765	135	450	2250	673,2
MES - 20	720	180	450	2250	662,4

Fuente: elaboración propia.

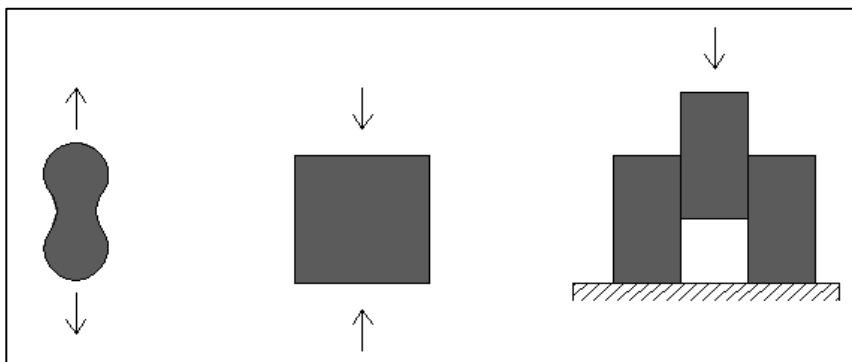
Se observa cómo las cantidades de cemento disminuyen en la misma proporción que incrementan las cantidades de polvo de barro cocido en las mezclas por sustitución, dejando estáticas las cantidades de cal y arena dentro de las mezclas experimentales, mientras que en adición todos los elementos permanecen constantes excepto las cantidades de polvo de barro cocido.

3.5.2. Carga aplicada a las muestras

Para determinar las características mecánicas de los morteros de prueba se realizaron ensayos a tensión, compresión y adherencia, como se muestra en la figura 20. Con el ensayo a adherencia se sometió el prisma a compresión, según sus caras de contacto, sin embargo los esfuerzos se transmiten a las juntas, las que presentan fallas por deslizamiento, si la falla se da en la junta.

Se sometieron a carga 3 especímenes por edad, para todas las mezclas realizadas. Únicamente en los prismas destinados para adherencia se realizaron un promedio de 3 cargas a la edad de 28 días, considerándose como la edad en donde el mortero alcanza su resistencia de diseño.

Figura 20. **Diagramas de aplicación de carga**



Fuente: elaboración propia.

3.5.3. Resistencia a compresión

Esta propiedad es la más relevante para calificar y clasificar el diseño de mezcla que arroje mejores resultados, incluso comparando resultados entre ambos tipos de mezclas experimentales, adición y sustitución, por lo que los datos obtenidos de los ensayos se muestran y analizan en el siguiente capítulo, con el fin de comparar los resultados entre la dosificación estándar y la dosificación de investigación, la cual proporcione las características físicas y mecánicas que se ajusten a las de la dosificación estándar, es decir, a la mezcla patrón.

4. RESULTADOS

4.1. Datos obtenidos en ensayos a morteros

La presente investigación se enfoca en determinar las características relevantes en las mezclas experimentales como la resistencia a la compresión y adherencia, en estado endurecido; y el flujo, la trabajabilidad, tiempo de fraguado, en estado fresco. Estas características se presentan más adelante.

- Ensayo a mortero en estado fresco

Los resultados de los ensayos al mortero en estado fresco se muestran en la tabla XIV, donde se identifican las nueve mezclas realizadas y el punto de comparación, denominado mezcla patrón, a partir del cual se hicieron las diferentes sustituciones de cemento por el polvo de barro cocido o la adición de este.

- Ensayo a mortero en estado endurecido

Una vez que el proceso de hidratación y fraguado han tomado lugar y la red cristalina que conforma la mezcla se estabiliza, el mortero inicia a ganar resistencia. Usualmente se consideran 28 días posteriores a su elaboración como el tiempo en que el mortero alcanzará su resistencia de diseño, considerando también un continuo incremento muy bajo a lo largo del tiempo.

Las puzolanas, como la arcilla calcinada, aportan un incremento en la resistencia del mortero; sin embargo, utilizar cantidades de este material en

exceso provocará una reducción notable en la resistencia del mortero por la reducción del hidróxido de calcio liberado durante la hidratación Ca(OH)_2 , también llamada portlandita.

4.2. Tabulación de resultados

Los materiales usados en la elaboración de las mezclas de mortero (cemento, cal, agregado fino, polvo de barro cocido y agua), para la presente investigación, cumplen con los requisitos y parámetros de las normas establecidas, por lo que la calidad de estos es aceptable para el desarrollo práctico.

- Polvo de barro cocido (Norma ASTM C 618 – 08^a)

Se realizó un análisis químico mediante fluorescencia por rayos X, el cual determina los siguientes resultados:

Tabla XIII. **Análisis químico del polvo de barro cocido utilizado en sustitución del cemento dentro de las mezclas**

COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)		
Al_2O_3	Óxido de aluminio (III)	25,7
CaO	Óxido de calcio (II)	1,94
Cr_2O_3	Óxido de cromo (III)	0,07
Fe_2O_3	Óxido de hierro (III)	8,80
K_2O_3	Óxido de potasio (I)	1,09
MgO	Óxido de magnesio (II)	0,00
MnO	Óxido de manganeso (II)	0,21
Na_2O_3	Óxido de sodio (I)	2,19
P_2O_5	Óxido de fósforo (V)	0,00
SO_3	Óxido de azufre (VI)	0,00

Continuación de la tabla XIII.

SiO ₂	Óxido de silicio (IV)	54,81
TiO ₂	Óxido de titanio (IV)	0,99
LOI (950° C)	Perdida por ignición	3,39

Fuente: elaboración propia.

El polvo de barro utilizado en las mezclas cumple con los requisitos que presenta la Norma ASTM C 618 -08a, según los resultados mostrados anteriormente en la tabla V.

Tabla XIV. **Ensayos en mortero fresco**

Identificación de la muestra	Flujo (%) ASTM C-230	Retención de agua (%) ASTM C-1506	Velocidad de endurecimiento ASTM C-191-08		Contenido de aire (%) ASTM C-185-08
			Inicial (min) Método A	Final (min) Método A	
MEP	105	81,90	108	170	2,9
MEA - 5	109	88,07	190	240	--
MEA - 10	113	80,50	204	250	--
MEA - 15	108	81,50	159	240	--
MEA - 20	107	83,20	126	200	--
MES - 5	105	84,80	102	190	2,9
MES - 10	110	80,90	130	250	3
MES - 15	108	88,90	165	260	3
MES - 20	108	84,30	130	220	3,1

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de los ensayos de mortero fresco mostraron cambios notables entre la mezcla de control MEP, llamada patrón, y las distintas mezclas

con variaciones en cuanto a la sustitución de cemento por polvo de barro o la adición.

Para tener conocimiento de la influencia que este material presentó dentro del mortero de cemento y cal, como adición a las mezclas de mortero o sustituto en porcentajes del cemento, se tiene lo siguiente:

- En los parámetros de la norma se especifica un flujo de 110 % \pm 5 %, por lo tanto es permisible un flujo de 105 a 115 %. La mezcla control dio un resultado de 105, y los flujos aumentaron para las mezclas con adición y sustitución.
- De acuerdo a lo indicado en las Normas ASTM C 1506 y ASTM C 270-10, el valor de la retención de agua de un mortero no debe ser inferior al 75 % y el contenido de aire no debe exceder de un 12 %, respectivamente. Esto indica un cumplimiento a los criterios que las normas especifican, manteniéndose dentro de los parámetros pero con un relativo incremento respecto a la mezcla patrón.

Todas las mezclas se realizaron bajo los mismos procedimientos y con los mismos ensayos de aceptación de mortero fresco. En cada una el cemento se homogenizó con el polvo de barro previo a ser agregado a la mezcladora.

Tabla XV. **Variación de flujos por muestra**

Identificación de la muestra	Flujo (%) ASTM C-230	Variación del flujo respecto a la mezcla patrón	
		Relación directa	% Variación
MEP	105	0	-
MEA - 5	109	4	3,7

Continuación de la tabla XV.

MEA - 10	113	8	7,10
MEA - 15	108	3	2,80
MEA - 20	107	2	1,90
MES - 5	105	0	-
MES - 10	110	5	4,50
MES - 15	108	3	2,80
MES - 20	108	3	2,80

Fuente: elaboración propia.

El flujo puede variar respecto a la mezcla patrón, aumentando hasta en un 7,1 % su valor de la mezcla en adición al 10 % y en un 4,5 % de la mezcla en sustitución al 10 %, según haya sido su confinamiento durante el proceso de apisonado, o al efecto de disminuir la cantidad de cemento en la mezcla y sustituirla con un material menos reactivo. Sin embargo, no perjudica su trabajabilidad, más bien la mejora por un aumento del tamaño de partícula del material sustituto o adicionado, y vuelve su consistencia más plástica de acuerdo a la morfología de ser una arcilla calcinada (ver figura 5).

- Contenido de aire

El uso del polvo de barro en el mortero aumenta el contenido de aire, debido a que por su tamaño, porosidad y forma irregular de la partícula, permite más espacios vacíos dentro de la mezcla, dando lugar al incremento del contenido de aire y disminuyendo la densidad del mortero endurecido.

- Velocidad de endurecimiento o tiempo de fraguado

“El grado de retardo depende de factores como la cantidad de cemento Portland, la demanda de agua, el tipo, la reactividad y la dosis de escoria o

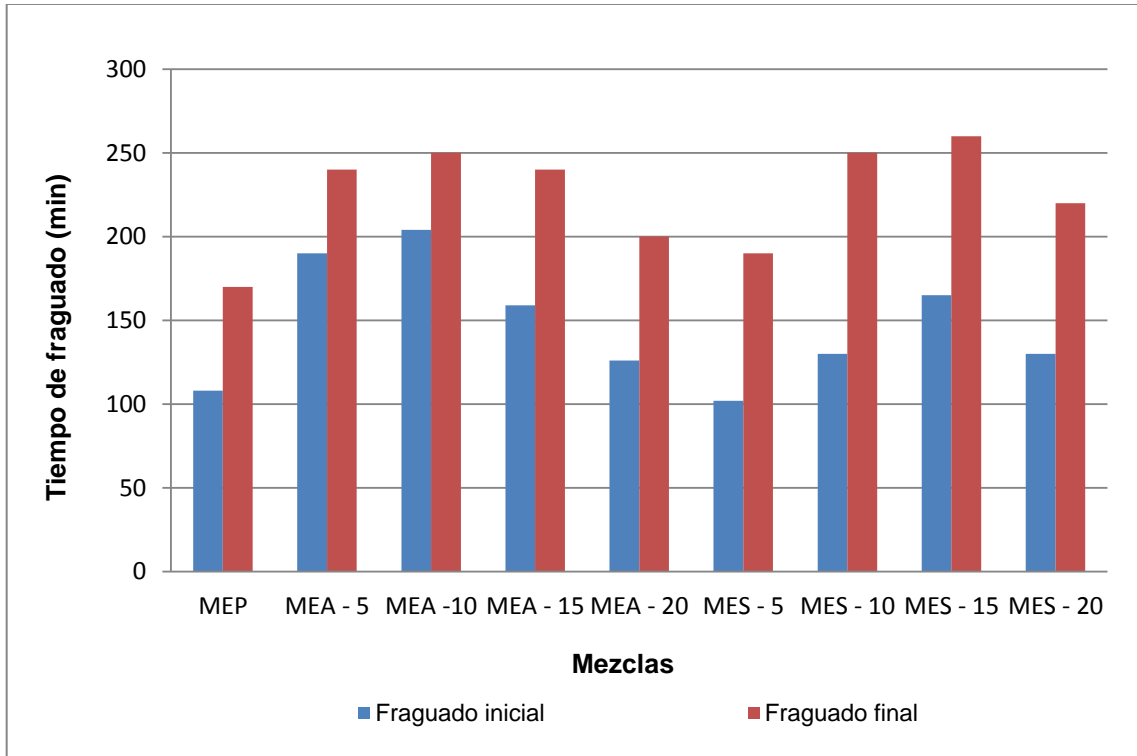
puzolana y la temperatura del cemento”². La presencia de arcilla calcinada, como puzolana natural, provoca un retardo en el tiempo de fraguado. Este tiempo será variable dependiendo de la cantidad de arcilla que se utilice (ver tabla XIV).

4.3. Presentación de resultados

A continuación se muestran los resultados de las mezclas de mortero de cemento y cal con adición o sustitución con el material arcilloso, siendo resultados de resistencias a compresión, tensión y adherencia, mostrando sus comportamientos para compararlos entre sí y determinar qué tipo de mezcla es la más favorable.

² Norma Técnica Guatemalteca NTG - 41050. *Mortero de pega para unidades de mampostería*. Especificaciones. p. 21.

Figura 21. **Gráfica de velocidad de endurecimiento o tiempo de fraguado**



Fuente: elaboración propia.


En la figura 21 se observa cómo los tiempos de fraguado finales de las mezclas en sustitución aumentan significativamente respecto al fraguado de la mezcla patrón, pero los tiempos de fraguados iniciales, a pesar que son relativamente más altos que la mezcla patrón, son más cercanos a este que las mezclas trabajadas como adición. Este escenario presenta una reacción en cadena en donde los aluminatos dominan la reacción, provocando un mayor calor de hidratación y reduciendo los tiempos de fraguado comparados con las otras mezclas.

4.3.1. Resistencia a la compresión

Para determinar los efectos del polvo de barro cocido en las mezclas de mortero de cemento y cal, se realizaron ensayos a compresión de cubos de 5 centímetros, a edades de 3, 7 y 28 días.

Tabla XVI. Resistencia a compresión

Identificación de la mezcla	Resistencia de mezcla por edad en PSI			% de variación de la resistencia respecto a mezcla patrón a 28 días
	3 días	7 días	28 días	
MEP	2030	2650	3760	0.0
MEA - 5	1610	2180	3540	-6,2
MEA - 10	2010	2710	4270	11,9
MEA - 15	1640	2330	3600	-4,4
MEA - 20	1470	2080	3310	-13,6
MES - 5	2060	2640	3910	3,8
MES - 10	1720	2360	3770	0,3
MES - 15	1670	2160	3500	-7,4
MES - 20	1560	2200	3510	-7,1

 Mezcla que supera la resistencia, a 28 días, respecto a la mezcla patrón.

Fuente: elaboración propia.

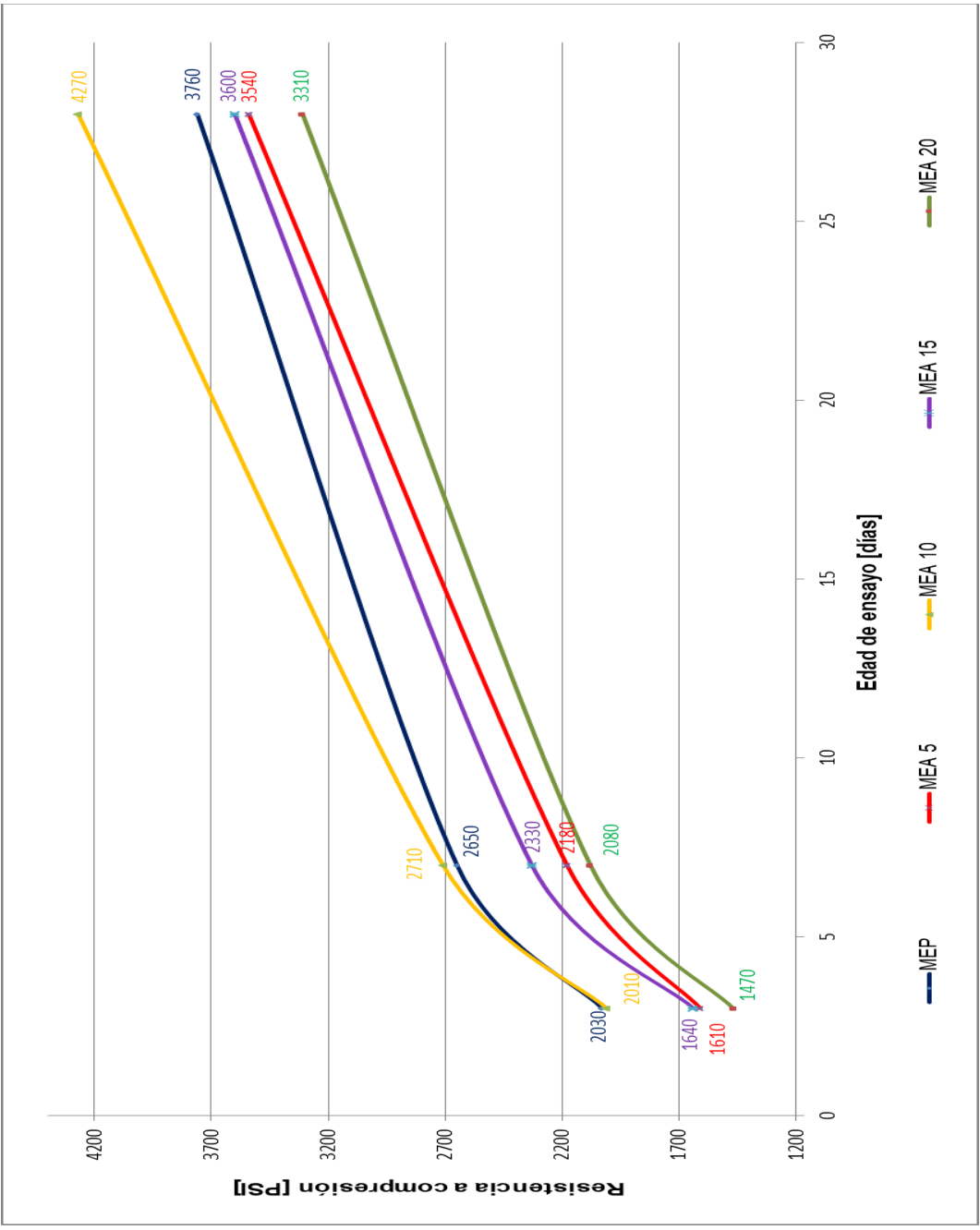
En la quinta columna de la tabla XVI, variación de la resistencia respecto a la mezcla patrón, se aprecia el porcentaje en que cada mezcla supera o reduce la resistencia respecto a la mezcla patrón.

En las mezclas MES-15 y MES-20, la resistencia disminuyó en un 7 %, es decir que, para obtener un valor de resistencia similar a resistencia de la mezcla patrón, no debe exceder un 10 % de sustitución del cemento por polvo de barro.

Y, en las mezclas de adición, únicamente la mezcla al 10 % es satisfactoria a una edad de 28 días.

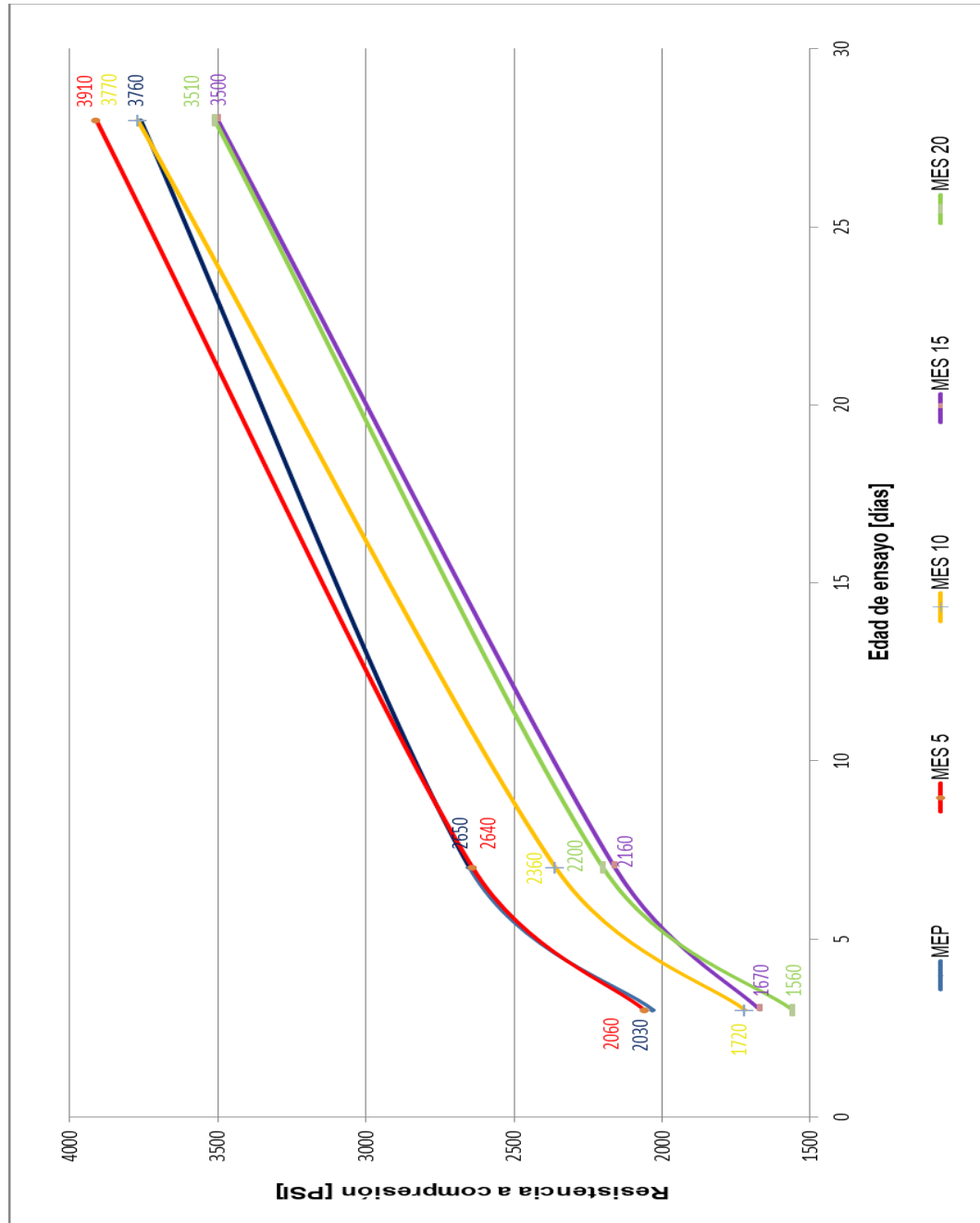
Las mezclas MES-5 y MES-10, satisfactoriamente cumplen con el desempeño esperado. Superando, en un 3,8 % y 0,3 % respectivamente, la resistencia de la muestra patrón a los 28 días. Esto representa un ahorro de cemento entre un 5 % a 10 %, sin afectar las propiedades que el diseño de mezcla requiere, respaldando el objetivo de reducir el cemento en las mezclas de mortero de cemento y cal, y aprovecha el desperdicio que se obtiene de la fabricación industrial de productos con arcilla calcinada, como un recurso para este tipo de iniciativas de construcción.

Figura 22. Resistencia a compresión en mezclas con adición de polvo de barro cocido



Fuente: elaboración propia.

Figura 23. Resistencia a compresión en mezclas con sustitución del cemento con polvo de barro cocido



Fuente: elaboración propia.

En la figura 22 se observa un comportamiento constante de las mezclas con adición del material arcilloso y un comportamiento diferente de la mezcla en adición al 10 % (MEA-10), superando significativamente a la mezcla patrón (MEP). Al evaluar los cubos de mortero, ensayados a tempranas edades, se observó que la densidad de esta mezcla es relativamente baja respecto al resto, pudiendo provocar vacíos, los que a su vez alojan parte de la puzolana y pueden mejorar las resistencias a mayores edades por un curado controlado y densifican la mezcla del mortero en estado endurecido.

La figura 23 presenta el comportamiento de las resistencias de las mezclas en sustitución del cemento por polvo de barro cocido, determinando que las mezclas al 5 % y al 10 % (MES-5 y MES-10) satisfacen los criterios de mantener o mejorar las características mecánicas respecto a la mezcla patrón (MEP), ya que la superan.

4.3.2. Resistencia a la tensión

Se conoce que los morteros producen bajas resistencias a tensión, por lo que estos valores usualmente no tienen trascendencia, se asume que estos trabajarán a compresión o en su defecto a flexión. Sin embargo, los resultados a tensión adquieren importancia en el agrietamiento de las mezclas luego del proceso de secado. Estos resultados suelen encontrarse alrededor de un 10 % de los valores obtenidos por resistencia a compresión.

Tabla XVII. Resistencia a la tensión

Identificación de la mezcla	Resistencia de mezcla por edad en PSI			% de variación de la resistencia respecto a mezcla patrón a 28 días
	3 días	7 días	28 días	
MEP	340	420	450	0,0
MEA - 5	300	330	420	-6,7
MEA - 10	290	330	420	-6,7
MEA - 15	280	350	380	-15,6
MEA - 20	320	290	440	-2,2
MES - 5	330	380	500	11,1
MES - 10	320	350	480	6,7
MES - 15	330	360	460	2,2
MES - 20	250	300	440	-2,2



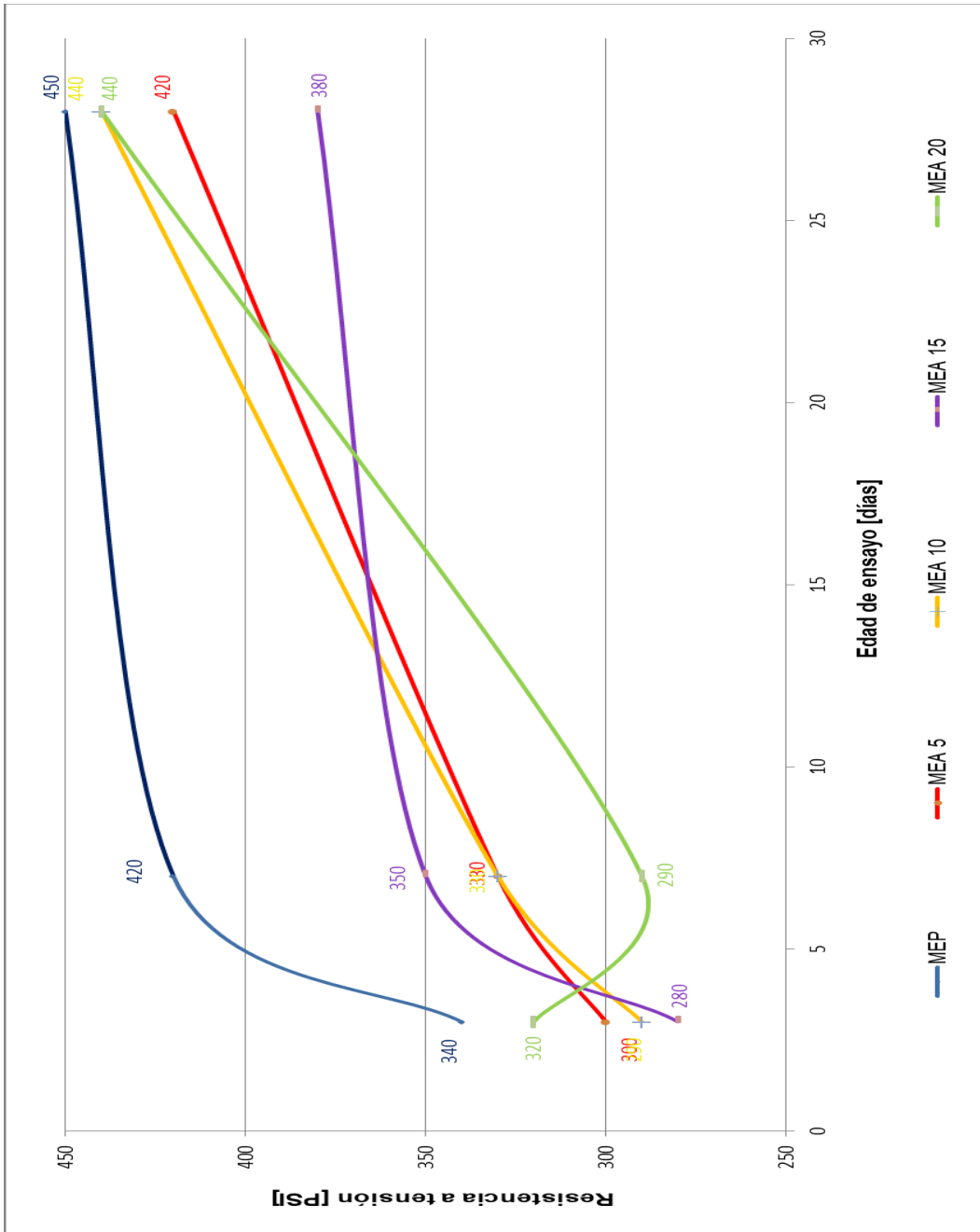
Mezcla que sobrepasa la resistencia, a 28 días, de la mezcla patrón.

Fuente: elaboración propia.

A diferencia de los datos obtenidos a compresión de las mezclas con adición de polvo de barro cocido, en donde únicamente la mezcla al 10% es superior a los resultados de la mezcla patrón, los resultados a tensión son insatisfactorios.

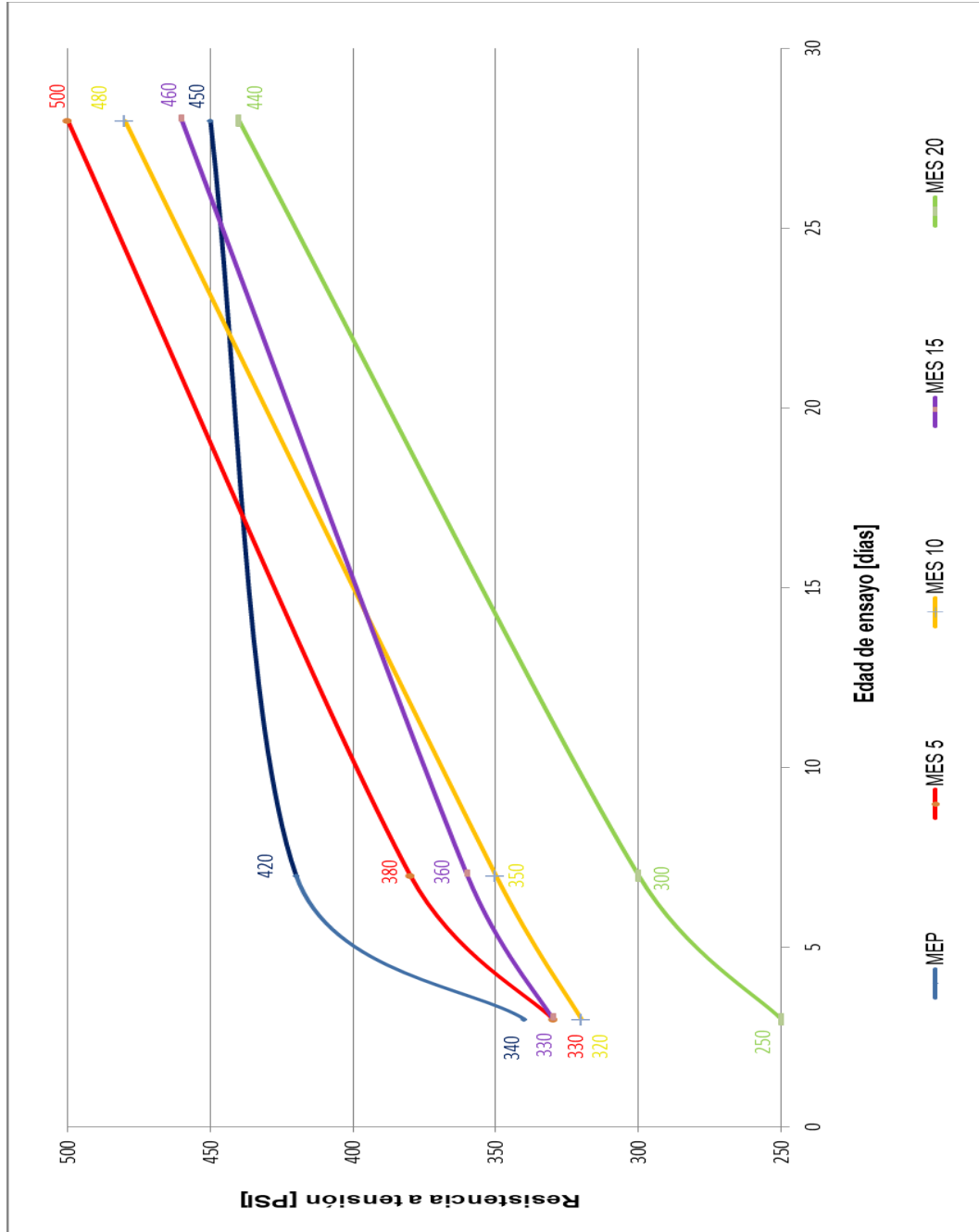
Las mezclas MES-5 y MES-10, al igual que lo obtenido en el ensayo de resistencia a compresión, satisfactoriamente cumplen con el desempeño esperado. Superando en un 11,1 % y 6,7 %, respectivamente, la resistencia de la muestra en comparación (mezcla patrón) a los 28 días.

Figura 24. Resistencia a tensión en mezclas con adición de polvo de barro cocido



Fuente: elaboración propia.

Figura 25. Resistencia a tensión en mezclas con sustitución de cemento por polvo de barro cocido



Fuente: elaboración propia.

A diferencia de los resultados que presentan las mezclas con adición, todas las mezclas en sustitución del cemento por polvo de barro cocido mantienen o superan los resultados de la mezcla patrón (MEP) a 28 días.

4.3.3. Resistencia a la adherencia

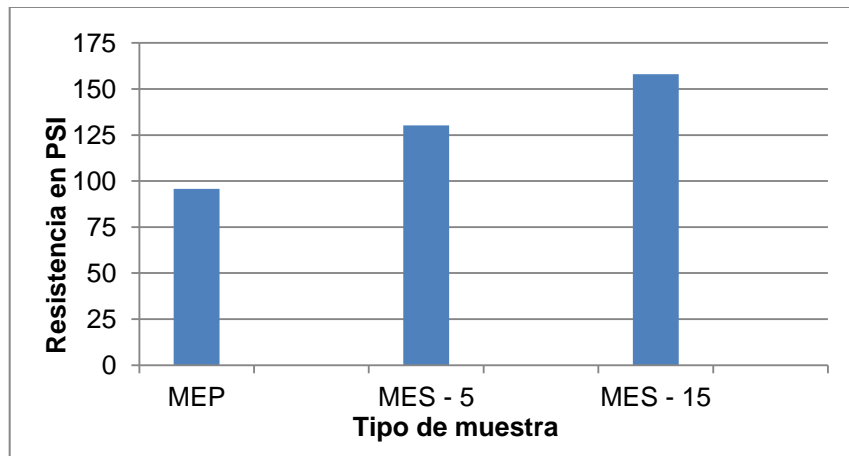
Se dice que es la propiedad más importante de los morteros que se utilizan tanto para la colocación de mampuestos como para revoques. Esta se produce por la trabe que se crea en la hidratación del conglomerante (cemento-cal), al momento de producirse silicato cálcico hidratado. Los filamentos microscópicos actúan a corta distancia y confieren cohesión al mortero, enlazan y aglomeran los agregados presentes en la mezcla, también son responsables de las características físicas del mortero una vez endurecido, y constituyen el anclaje a los poros y textura de las superficies con las que entran en contacto.

Tabla XVIII. Resistencia por adherencia en juntas de *block* clasificación "C" a los 28 días

Resistencia por adherencia en bloques de concreto				
Código	Carga [lb]	Área [in ²]	Resistencia [PSI]	Promedio [PSI]
MEP	2644,80	24,80	53	96
	6854,44	24,80	138	
MES - 5	4209,64	24,80	85	130
	8705,80	24,80	176	
MES - 15	6722,20	24,80	136	158
	8948,24	24,80	180	

Fuente: elaboración propia.

Figura 26. Resistencia por adherencia en juntas de unidades de *block* de concreto a 28 días



Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos por adherencia en prismas de *block* de concreto muestran claramente la capacidad del mortero, debido a que el tipo de falla se da en las unidades de mampostería, lo que permite la resistencia en adherencia del mortero respecto a la mampostería.

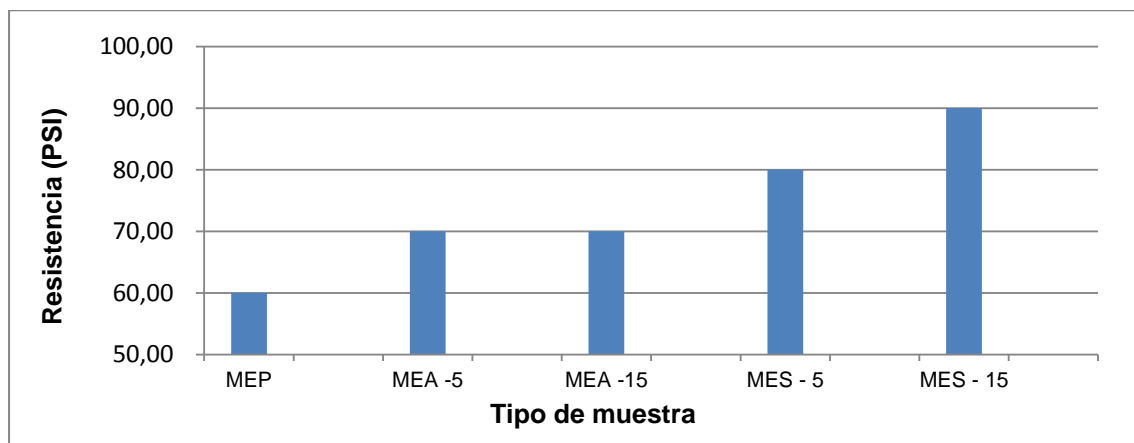
Las unidades de mampostería, siendo incluso de la misma clasificación, presentan resultados muy variables entre sí. La resistencia por adherencia de las mezclas, en sustitución del cemento por polvo de barro cocido, supera la resistencia por corte a las unidades de *block*.

Tabla XIX. **Resistencia por adherencia en juntas en ladrillos tubulares de barro cocido a los 28 días**

Resistencia por adherencia en ladrillos tubulares de barro cocido				
Código	Carga [lb]	Área [in²]	Resistencia [PSI]	Promedio [PSI]
MEP	1 000	19,22	52	60
	1 200	19,22	62	
MEA - 5	1 400	21	67	70
	1 800	28,20	64	
MEA - 15	1 500	20,31	74	70
	1 300	20,30	64	
MES - 5	1 600	19,22	83	80
	1 500	19,22	78	
MES - 15	1 700	19,22	88	90
	1 600	19,22	83	

Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Resistencia por adherencia en juntas de unidades de ladrillo tubular de barro cocido a 28 días**



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a la tabla XIX y a la figura 27, se observa que los resultados se apegan a un comportamiento directamente proporcional al tipo de mezcla que se está trabajando. Esto significa que a mayor cantidad de polvo de barro en la sustitución, mejora la adherencia hasta el punto en que el sistema falla por deslizamiento en la junta, determinando la mejor proporción de mezcla: la de MES – 15.

4.4. Análisis e interpretación de resultados

Los resultados de los ensayos en el mortero en estado fresco demuestran que existe una variación respecto a una mezcla de mortero patrón (sin polvo de barro cocido), debido a la presencia del óxido de hierro y óxido de aluminio, los cuales alteran la consistencia y aumentan su plasticidad sin modificar considerablemente las cantidades del agua.

Los ensayos de tiempo de fraguado o velocidad de endurecimiento demuestran que el uso de polvo de barro cocido retrasa el tiempo de fraguado del mortero, debido a que el material en sustitución o adición, el cual funciona como puzolana natural, reacciona con parte de la cal libre y, al estar en menor proporción la reacción de cal libre y aluminato tricíclico, reacciona más lento. La cal se libera por la reacción del silicato tricíclico en la hidratación.

Al sustituir el material en un 20 % se reduce el tiempo de fraguado comparado con las demás mezclas. Debido a que el polvo de barro cocido tiene moderada cantidad de aluminio y, al 20 % de adición o sustitución, genera una reacción en cadena con los aluminatos, produciendo mayores velocidades de endurecimiento pero bajas resistencias.

El polvo de barro cocido funciona como una puzolana adicionada natural (arcilla calcinada), la cual beneficia las resistencias en estado endurecido para las mezclas experimentales, es por ello que aumenta significativamente las características mecánicas, utilizándolo hasta en un 10 % en sustitución. Sin embargo, las mejores características se presentan a un 5 % en sustitución.

Tabla XX. **Resumen de resultados de las mejores mezclas experimentales de adición y sustitución**

Mortero en estado fresco					
Código	Flujo	Retención de agua (%)	Tiempo de fraguado		Contenido de aire (%Vol.)
			V. inicial	V. final	
MEP	105	81,90	1 hrs 48 min	2 hrs 50 min	2.9
MEA - 10	113	80,53	3 hrs 24 min	4 hrs 10 min	---
MES - 5	105	84,76	1 hrs 42 min	3 hrs 10 min	2.9

Código	Edades de ensayo (días)		
	3	7	28
Resistencia a compresión			
MEP	2030	2650	3760
MEA - 10	2010	2710	4270
MEA - 5	2060	2640	3910
Resistencia a tensión			
MEP	340	420	450
MEA - 10	290	330	440
MES - 5	330	380	500

Resistencia a la adherencia a 28 días		
Código	Block	Ladrillo
MEP	96	60
MEA -	---	70
MES - 15	158	90

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. El uso del polvo de barro cocido en la mezcla de mortero otorga beneficios, como una medida de adición y sustitución del cemento, mejorando las propiedades mecánicas de este. De acuerdo a los criterios por propiedades de la Norma NTG 41050, todas las mezclas en adición y sustitución cumplen con la resistencia requerida.
2. El mortero experimental que se ajusta al patrón será la mezcla en adición al 10%, satisfaciendo únicamente los valores de resistencia a compresión. Sin embargo, la mezcla en sustitución al 10 % cumple con las características físicas y mecánicas; con una proporción en peso respecto al cemento de 1 (cemento) : 0.10 (polvo de barro cocido) : 0.5 (cal) : 2,5 (arena) : 0.8 (agua). La mezcla en sustitución al 5 % supera en 3,8 % y 11,1 % los valores de resistencia a compresión y tensión de la mezcla patrón, respectivamente.
3. Al evaluar cómo afecta el polvo de barro cocido al adicionarlo a la mezcla o sustituirlo por el cemento en diferentes proporciones, se determina que es factible la sustitución hasta un 10 %, mejorando significativamente las características mecánicas de un mortero de cemento y cal, características que se presentan en el apartado de resultados. Los resultados obtenidos con adición de polvo de barro cocido no satisfacen los estándares de resistencias de acuerdo a un mortero sin el uso de polvo de barro cocido.

4. Las condiciones de plasticidad, tiempos de fraguado y resistencia por adherencia, tanto en adición como en sustitución, son directamente proporcionales a la medida en que se incorpora el polvo de barro a la mezcla.
5. Por los resultados obtenidos de los ensayos, todas las mezclas experimentales para morteros de cemento y cal, siendo con adición o sustitución del cemento por polvo de barro cocido, se clasifican en una categoría tipo M, cumpliendo con los parámetros de resistencia a compresión y contenido de aire, según la tabla III. Sin embargo, por motivos de comparación específica entre un mortero tipo N y S, ambos tipos de mezclas se clasifican como morteros tipo S.
6. Los resultados a compresión demuestran que el uso del polvo de barro cocido, como sustitución del cemento al 5 % y como adición al 10 %, incrementa la resistencia en 3,8 % y 11,9 %, respectivamente. Por el contrario, al superar el 10 % en ambos tipos de mezcla, la resistencia disminuye hasta un 7 % para las mezclas con sustitución y 13,6 % con adición.
7. La adherencia aumenta en un 16,6 % para mezclas al 15 % de adición y aumenta en 50 % para mezclas trabajadas al 15 % como sustitución, respecto a la alcanzada con la mezcla patrón, lo cual indica que, a mayor presencia de polvo de barro en la mezcla, mayor será su resistencia a la adherencia.
8. Según los análisis realizados al pulverizar un kilogramo de barro cocido de manera artesanal, se obtiene un costo de 5 quetzales por kilogramo, obteniendo un aumento del 18% del costo en mezclas de mortero de

cemento y cal, en sustitución del cemento por polvo de barro cocido y un 28 % en adición. Para que utilizar desperdicio de barro cocido en mezclas de morteros de cemento y cal, a no más del 10 % en sustitución, resulte económicamente factible, deberá realizarse el proceso de pulverización en grandes volúmenes (a escala industrial) a no más de 1,50 quetzales el kilogramo pulverizado de barro cocido.

RECOMENDACIONES

1. Antes de considerar el uso de polvo de barro cocido en mezclas de mortero de cemento y cal, una muestra del material deberá ser analizada química y físicamente, para determinar si cumple con los requerimientos que exigen las normas para su clasificación y uso, en mezclas de mortero.
2. No utilizar el polvo de barro como sustitución o adición de cemento en el mortero sin antes realizar mezclas de prueba, esto con el objetivo de evaluar el comportamiento del material en la mezcla en estado fresco y endurecido, específicamente la reacción con el cemento y agregados.
3. La sustitución del polvo de barro cocido por cemento en mezclas de mortero de cemento y cal, no debe superarse en un 10 % en peso, ya que, al excederla, la cantidad de cemento se hace insuficiente para reaccionar con el polvo de barro, lo que provocaría un retardo en el tiempo de fraguado y una baja resistencia mecánica en el mortero endurecido.
4. Considerar un estudio de polvo de barro cocido en mezclas de mortero de cemento y cal que exceda de los 90 días, para obtener resultados de ensayos en estado endurecido, y determinar si es capaz de brindar una resistencia significativamente mayor comparada con una mezcla de control a edades avanzadas.

5. Utilizar el polvo de barro cocido junto con materiales que cumplan las normas y requerimientos, bajo la supervisión de personal calificado para realizar las dosificaciones máximas permitidas, así como para ejecutar correctos ensayos a mezclas de mortero fresco y endurecido, y realizar un adecuado curado y manipulación de los especímenes de ensayo, para obtener un registro fiel del comportamiento de un mortero con polvo de barro cocido.

BIBLIOGRAFÍA

1. ÁLVAREZ GUILLÉN, Julio César. *Azúcar como aditivo retardante y modificador de resistencia para mezclas de concreto*. Trabajo de graduación de Ingeniería Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2017. 110 p.
2. American Concrete Institute. *Proporcionamiento de mezclas concreto normal, pesado y masivo*. EE.UU: Comité ACI 211.1, 2004. 56 p.
3. ASTM C311 / C311M-16. *Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete*. EE.UU: ASTM International, 2016. 34 p.
4. ASTM C618-08a. *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete*. EE.UU: ASTM International, 2016. 3 p.
5. CANO SALAZAR, Eder Iván. *Ceniza volante de carbón mineral para adición en mezclas de concreto*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2017. 149 p.
6. Comisión Guatemalteca de Normas. NTG-41003 h3 (ASTM C185-08). *Método de ensayo. Determinación del contenido de aire en los morteros de cemento hidráulico*. Guatemala: Coguanor, Ministerio de Economía, 2013. 12 p.


7. _____. NTG-41003 h4 (ASTM C109/109M-11b) *Método de Ensayo. Determinación de la resistencia a la compresión de mortero de cemento hidráulico usando especímenes cúbicos de 50 mm (2 pulg) de lado.* Guatemala: Coguanor, Ministerio de Economía, 2012. 26 p.
8. _____. NTG-41003 h6 (ASTM C430-08). *Método de ensayo. Determinación de la finura del cemento hidráulico usando un tamiz de 45µm (№ 325).* Guatemala: Coguanor, Ministerio de Economía, 2013. 10 p.
9. _____. NTG-41003 h8 (ASTM C 441/C 441M-11). *Método de ensayo. Determinación de la efectividad de las puzolanas o de la escoria de alto horno granulada y molida, en la prevención de la expansión excesiva del concreto debido a la reacción álcali-sílice.* Guatemala: Coguanor, Ministerio de Economía, 2014. 11 p.
10. _____. NTG-41003 h10 (ASTM C191-08). *Método de ensayo. Determinación del tiempo de fraguado del cemento hidráulico usando la aguja de Vicat.* Guatemala: Coguanor, Ministerio de Economía, 2013. 20 p.
11. _____. NTG-41003 h13 (ASTM C1437-07). *Método de ensayo. Determinación del flujo en morteros de cemento hidráulico.* Guatemala: Coguanor, Ministerio de Economía, 2013. 09 p.

12. _____. NTG-41031 (ASTM C144-04). *Agregados para morteros de albañilería. Especificaciones*. Guatemala: Coguanor, Ministerio de Economía, s/f. 06 p.
13. _____. NTG-41050 (ASTM C270-10). *Mortero de pega para unidades de mampostería. Especificaciones*. Guatemala: Coguanor, Ministerio de Economía, 2012. 35 p.
14. _____. NTG-41051 h7 (ASTM C952-12). *Método de ensayo. Determinación de la resistencia de adherencia por tracción del mortero de pega y las unidades de mampostería*. Guatemala: Coguanor, Ministerio de Economía, 2014. 10 p.
15. _____. NTG-41066 (ASTM C1586-05). *Guía para el aseguramiento de la calidad de los morteros de pega para unidades de mampostería*. Guatemala: Coguanor, Ministerio de Economía, 2012. 08 p.
16. KOSMATKA, Steven H.; et al. *Diseño y control de mezclas de concreto*. EE. UU: Portland Cement Association, 2004. 456 p.
17. LÓPEZ ENRÍQUEZ, Wilmer Estiven. *Diseño de concreto refractario utilizando residuos de ladrillos de barro cocido*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2016. 128 p.


18. LÓPEZ LÓPEZ, Carlos Iván. *El reciclado de barro cocido, como agregado en el diseño de mezclas asfálticas por el método Marshall*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2014. 150 p.
19. NEVILLE, Adam; BROOKS, J.J. *Tecnología del concreto*. México: Trillas, 1998. 329 p.
20. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. *Norma mexicana NMX – 082. Determinación del esfuerzo de adherencia de los ladrillos cerámicos y el mortero de las juntas*. Dirección general de normas, 1974. 4p.
21. ZEA OSORIO, Norma Lissette. *Caracterización de las arcillas para la fabricación de ladrillos artesanales*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2005. 165 p.

ANEXOS

Anexo 1. Informe de resistencia a la compresión en MEP y MEA – 5



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

**INFORME DE ENSAYO A COMPRESIÓN DE MORTEROS, RETENCIÓN DE AGUA
Y ENSAYO A TENSIÓN DE MORTEROS** No. 15369

NORMA NTG 41003 h4 (ASTM C-109), ASTM C-1506 Y ASTM C-190

INFORME SACM - 027/19

HOJA 1/4

O.T. No. 35963

INTERESADO: David Estuardo Ortiz Wolford, Carné: 2009 24465

PROYECTO: Trabajo de graduación "Diseño y evaluación de mortero de cemento y cal con adición de polvo de barro cocido"

DIRECCIÓN: Ciudad de Guatemala.

EMISIÓN DE INFORME: 22 de enero de 2019

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

MEZCLA PATRÓN (MEP)

No. CUBO	FECHA DE ELABORACIÓN	EDAD en días	Área cm ²	Carga lb	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/plg ²
MEP1	28/09/2018	3	26,060	8 300	14,20	2 060
MEP2	28/09/2018	3	25,806	8 300	14,30	2 070
MEP3	28/09/2018	3	26,162	8 000	13,60	1 970
MEP4	28/09/2018	7	25,905	10 500	18,00	2 610
MEP5	28/09/2018	7	26,060	11 000	18,80	2 730
MEP6	28/09/2018	7	25,857	10 400	17,90	2 600
MEP7	28/09/2018	28	26,214	14 700	25,00	3 630
MEP8	28/09/2018	28	26,364	15 700	26,50	3 850
MEP9	28/09/2018	28	26,111	15 400	26,20	3 800
RETENCIÓN DE AGUA (%)					81,90	

MEZCLA EN ADICIÓN AL 5% (MEA-5)

No. CUBO	FECHA DE ELABORACIÓN	EDAD en días	Área cm ²	Carga lb	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/plg ²
MEA-5,1	28/09/2018	3	25,200	6 400	11,30	1 640
MEA-5,2	28/09/2018	3	25,806	6 400	11,00	1 600
MEA-5,3	28/09/2018	3	25,806	6 300	10,90	1 580
MEA-5,4	28/09/2018	7	25,806	8 300	14,30	2 070
MEA-5,5	28/09/2018	7	25,350	8 800	15,40	2 230
MEA-5,6	28/09/2018	7	25,908	9 000	15,50	2 250
MEA-5,7	28/09/2018	28	25,908	14 200	24,40	3 540
MEA-5,8	28/09/2018	28	25,959	14 200	24,30	3 530
MEA-5,9	28/09/2018	28	25,704	14 100	24,40	3 540
RETENCIÓN DE AGUA (%)					88,10	


El presente informe representa únicamente la muestra identificada en el mismo.
Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

L.L.


FACULTAD DE INGENIERÍA -USAC-
Edificio Emilio Beltrarena, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planía 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Anexo 2. **Informe de resistencia a la compresión en MEA -10, MEA - 15
Y MEA - 20**



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**USAC
TRICENTENARIA**
Universidad de San Carlos de Guatemala

**INFORME DE ENSAYO A COMPRESIÓN DE MORTEROS, RETENCIÓN DE AGUA
Y ENSAYO A TENSIÓN DE MORTEROS** **No. 15370**

NORMA NTG 41003 h4 (ASTM C-109), ASTM C-1506 Y ASTM C-190

O.T. No. 35963 INFORME SACM - 027/19

HOJA 2/4

MEZCLA EN ADICIÓN AL 10% (MEA-10)

No. CUBO	FECHA DE ELABORACIÓN	EDAD en días	Área cm ²	Carga lb	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/plg ²
MEA-10.1	28/09/2018	3	26,214	8 100	13,70	1 990
MEA-10.2	28/09/2018	3	26,010	8 300	14,20	2 060
MEA-10.3	28/09/2018	3	25,502	7 800	13,60	1 970
MEA-10.4	28/09/2018	7	25,857	10 800	18,60	2 700
MEA-10.5	28/09/2018	7	26,163	11 400	19,40	2 810
MEA-10.6	28/09/2018	7	26,368	10 800	18,20	2 640
MEA-10.7	28/09/2018	28	26,780	17 600	29,20	4 240
MEA-10.8	28/09/2018	28	26,163	17 800	30,30	4 400
MEA-10.9	28/09/2018	28	26,163	16 900	28,70	4 160
RETENCIÓN DE AGUA (%)					80,50	

MEZCLA EN ADICIÓN AL 15% (MEA-15)

No. CUBO	FECHA DE ELABORACIÓN	EDAD en días	Área cm ²	Carga lb	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/plg ²
MEA-15.1	28/09/2018	3	26,061	6 600	11,30	1 640
MEA-15.2	28/09/2018	3	25,654	6 400	11,10	1 610
MEA-15.3	28/09/2018	3	25,806	6 700	11,60	1 680
MEA-15.4	28/09/2018	7	25,704	9 200	15,90	2 310
MEA-15.5	28/09/2018	7	25,959	9 500	16,30	2 370
MEA-15.6	28/09/2018	7	25,756	9 200	15,90	2 310
MEA-15.7	28/09/2018	28	25,806	14 400	24,80	3 600
MEA-15.8	28/09/2018	28	26,010	14 300	24,40	3 540
MEA-15.9	28/09/2018	28	25,806	14 700	25,30	3 670
RETENCIÓN DE AGUA (%)					81,50	

MEZCLA EN ADICIÓN AL 20% (MEA-20)

No. CUBO	FECHA DE ELABORACIÓN	EDAD en días	Área cm ²	Carga lb	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/plg ²
MEA-20.1	28/09/2018	3	25,200	5 900	10,40	1 510
MEA-20.2	28/09/2018	3	25,150	6 100	10,80	1 570
MEA-20.3	28/09/2018	3	26,975	5 500	9,10	1 320
MEA-20.4	28/09/2018	7	26,112	8 600	14,70	2 130
MEA-20.5	28/09/2018	7	26,368	8 500	14,30	2 080
MEA-20.6	28/09/2018	7	26,266	8 200	13,90	2 020
MEA-20.7	28/09/2018	28	25,603	12 900	22,40	3 250
MEA-20.8	28/09/2018	28	25,301	13 900	24,40	3 540
MEA-20.9	28/09/2018	28	26,725	13 700	22,80	3 310
RETENCIÓN DE AGUA (%)					83,20	


El presente informe representa únicamente la muestra identificada en el mismo.
Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

LL


FACULTAD DE INGENIERÍA -USAC-
Edificio Emilio Beltranena, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121, Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Anexo 3. **Informe de resistencia a la tensión en MEP, MEA – 5, MEA - 10, MEA - 15 Y MEA - 20**



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**INFORME DE ENSAYO A COMPRESIÓN DE MORTEROS, RETENCIÓN DE AGUA
Y ENSAYO A TENSIÓN DE MORTEROS**
NORMA NTG 41003 h4 (ASTM C-109), ASTM C-1506 Y ASTM C-190
INFORME SACM - 027/19
HOJA 3/4

No. 15371

RESISTENCIA A LA TENSIÓN

MEZCLA PATRÓN (MEP)

No. BRIQUETA	FECHA DE HECHURA	EDAD en días	Área [cm ²]	Carga [lb]	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/plg ²
MEP1	28/09/2018	3	6,758	345	2,30	330
MEP2	28/09/2018	3	6,706	355	2,40	350
MEP3	28/09/2018	7	6,682	405	2,70	390
MEP4	28/09/2018	7	6,864	465	3,00	440
MEP5	28/09/2018	28	7,020	475	3,00	440
MEP6	28/09/2018	28	7,049	495	3,10	450

MEZCLA EN ADICIÓN AL 5% (MEA-5)

No. BRIQUETA	FECHA DE HECHURA	EDAD en días	Área [cm ²]	Carga [lb]	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/plg ²
MEA-5.1	28/09/2018	3	6,629	315	2,10	310
MEA-5.2	28/09/2018	3	6,786	315	2,10	310
MEA-5.3	28/09/2018	3	6,708	325	2,20	320
MEA-5.4	28/09/2018	7	6,967	335	2,10	300
MEA-5.5	28/09/2018	7	6,812	410	2,70	390
MEA-5.6	28/09/2018	28	6,653	445	3,00	440

MEZCLA EN ADICIÓN AL 10% (MEA-10)

No. BRIQUETA	FECHA DE HECHURA	EDAD en días	Área [cm ²]	Carga [lb]	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/plg ²
MEA-10,1	28/09/2018	3	6,970	320	2,00	290
MEA-10,2	28/09/2018	7	6,631	345	2,30	330
MEA-10,3	28/09/2018	28	6,708	445	3,00	440

MEZCLA EN ADICIÓN AL 15% (MEA-15)

No. BRIQUETA	FECHA DE HECHURA	EDAD en días	Área [cm ²]	Carga [lb]	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/plg ²
MEA-15,1	28/09/2018	3	7,102	300	1,90	280
MEA-15,2	28/09/2018	7	6,451	345	2,40	350
MEA-15,3	28/09/2018	28	6,812	390	2,50	360

MEZCLA EN ADICIÓN AL 20% (MEA-20)

No. BRIQUETA	FECHA DE HECHURA	EDAD en días	Área [cm ²]	Carga [lb]	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/plg ²
MEA-20,1	28/09/2018	3	6,605	320	2,20	320
MEA-20,2	28/09/2018	7	6,682	305	2,00	290
MEA-20,3	28/09/2018	28	6,630	440	3,00	440

El presente informe representa únicamente la muestra identificada en el mismo.
Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

FACULTAD DE INGENIERÍA -USAC-
Edificio Emilio Beltranena, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Anexo 4. Proporciones de las mezclas y flujos



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

**INFORME DE ENSAYO A COMPRESIÓN DE MORTEROS, RETENCIÓN DE AGUA
Y ENSAYO A TENSIÓN DE MORTEROS**
NORMA NTG 41003 h4 (ASTM C-109), ASTM C-1506 Y ASTM C-190
INFORME SACM - 027/19
HOJA 4/4

No. 15372

OBSERVACIONES:

a) Diseño de mezcla de mortero, bajo condiciones de laboratorio.

b) Temperatura ambiente:
- 28/09/2018: 22,80 °C y humedad relativa 65 % del laboratorio.

c) Flujo de la mezcla:

- PATRÓN:	105 %
- MEA - 05:	106 %
- MEA - 10:	113 %
- MEA - 15:	108 %
- MEA - 20:	107 %

d) Proporción del mortero :

	Cemento	Cal	Barro triturado	Arena	Agua
- PATRÓN:	1,00	: 0,50	: 0,00	: 2,50	: 0,73
- MEA - 05:	1,00	: 0,50	: 0,05	: 2,50	: 0,80
- MEA - 10:	1,00	: 0,50	: 0,10	: 2,50	: 0,80
- MEA - 15:	1,00	: 0,50	: 0,15	: 2,50	: 0,82
- MEA - 20:	1,00	: 0,50	: 0,20	: 2,50	: 0,83

e) Se utilizó Cemento Progreso UGC 4060

f) Muestras ensayadas en máquina de compresión RIEHLE Testing Machine División con capacidad de 300 000 libras, dial utilizado para lectura de carga: 60 000 libras.

El presente informe representa únicamente la muestra identificada en el mismo.
Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

ATENTAMENTE,



Inga Dilma Yanet Mejicanos Jol
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros

Visa.



Ing. Edwin Josué Ixpátá Reyes
Director CII/USAC





FACULTAD DE INGENIERÍA -USAC-
Edificio Emilio Beltranena, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Anexo 6. Ensayo de contenido de aire

	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Av. 18 - 01 Zona 6, La Pedrera Tel: 2286 - 4178 Fax: 2286 - 4181 info@progreso.com		OT:	28478
			FECHA:	2016-08-05
			PÁGINA:	1 DE 1
			IMPRESIÓN:	2016-08-17
CLIENTE:	CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO / CETEC	CONTACTO:	LUIS VELAZQUEZ / DAVID CIRIAC W	
DIRECCION:	15 Av. 18 - 01 ZONA 6, FINCA LA PEDRERA	TELEFONO:	2286-4100	
PROYECTO:	TESIS DE PORTERO	ANALISTA (S):	LI	LABORATORIO: CE

INFORME DE ENSAYOS FISICOS DE LABORATORIO

OT	IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	NORMA	UNE-EN-1015-7	
			FECHA ENSAYO	CONTENIDO DE AIRE (%VOL)
28478-1	Mortero "Pakón"	12/08/2016	106	2.9
28478-2	Mortero "A"	12/08/2016	104	2.9
28478-3	Mortero "B"	12/08/2016	110	3.0
28478-4	Mortero "C"	12/08/2016	110	3.0
28478-5	Mortero "D"	12/08/2016	105	3.1

OBSERVACIONES:

Los resultados de ensayo se refieren a las muestras presentadas por el Cliente.





Jefe de Laboratorio / Coordinador

Fuente: Centro de Investigación y Desarrollo / CETEC.

Anexo 7. Ensayo de fluorescencia de rayos X

No. 04503 CETEC

 <p style="text-align: center;">CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01, sector 8 La Piedad Tel: 2204-1178 Fax: 2204-1811 laboratorio@CETECempresa.com</p>		<p>01 8000</p> <p>FECHA: 2017-07-24</p> <p>PLANTA: 1-05-1</p> <p>ÁREA DE LAB: QIC</p>
<p>Cliente: CHD/CITEC</p> <p>Dirección / Ubicación: El Av. 18 (01 sector 8) La Piedad</p> <p>Coordinador: Ricardo León / David Ojeda</p> <p>Proyecto: Análisis de Pastas para Rayos X</p>	<p>Precedente:</p> <p>Muestreo</p> <p>Revisión</p> <p>Fecha de Emisión: 2017-04-01</p>	<p>Objetivo: No aplica</p> <p>Autores: Bruno Cordero</p> <p>Revisión: Ricardo León</p>

INFORME DE ENSAYO

ANÁLISIS QUÍMICO
MEDIANTE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

* COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)												
Elemento	Al2O3	CaO	Cr2O3	Fe2O3	K2O	MgO	MnO	MgO	P2O5	SiO2	TiO2	Total
Resultados	25.70	1.94	0.07	8.80	1.09	0.00	0.21	2.19	0.00	0.00	54.81	0.99
	95.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

* Expresado como porcentaje en bases (w/w).

[Firma]
Analista

[Firma]
Jefe de Laboratorio/Coordinador

OBSERVACIONES: N/A - No Aplica

Los resultados de ensayo se refieren únicamente a los materiales presentados por el cliente. No debe reproducirse esta información a menos que se tenga consentimiento.

ISS-CI-02-07Rev. 8

Fuente: Centro de Investigación y Desarrollo / CETEC.

Anexo 8. **Resistencia a compresión en mezclas con 5 % de sustitución**

ENSAYO A COMPRESIÓN DE MORTEROS Y RETENCIÓN DE AGUA NTG 41003 h4 (ASTM C-109)					
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN					
Mezcla	EDAD en días	Área [cm²]	Carga [Lb]	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/plg²
MES -5	3	25.959	8,100	13.90	2,020
	3	26.008	8,200	14.02	2,030
	3	25.756	8,500	14.68	2,130
	7	26.111	10,500	17.88	2,600
	7	26.161	10,700	18.19	2,640
	7	26.213	11,000	18.66	2,710
	28	25.908	14,800	25.40	3,690
	28	26.161	16,300	27.71	4,020
	28	26.112	16,300	27.76	4,030
Retención:			84.80		

OBSERVACIONES:

a) La mezcla corresponde a: Mezcla al 5% de adición con Polvo de Barro Cocido.

b) Muestras ensayadas en máquina de compresión RIEHLE Testing Machine División con capacidad de 300 000 libras,
dial utilizado para lectura de carga: 60 000 libras.

c) Flujo de la mezcla: **105**

d) Proporciones: 0,95 : 0,05 : 0,5 : 2,5 : 0,76 (Cemento : Polvo de barro : Cal : Arena : Agua)

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Anexo 9. **Resistencia a compresión en de mezclas con 10 % de sustitución**

**ENSAYO A COMPRESIÓN DE MORTEROS Y RETENCIÓN DE AGUA
NTG 41003 h4 (ASTM C-109)**

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Mezcla	EDAD en días	Área [cm ²]	Carga [Lb]	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/plg ²
MES - 10	3	26.010	7,000	12.00	1,740
	3	26.265	6,900	11.70	1,700
	3	26.111	7,000	11.90	1,730
	7	26.163	9,500	16.10	2,340
	7	25.908	9,600	16.50	2,390
	7	26.162	9,500	16.10	2,340
	28	25.806	15,200	26.20	3,800
	28	26.061	15,400	26.30	3,820
	28	26.111	15,000	25.50	3,700

Retención:	80.90
------------	-------

OBSERVACIONES:

- a) La mezcla corresponde a: Mezcla al 10% de adición con Polvo de Barro Cocido.
- b) Muestras ensayadas en máquina de compresión RIEHLE Testing Machine División con capacidad de 300 000 libras,
dial utilizado para lectura de carga: 60 000 libras.
- c) Flujo de la mezcla: **110**
- d) Proporciones: 0,90 : 0,1 : 0,5 : 2,5 : 0,83 (Cemento : Polvo de barro : Cal : Arena : Agua)

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Anexo 10. **Resistencia a compresión en mezclas con 15 % de sustitución**

ENSAYO A COMPRESIÓN DE MORTEROS Y RETENCIÓN DE AGUA NTG 41003 h4 (ASTM C-109)					
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN					
No. CUBO	EDAD en días	Área [cm²]	Carga [Lb]	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/plg²
MES - 15	3	25.857	6,800	11.70	1,700
	3	25.552	6,500	11.30	1,640
	3	25.908	6,700	11.50	1,670
	7	26.010	8,500	14.50	2,100
	7	25.908	9,100	15.60	2,260
	7	25.908	8,400	14.40	2,090
	28	25.654	13,400	23.20	3,370
	28	25.604	13,800	24.00	3,480
	28	25.806	14,700	25.30	3,670
			88.90		

OBSERVACIONES:

a) La mezcla corresponde a: Mezcla al 15% de adición con Polvo de Barro Cocido.

b) Muestras ensayadas en máquina de compresión RIEHLE Testing Machine División con capacidad de 300 000 libras,
dial utilizado para lectura de carga: 60 000 libras.

c) Flujo de la mezcla: **108**

d) Proporciones: 0,85 : 0,15 : 0,5 : 2,5 : 0,88 (Cemento : Polvo de barro : Cal : Arena : Agua)

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Anexo 11. **Resistencia a compresión en mezclas con 20 % de sustitución**

**ENSAYO A COMPRESIÓN DE MORTEROS Y RETENCIÓN DE AGUA
NTG 41003 h4 (ASTM C-109)**

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

No. CUBO	EDAD en días	Área [cm ²]	Carga [Lb]	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/plg ²
MES - 20	3	25.703	5,800	10.00	1,450
	3	25.907	6,400	11.00	1,600
	3	25.553	6,500	11.30	1,640
	7	26.010	8,600	14.70	2,130
	7	25.654	8,500	14.70	2,130
	7	25.705	9,300	16.10	2,340
	28	25.908	14,100	24.20	3,510
	28	25.755	14,100	24.30	3,530
	28	25.857	14,000	24.10	3,500

Retención:	84.30
------------	-------

OBSERVACIONES:

- a) La mezcla corresponde a: Mezcla al 20% de adición con Polvo de Barro Cocido.
- b) Muestras ensayadas en máquina de compresión RIEHLE Testing Machine División con capacidad de 300 000 libras,
dial utilizado para lectura de carga: 60 000 libras.
- c) Flujo de la mezcla: **108**
- d) Proporciones: 0,80 : 0,2 : 0,5 : 2,5 : 0,92 (Cemento : Polvo de barro : Cal : Arena : Agua)

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

