



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES**

**CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA
CONSTRUCCIÓN**

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS

TÉSIS

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN LADRILLO DE SUELO ESTABILIZADO
CON ESCORIA METALÚRGICA ACTIVADA ALCALINAMENTE**

PRESENTA

Ing. Alberto Isaac Ruiz Soto

PARA OBTENER EL GRADO DE MASTER EN INGENIERÍA CIVIL

TUTORES

**Dr. José Ángel Ortiz Lozano
Mtra. Lara Carral Martín**

COMITÉ TUTORIAL

Dr. Carlos López-Colina Pérez

Aguascalientes, Ags., 05 de noviembre del 2018



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE AGUASCALIENTES
FORMATO DE CARTA DE VOTO APROBATORIO

M. en Fil. Omar Vázquez Gloria
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E

Por medio del presente como Tutor designado del estudiante **Alberto Isaac Ruiz Soto** con ID **220942** quien realizó **la tesis** titulado: **Diseño y evaluación de un ladrillo de suelo estabilizado con escoria metalúrgica activada alcalinamente**, y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATE NTAMENTE


Dr. José Ángel Ortiz Lozano
Tutor de tesis

“Se Lumen Proferre”
Aguascalientes, Ags., a 29 de octubre de 2018.


M.I. Lara Cañal Martín
Co-tutor de tesis


Dr. Carlos López-Colina Pérez
Co-asesor de tesis

Firmado digitalmente por LOPEZ-COLINA PEREZ CARLOS - 10900725J
Fecha: 2018.10.24 10:33:29 +02'00'


No. 100.

- ✓ c.c.p.- Interesado
- c.c.p.- Secretaría de Investigación y Posgrado
- c.c.p.- Jefatura del Depto. de Ciencias del diseño y de la construcción
- c.c.p.- Consejero Académico
- c.c.p.- Minuta Secretario Técnico



Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción

Oficio: CCDC-D-467-2018
Asunto: Conclusión de tesis

Dra. María del Carmen Martínez Serna
Dirección General de Investigación y Posgrado
PRESENTE

Por medio de este conducto informo que el documento final de tesis titulado: "DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN LADRILLO DE SUELO ESTABILIZADO CON ESCORIA METALÚRGICA ACTIVADA ALCALINAMENTE". Presentado por el sustentante: Alberto Isaac Ruiz Soto con ID: 220942, egresado de la Maestría en Ingeniería Civil cumple las normas y lineamientos establecidos institucionalmente. Cabe mencionar que el autor cuenta con el voto aprobatorio correspondiente.

Para efecto de los trámites que al interesado convengan, se extiende el presente, reiterándole las consideraciones que el caso amerite.

ATENTAMENTE
Aguascalientes, Ags., 13 de noviembre de 2018
"SE LUMEN PROFERRE"

M. en Fil. Omar Vázquez Gloria
Decano del Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción

- c.c.p. - Dr. Ricardo Arturo López León – Secretario de Investigación y Posgrado del CCDC.
- c.c.p. - Dr. Miguel Ángel Soto Zamora – Secretario Técnico de la Maestría en Ingeniería Civil.
- c.c.p. - Dr. José Ángel Ortiz Lozano – Tutor de tesis.
- c.c.p. - Ing. Alberto Isaac Ruiz Soto – Egresado de la Maestría en Ingeniería Civil.
- c.c.p. - Lic. Delia Guadalupe López Muñoz – Jefe Sección de Certificados y Títulos.
- c.c.p. - Archivo

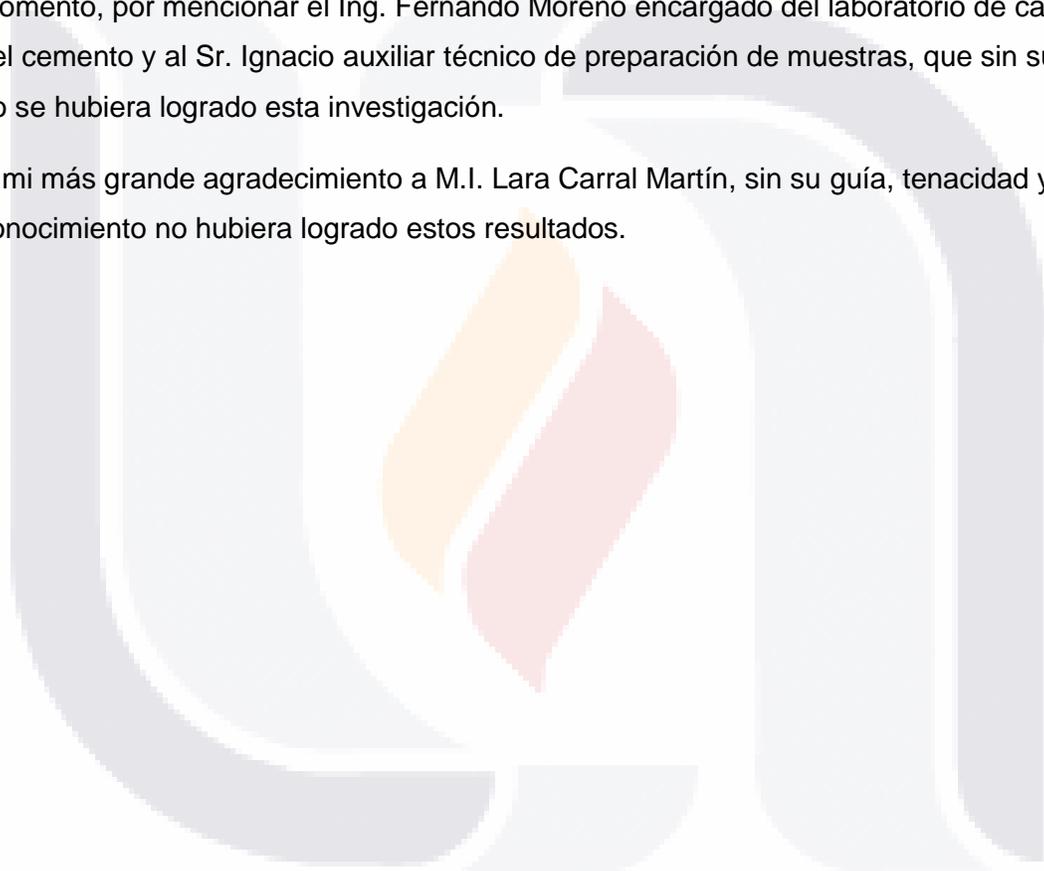
OVG/rbv

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por los 19 meses de apoyo por concepto de manutención, que ayudaron para concentrar esfuerzos y energías en la investigación.

Se agradece a la empresa de Cementos y Concretos Nacionales S.A. de C.V. por el apoyo en el desarrollo del trabajo de investigación y las facilidades mostradas en cada momento, por mencionar el Ing. Fernando Moreno encargado del laboratorio de calidad del cemento y al Sr. Ignacio auxiliar técnico de preparación de muestras, que sin su ayuda no se hubiera logrado esta investigación.

Y mi más grande agradecimiento a M.I. Lara Carral Martín, sin su guía, tenacidad y conocimiento no hubiera logrado estos resultados.



DEDICATORIA

Les dedico este gran esfuerzo a mi familia, Lara y Nicolás, ellos son los motores que le dan impulso a mi vida. Los quiero.

Papá y mamá también les dedico este trabajo y los que faltan; gracias por mostrarme que con esfuerzos y sacrificios se puede lograr mucho en la vida.

Gracias



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	1
ÍNDICE DE TABLA	3
ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
ACRÓNIMOS	7
RESUMEN.....	8
ABSTRACT	9
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	11
1.1 Prólogo.....	11
1.2 Objetivo general	11
1.3 Objetivos Particulares.....	12
1.4 Alcance.....	12
1.5 Justificación.....	13
1.6 Hipótesis.....	15
1.7 Metodología.....	15
1.8 Narrativa por capítulos.....	17
CAPITULO II: ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO.....	20
2.1 Bloques estabilizados con cal, cemento, Geopolímeros y activados alcalinamente.....	20
CAPITULO III: MARCO TEÓRICO	28
3.1 Bloques de Tierra Compactada	28
3.2 Definición de activación alcalina	31
3.3 Definición de geopolimerización	33
3.4 Diferencia entre geo polimerización y activación alcalina	34
3.5 Fuentes de aluminosilicatos.....	34
3.6 Química de la activación alcalina.....	37
3.7 Mezclas de suelo más fuente de aluminosilicatos activados.....	39
3.8 Normativa en la fabricación de ladrillos.....	39
CAPITULO IV: Planteamiento de Campañas Experimentales.....	43
4.1 Variables del experimento	43
4.2 Establecimiento de concentración molar guía.....	44
4.3 Preparación de las escorias.....	45
4.4 Cálculo de componentes de la pasta activadora.....	45
4.5 Dosificación de masas para BTC´s.....	49

4.6	Pruebas de laboratorio físicas	50
CAPITULO V: RESULTADOS		52
5.1	Caracterización química y mineralógica de las escorias	52
5.2	Caracterización física de las escorias	54
5.3	Comportamiento mecánico	55
5.4	Caracterización química y mineralógica de los BTC´s activados	60
5.5	BTC óptimo	66
5.6	Módulo Elástico	67
CAPITULO VI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS		69
6.1	Caracterización físico-química de las escorias	69
6.2	Caracterización físico-química de los BTC´s activados.....	71
6.3	BTC óptimo y módulo elástico	73
6.4	Comparativa entre las piezas comerciales y el BTC activado	74
CAPITULO VII: CONCLUSIONES		77
Conclusión General		77
Conclusiones Particulares		77
Nichos de Investigación		77
BIBLIOGRAFÍA		78
ANEXO		81
A.....		81
ANEXO		89
B.....		89
ANEXO		95
C.....		95

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1 Resistencias de los bloques y tabiques de uso estructural según la norma NMX-C-404-ONNCCE-2012 13

Tabla 2 Resistencia de los bloques y tabiques de uso no estructural según la norma NMX-C-441-ONNCCE 2012..... 13

Tabla 3 Resultados de las mezclas de Muntohar, 2011 21

Tabla 4 Resultados de las mezclas de El-Mahllawya et. 2014 22

Tabla 5 Resultados de las mezclas de El-Mahllawya et. 2014 23

Tabla 6 Resultados de las mezclas de Maskell, Heath & Walker, 2014..... 23

Tabla 7 Resultados de las mezclas de Diop, Grutzeck & Molez, 2011 24

Tabla 8 Resultados de las mezclas de Kumar, 2015 25

Tabla 9 Resultados de las mezclas de Banupriya et al, 2016..... 26

Tabla 10 Composición química de la cenizas volantes con una prueba de DFX (*Perdidas por calcinación), (Cortés Salmerón, 2016) 35

Tabla 11 Composición química general para las escorias. (Cortés Salmerón, 2016) .. 36

Tabla 12 Resistencia mínima por pieza estructural (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, 2005a)..... 40

Tabla 13 Valores de absorción para ladrillos y bloques(Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, 2005a) 41

Tabla 14 Resistencia a la compresión para piezas no estructurales (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, 2005a) 41

Tabla 15 Absorción para piezas no estructurales (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, 2005b) 41

Tabla 16 Peso Molecular del NaOH 44

Tabla 17 Peso en grs de NaOH para disolver 44

Tabla 18 Dosificación de pastas Cemento 48

Tabla 19 Dosificaciones de las pastas activadas..... 48

Tabla 20 Cantidades de suelo más escoria activada..... 50

Tabla 21 Resultados de la FRX..... 52

Tabla 22 Relación S/A de las muestras..... 53

Tabla 23 Resultados de la caracterización química de las escorias 54

Tabla 24 Porcentaje retenido en la malla 325 (45 micras)..... 55

Tabla 25 Clasificación del suelo 56

Tabla 26 Dosificaciones, resistencia a la compresión y absorción en 24 horas de las probetas de BTC activados 58

Tabla 27 Clasificación de la arcilla proporcionada por la Secretaria de Obras Públicas del Estado de Aguascalientes..... 58

Tabla 28 Resultados de las mezclas mejoradas con el 15% de arcilla, resistencia a la compresión en seco y saturada; absorción en 24 horas..... 59

Tabla 29 Fluorescencia de las probetas suelo-escoria activada, arena y arcilla de los bloques 60

Tabla 30 Minerales observados de las probetas de suelo-escoria activada, arena y arcilla 65

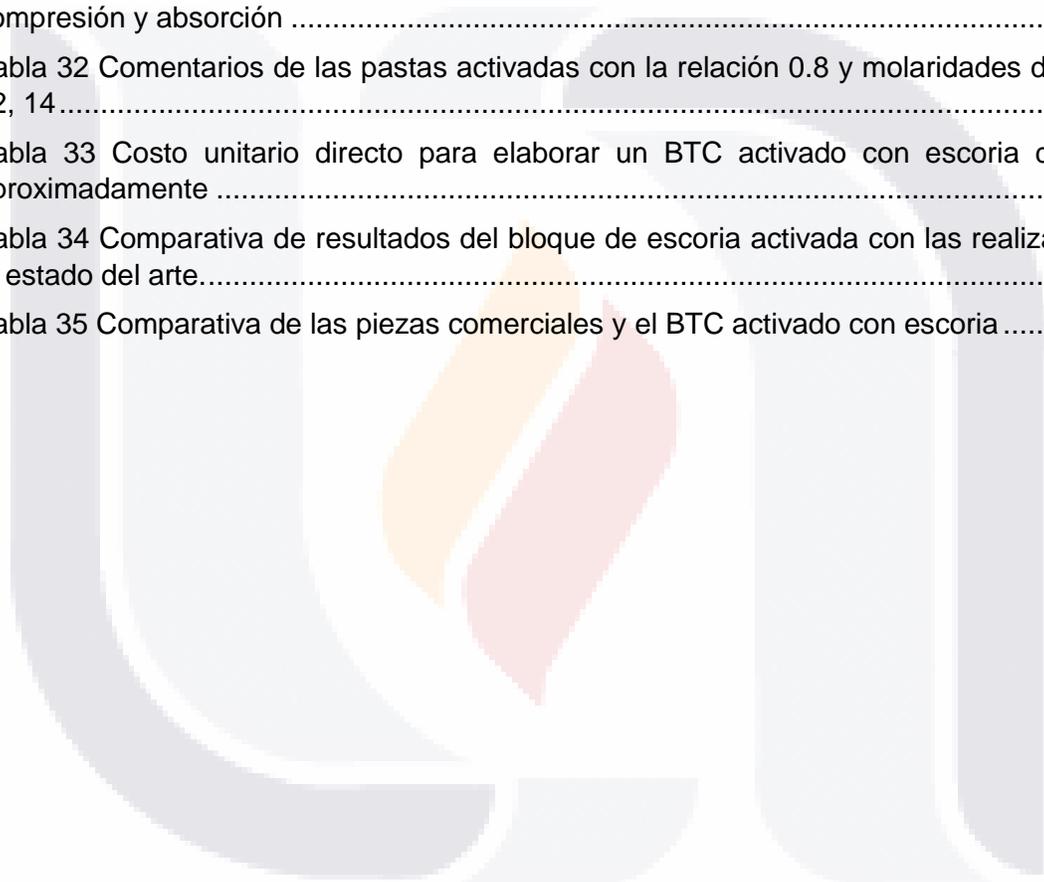
Tabla 31 Dosificación de la probeta de suelo-escoria activada al 23%, resistencia a la compresión y absorción 66

Tabla 32 Comentarios de las pastas activadas con la relación 0.8 y molaridades de 8, 10, 12, 14..... 71

Tabla 33 Costo unitario directo para elaborar un BTC activado con escoria de 7 kg aproximadamente 74

Tabla 34 Comparativa de resultados del bloque de escoria activada con las realizadas en el estado del arte..... 74

Tabla 35 Comparativa de las piezas comerciales y el BTC activado con escoria 75



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Gráfico de la emisiones de CO2 en México. (SEMARNAT 2017)	14
Figura 2 Bloque de tierra compacta con dos perforaciones (http://formublock.blogspot.mx/)	28
Figura 3 Equipo ECO BRAVA, empresa Brasileña fabricantes de equipo para elaboración de BTC. (https://ecomaquinas.com.br/index.php/esp/linha-eco-brava.html)	30
Figura 4 Rocas Ígneas y metamórficas con alto contenido de aluminio y sílice (Zeolita), https://es.wikipedia.org/wiki/Zeolita	31
Figura 5 1) Fase de destrucción del óxido de sílice e incorporación del sodio, unión de la molécula de aluminio y sílice, 2) Condensación de la molécula, formación de enlaces de los iones libres. (Palomo & Fernández-Jiménez, 2011).....	32
Figura 6 Esquema activación, a) interacción escoria-disolución alcalina fijación, b) balanceo de cargas de la molécula y aniones, c) productos de la reacción (Palomo & Fernández-Jiménez, 2011).....	33
Figura 7 Proceso de geopolimerización con sílice y aluminio de origen natural (Davidovits, 1991).....	33
Figura 8 Caolín es su estado natural. (http://ampcyl.blogspot.com/2008/12/caoln.html).....	35
Figura 9 Diagrama de fases ternario del sistema CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ , (Cortés Salmerón, 2016).....	37
Figura 10 Ejemplos básicos de piezas construidas en México (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, 2005a)	40
Figura 11 a) Pulverizador de 10 Hp de discos, b) Quebradora de quijadas de 10 HP y Molino de bolas de 12 lt y 10 Hp. (Fuente propia)	45
Figura 12 Diagrama de flujo de las pastas con escoria y NaOH primera fase. (Fuente propia).....	47
Figura 13 Diagrama de la fase 2 experiemntal para la elaboracion de un BTC. (Fuente propia).....	47
Figura 14 Escorias pulverizadas y molidas hasta un tamaño de 45 micras. (Fuente propia)	52
Figura 15 Gráfica de la difracción de la escoria de LDM. (Fuente propia)	53
Figura 16 Gráfica de la difracción de la escoria de AGS. (Fuente propia)	54
Figura 17 Gráfica de granulometría del suelo de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, (Fuente propia).....	55
Figura 18 Gráfica de la prueba PROCTOR. (Fuente propia)	56
Figura 19 Cubos de pasta activada con relación 0.6 y 0.4 a 1 día. (Fuente propia).....	57
Figura 20 Gráfica de resistencia a la compresión de las escorias activadas y las diferentes relaciones l/s. (Fuente propia)	57
Figura 21 Probetas de suelo-escoria activada que presentaron una resistencia inferior a la norma. (Fuente propia).....	58

Figura 22 Gráfica de resistencia a la compresión de las probetas de suelo-escoria activada+arcilla.(Fuente propia) 59

Figura 23 Gráfica de absorción en 24 horas de las probetas suelo-escoria activada con arcilla. (Fuente propia) 60

Figura 24 Difractometria de las probetas de suelo-escoria activada que superan la resistencia mínima de la norma, 15%,20% y 25% de escoria activada. (Fuente propia)61

Figura 25 Cuantificación de la probeta PCE15CA10. (Fuente propia) 61

Figura 26 Cuantificación de la probeta PCE20CA10. (Fuente propia) 62

Figura 27 Cuantificación de la probeta PCE25CA10. (Fuente propia) 62

Figura 28 Cuantificación del tepetate (Arena). (Fuente propia) 63

Figura 29 Cuantificación de la arcilla adicionada al 10% de las probetas. (Fuente propia) 63

Figura 30 Difractometria de los suelos utilizados para elaborar las probetas (Arena y Arcilla). (Fuente propia)..... 64

Figura 31 Difractometria típica para puzolana aplicada en la probeta PC25CA10. (Fuente propia)..... 64

Figura 32 Difractometria típica para puzolana aplicada en la probeta PC20CA10. (Fuente propia)..... 65

Figura 33 Difractometria típica para puzolana aplicada en la probeta PC15CA10. (Fuente propia)..... 65

Figura 34 Gráfica de la resistencia a la compresión en seco y húmedo. (Fuente propia)66

Figura 35 Absorción de la P23EC10. (Fuente propia) 67

Figura 36 Gráfica Esfuerzo-Deformación unitaria de la mezcla óptima. (Fuente propia)67

Figura 37 Curvas de resistencia de la pasta de 0.8 con diferentes molaridades y comparada con el CPO. (Fuente propia) 70

Figura 38 Pastas activadas a 250°C y curadas a 60°C y 60% humedad. (Fuente propia)70

Figura 39 Probetas de suelo-escoria activada y arcilla, previas al ensayo de compresión. (Fuente propia)..... 72

ACRÓNIMOS

CPO	Cemento Portland Ordinario o similar
BTC	Bloque de Tierra Compacta
FRX	Fluorescencia de Rayos X
DRX	Difractometría de Rayos X
ML	Limos inorgánicos
CL	Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad
SM, SW	Arenas limosas bien y mal graduadas
SiO₃, Si	Óxido de Sílice
AlO₂, Al	Óxido de Aluminio
MPa	Mega-Pascal
NaOH	Hidróxido de Sodio
C-(A)-S-H	Gel Calcio-Aluminio-Sílice-Hidrógeno
K-N-C-(A)-S-H	Gel Potasio-Cloruro-Calcio-Aluminio-Sílice-Hidrógeno
KOH	Hidróxido de Potasio
Na₂CO₃	Carbonato de sodio
CaO	Óxido de calcio
Fe₂O₃	Óxido de hierro
Na₂O	Óxido de sodio
K₂O	Óxido de potasio
TiO₂	Óxido de titanio
MgO	Óxido de magnesio
SO₃	Óxido de azufre
P₂O₅	Óxido de fósforo
l/s	Líquido/Sólido

RESUMEN

Palabras clave: activación alcalina, bloques, estabilización de suelos, escorias, arenas, arcilla, módulo elástico

En el presente trabajo de experimentación, se analizó la incorporación de escorias activadas para fabricar bloques de tierra compactada, evaluando la composición química de las escorias y activándolas con NaOH en concentraciones 8 M, 10 M, 12 M, 14 M; evaluando relaciones l/s de 0.4, 0.6, 0.8, obtenido resultados de 8 MPa hasta 56 MPa a compresión de las pastas activadas de escorias. Se diseñaron mezclas para los bloques de tierra compactada con escoria activada en porcentajes de 5% al 25%, obtenido resistencias de 4 MPa a 12 MPa, con absorciones de agua de 15% en promedio. Se diseñó la mezcla final con 23% de escoria activada, obteniendo un resultado a la compresión de 12 MPa en estado seco y 6.4 MPa estado húmedo con una absorción promedio de 12%. Se realiza la prueba de módulo elástico dando como resultado 379.43 MPa con una deformación unitaria de 0.0263. Un material muy dúctil pero con una resistencia similar a un bloque de concreto.

ABSTRACT

In the present work of experimentation, the incorporation of activated slag was analyzed to make blocks of compacted earth, evaluating the chemical composition of the slags and activating them with NaOH in concentrations 8 M, 10 M, 12 M, 14 M; evaluating l / s ratios of 0.4, 0.6, 0.8, obtained results of 8 MPa to 56 MPa to compression of the activated pastes. BTC mixtures were designed with activated slag in percentages of 5% to 25%, obtained resistances from 4 MPa to 12 MPa, with water absorptions of 15% on average. The final mixture is designed with 23% activated slag; obtaining a compression result of 12 MPa in the dry state and 6.4 MPa wet state with an average absorption of 12%. The elastic modulus test is carried out, resulting in 461.24 MPa with a unit deformation of 0.0263. A very ductile material but with a resistance similar to a concrete block.





CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Prólogo

En la construcción de muros de mampostería para viviendas se han utilizado diversos ladrillos o bloques, desde el adobe tradicional, bloques de concreto o blocks, algunos materiales alternativos como ladrillos de polietileno tereftalado (PET), entre otros. Nuevas técnicas de fabricación han buscado eliminar el uso de los ladrillos de arcilla cocidos y los han reemplazados por bloques de tierra compactada. Los términos más comunes para referirse a ladrillos o bloques de tierra compactada son CEB (siglas en inglés Compressed Earth Brick) o también SCEB o CSE (siglas en inglés de Stabilised Compressed Earth Brick), en español son más conocidos por sus siglas BTC (Bloques de Tierra Compactada). Aunque el impacto es menor que fabricar un ladrillo de arcilla tradicional cocido, es un hecho que utilizar CPO (Cemento Portland Ordinario) como material estabilizante del bloque de tierra compactada, no contribuye a reducir el factor de impacto ambiental, sin embargo, sin un aglomerante no se pueden lograr resistencias especificadas en la norma. Se han buscados materiales alternativos como cementantes, por ejemplo las puzolanas, la ceniza volcánica, la ceniza volante y la escoria granulada que al pasar por un proceso químico generan propiedades mejores o semejantes al CPO de alto desempeño. La activación alcalina y la geo-polimerización son los procesos químicos de este tipo más usados, la aplicación de cada uno de ellos depende de los químicos presentes en las puzolanas, cenizas y escorias como Ca, Si, Al, Mg, entre los más importantes. En la actualidad, se están diseñando BTC de geo-polímeros y mediante activación alcalina de escorias o cenizas volantes. El primer método hacen referencia a la activación del meta caolín o caolín concentraciones naturales de sílice y aluminio, el segundo método es la activación de las escorias o cenizas volantes obtenidas como desechos de metalúrgicas o termoeléctricas son una fuente de sílice y aluminio, pero de manera artificial. En ambos casos, se han generado concretos de alto desempeño y se han estudiado sus propiedades físicas y químicas obteniendo como resultado materiales con altas resistencias en pruebas mecánicas de compresión y flexión.

1.2 Objetivo general

Diseñar un bloque con tierra y escorias metalúrgicas activadas mediante una solución alcalina y someterlo a evaluación frente a la normativa establecida.

1.3 Objetivos Particulares

- A. Realizar un muestreo aleatorio de los bancos de material o depósitos procedentes de desmontes como taludes de la región de Aguascalientes o cercanías, para posteriormente, someterlo a pruebas de clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y determinar si son suelos adecuados (Limo inorgánico de baja compresibilidad (ML o similar) para el desarrollo de bloques de tierra compacta con escoria activada alcalinamente.
- B. Realizar una búsqueda exhaustiva del estado del arte del uso de materiales y variantes del proceso de activación alcalina para el desarrollo de ladrillos.
- C. Utilizar la escoria de fundición de hierro como fuente de aporte de aluminosilicatos. Identificar y clasificar dicho material a través de pruebas de Difracción de rayos X (DRX) y Fluorescencia de rayos X (FRX).
- D. Diseñar la metodología experimental y establecer las variables independientes.
- E. Evaluar los posibles diseños de mezcla y la resistencia de las probetas suelo-activación alcalina con las normas NMX para dar cumplimiento a los estándares nacionales de las propiedades mecánicas físicas de los bloques.
- F. Comparar los resultados de resistencia y absorción del bloque suelo-activación alcalina con los obtenidos por la producción local de ladrillo tradicional y bloques.
- G. Publicar procedimiento y resultados en revistas especializadas para su divulgación científica.

1.4 Alcance

- a) Establecer la metodología para la fabricación de un bloque o ladrillo de suelo-activación alcalina, partiendo de la literatura existente y adecuándola a la zona donde se aplicará. Esto incluye la selección del suelo, las escorias y los activadores alcalinos.
- b) Comparativa estadística de los resultados obtenidos del ladrillo suelo-activación alcalina con los locales.
- c) Se buscará el registro del bloque o ladrillo suelo-activación alcalina como marca, para posteriormente buscar la patente de la fórmula si resultara exitosa y pudiera ser identificada como novedosa.

1.5 Justificación

Las ladrilleras y fabricación de bloques mexicanas se encuentran en su mayoría sin regulación, ya que no tienen sistemas normalizados ni estándares de calidad para la elaboración de su producto. En consecuencia no hay confianza en que se cumplan siempre las resistencias requeridas a compresión y flexión de los ladrillos. La Red de Ladrilleras estima que en México existen 128 empresas en fabricación de ladrillos y bloque (Agencia Suiza para el desarrollo y la Cooperación COSUDE, 2011). Si cada unidad produce un promedio anual de 12,000 piezas, hay un total de 1.536 millones de piezas anuales entre las artesanales y tecnificadas parcialmente. Es un gran mercado que debería encontrarse vigilado por normas como la NMX-C-404-2013 y NMX-C-441-2012, (Tabla 1 y 2), donde se estipulan los parámetros promedio e individual para los ladrillos fabricados en México. Las variaciones entre piezas son notables, teniendo en cuenta su aspecto, dosificaciones y por materiales primarios, sin tomar en cuenta las propiedades mecánicas.

Tabla 1 Resistencias de los bloques y tabiques de uso estructural según la norma NMX-C-404-ONNCCE-2012

Tipo de Pieza	Configuración	Resistencia Media \bar{f}_p Mpa (kg/cm ²)	Resistencia mínima pza f_{pMin} Mpa (kg/cm ²)
Bloque	Macizo	15 (150)	12 (120)
	Hueco	9 (90)	7 (70)
	Multiperforado	15 (150)	12 (120)
Tabique (largo > 300 mm)	Hueco	9 (90)	7 (70)
	Multiperforado	9 (90)	7 (70)
Tabique (largo ≤ 300 mm)	Macizo	11 (110)	7 (70)
	Hueco	9 (90)	7 (70)
	Multiperforado	15 (150)	12 (120)

Tabla 2 Resistencia de los bloques y tabiques de uso no estructural según la norma NMX-C-441-ONNCCE 2012

Tipo de pieza	Configuración	Resistencia media \bar{f}_p Mpa (kg/cm ²)	Resistencia mínima pza f_{pMin} Mpa (kg/cm ²)
Bloque	Macizo o hueco	3.5 (35)	2.8 (28)
Tabique extruido	Macizo o hueco	4.0 (40)	3.2 (32)
Tabique artesanal	Macizo	3.0 (30)	2.4 (24)
Celosía	Cara rectangular	2.5 (25)	2.0 (20)
	Cara no rectangular	2.5 (25)	2.0 (20)

En cuanto al impacto ambiental, los procesos usados en la fabricación de ladrillos y bloques, generan grandes consumos energéticos por los procesos de calcinación o cocción, provocando además emisiones de CO₂ y NO_x principales gases que aceleran el efecto invernadero, propiciando el cambio climático y alta toxicidad al ambiente

convirtiéndose en un riesgo para la salud humana. Por ejemplo, producir una tonelada de cemento genera una tonelada de CO₂, (figura 1). Según el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), la manufactura e industria de la construcción tiene una contribución del 7.6 % de las emisiones totales anuales de gases de efecto invernadero. Ha de considerarse el total de emisiones derivadas del uso de combustibles fósiles para lograr las altas temperaturas, ya sea para el clinkerizado o la cocción industrial de los ladrillos. Por otro lado, debemos tener en cuenta también que la industria del acero es otro foco de emisiones y consumo de recursos naturales. Como resultado de esta industria se obtienen desechos que pueden considerarse peligrosos, no tienen tratamiento alguno y su fin es ser almacenado por un tiempo indefinido. Los residuos principales de la fabricación de acero son la escoria y las cenizas volantes. La diferencia entre ambos es que las cenizas volantes son partículas sólidas pequeñas que necesitan ser atrapadas en un filtro y posteriormente envasadas para su recogida y almacenamiento. Por ser partículas volátiles pueden quedarse suspendidas en el aire por más de 24 h, provocando daños a la salud a quienes operan en esta industria. La escorias es un residuo solido pesado, que suele presentarse en un tamaño variable entre 1 mm y 50 mm, resultado de los materiales secundarios que flotan en el arrabio (hierro con mucho carbono) o en el acero líquido por tener menos densidad que estos.

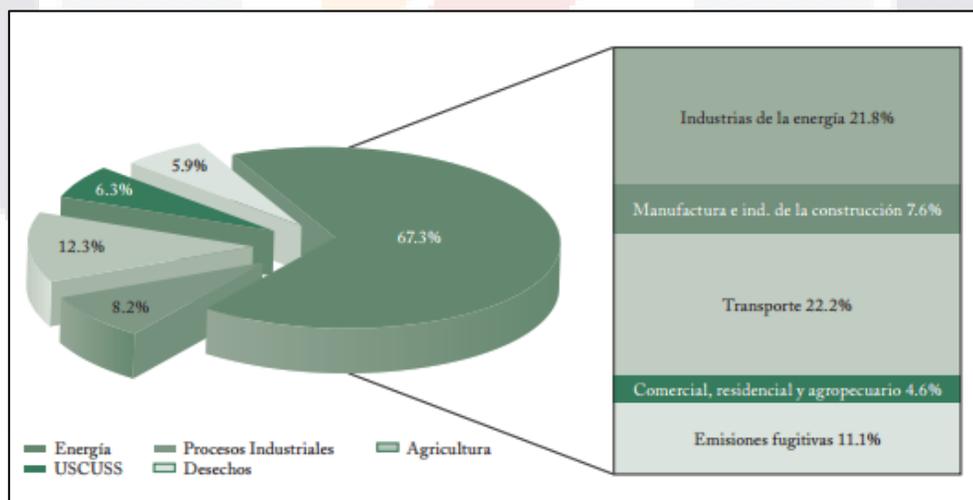


Figura 1 Gráfico de la emisiones de CO₂ en México. (SEMARNAT 2017)

De acuerdo a lo presentado anteriormente, los principales retos son la reducción de las emisiones de CO₂, los gastos energéticos por calor y la reutilización de desechos (SEMARNAT, 2017). La Gaceta Oficial de la Federación, determinó algunas escorias y desechos dentro de la industria metalúrgica son susceptibles de ser reutilizados.

Si estos desechos se pueden utilizar en algún proceso para poder reincorporarlos a un ciclo de construcción como, los ladrillos, se estaría reduciendo significativamente los volúmenes de depositados en bodegas o en los vertederos clandestinos. Si al generar un proceso químico de reacción se pudiera activar el cementante que se encuentra inerte en la escoria, se podrían generar ladrillos más resistentes y duraderos, se eliminaría el proceso de cocción y se reduciría el consumo de CPO utilizado en la fabricación de ladrillos. Por lo tanto, se generaría un ladrillo que cumple con las tres partes de sostenibilidad: tendría un impacto ambiental mucho más bajo, se reducirían las emisiones de CO₂ y la acumulación de residuo industrial y sería más económico, además de cumplir con los parámetros de las normas establecidas.

En la situación actual de los BTC estabilizados con alguna activación alcalina se encuentra en la fase de experimentación, es decir, no hay una metodología como base y parámetros en la dosificación de las mezclas considerando que este factor dependerá de la región donde se realiza el estudio.

1.6 Hipótesis

Las hipótesis de partida, presentadas en forma de pregunta son:

- ¿Se podría utilizar la capacidad cementante de una escoria activada alcalinamente para sustituir un estabilizador comercial (CPO) un BTC?
- ¿Se podrá obtener una resistencia a la compresión similar o mayor a los ladrillos de adobe y los BTCS?
- ¿El uso de la escoria activada mejorará las propiedades de un BTC en comparación con los actuales?

Se inicia del diseño de un BTC, donde se utilizan CPO o materiales naturales para estabilizar la mezcla. Al sustituir el material estabilizante por uno activado alcalinamente, se espera que los resultados sean similares o mejores a los tradicionales. Esto favorece al costo de fabricación y a la calidad esperada de un BTC o ladrillo de adobe.

1.7 Metodología

La ejecución del trabajo se basará en un diseño experimental cuantitativo, realizando pruebas de laboratorio, representaciones estadísticas de resultados y comparativas de los mismos.

Se consideran las siguientes variables básicas.

- Características físicas del suelo.

- Características físicas de la escoria metalúrgica y su composición química.
- Molaridad de la solución alcalina.
- Índice de relación l/s (relación de la pasta cementante activada alcalinamente).
- Tiempos de curados de la pasta (a 1, 3, 7 y 14 días) y rango 40-60% de humedad durante el tiempo de curado.
- Dosificación EA/S (escoria activada/suelo).

Selección y clasificación de los materiales:

Suelo de origen local: Tepetate (nombre local para los macizos de suelo), clasificado por el SUCS como SM, arena limosa. Se determinarán pesos volumétricos, absorción de humedad, humedad óptima y granulometrías. Se podrá agregar una fracción de suelo fino (arcilla) para confinar poro.

Escoria Metalúrgica: Se realizará un sondeo de las fundiciones de alto horno de hierro de la zona para determinar cual contiene la concentración óptima de SiO_3 y AlO_3 por medio de pruebas de espectrometría de masas, FRX y DRX. La recolección será de forma manual en el vertedero de la fundidora, se definirá una manera física para la selección de la escoria de alto horno (Granulated blast-furnace slag GBFS).

Solución Química Activadora: NaOH es el reactivo que activará la fuente de aluminosilicatos, disolviéndose en agua para posteriormente agregarlo a la mezcla del suelo.

Determinación de la proporción molar de la solución alcalina:

Establecer diversas proporciones molares en la relación NaOH/escoria (l/s).

Se analizarán las mejores relaciones de solución en función a su comportamiento físico.

Moldes para pastas: Se utilizarán cubos de 5cmx5cmx5cm, para determinar la resistencia de la pasta a diferentes proporciones molares y días de curado.

Determinar la proporción de las dosificaciones de suelo/escoria.

Moldes: Basándose en la norma para ensayos a compresión se puede utilizar probetas que tengan una relación 1:2 (base y altura). Se utilizarán moldes de 10 x 20 cm. Si no se contara con estos moldes se utilizaría el molde de la prueba PROCTOR con medidas 10 ± 1 cm de diámetro y 15 ± 1 cm de altura, para la fabricación de las probetas.

Se tomará un rango de compactación de 120-150 kg/cm^2 de presión para generar el confinamiento.

Para la determinación del volumen y proporción de mezcla, se probará con una relación del 5 % a 50 % de escoria dejando la fracción de suelo se dejará intacta al 100%, es

decir, el volumen de mezcla será de 105 % a 150 % del volumen de la masa final compactada y activada.

Pruebas de laboratorio

- ❖ Laboratorio Químico
 - Difracción de rayos X (XDF)
 - Fluorescencia de rayos X (XRF)
 - Espectrometría RAMAN
 - Caracterización química de la escoria
- ❖ Laboratorio de Ingeniería Civil.
 - Análisis del suelo a utilizar (clasificación)
 - Activación alcalina de la escoria con las molaridades y relaciones l/s.
 - Elaboración de pastas y probetas suelo-escoria
 - Ensayos de resistencia a la compresión
 - Ensayos de absorción
 - Modulo elástico del material

Se establecerá la metodología para la fase experimental, así como la identificación de las variables independientes y dependientes.

1.8 Narrativa por capítulos

CAPITULO I

En el primer capítulo, se presenta la introducción general a la tesis. Se define el tema de estudio y se sitúa en el contexto general de investigación en que se desenvuelve. Enseguida se plantea cuál es el objetivo general de estudio y se definen los objetivos particulares así como los alcances del mismo. Por último se describe la metodología de trabajo, posibles resultados y la estructura de la fase experimental.

CAPITULO II

En este segundo capítulo se muestra un panorama general del estado actual del conocimiento situando al lector en el contexto de los estudios referentes al tema de activación alcalina y bloques de tierra compactada estabilizados con algún tipo de activación. Se muestran los resultados de diversas investigaciones que dan pauta al trabajo de laboratorio que se desarrollará durante el trabajo de investigación.

CAPITULO III

En este capítulo se presenta el marco teórico necesario para el desarrollo de los experimentos, se hace referencia a los conceptos y teorías de la activación alcalina,

bloques estabilizados y normativa que se utilizarán en el desarrollo y evaluación de los resultados del trabajo.

CAPITULO IV

En este capítulo se presenta la metodología a utilizar, establecida en dos fases; la primera fase considera la activación de las escorias, así como su selección, preparación y pruebas físico-químicas, que darán como resultado su uso como material estabilizante. La segunda fase tiene contemplado el diseño y fabricación de probetas de suelo-escoria, evaluando sus propiedades físico-químicas y comparando esos resultados ante la normativa vigente.

CAPITULO V

En el capítulo cinco se muestran los resultados de la campaña experimental, primero el resultado químico de la escorias como son las FRX y las DRX, la dosificación de pastas activadas y el resultado a compresión simple. En segundo punto el resultado a la compresión y absorción de los BTC^S, el análisis químico (FRX, DRX) y el diseño de la mezcla óptima que garantice valores dentro de la norma. También se muestra el resultado del módulo elástico de la probeta óptima.

CAPITULO VI

En este capítulo se realiza la discusión de resultados, realizando las comparativas correspondientes, para las pastas de escoria activada se comparan con pastas de CPO, para las mezclas de BTC se comparan con valores físicos de la norma y piezas de mampostería comerciales. Se realiza una comparativa del costo aproximado de una pieza de BTC activado con las piezas comerciales.

CAPITULO VII

En el capítulo siete se presentan las conclusiones de la tesis y se plantean posibles líneas de investigación futura, identificadas durante la realización de ésta investigación.



CAPÍTULO

II

ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

CAPITULO II: ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

2.1 Bloques estabilizados con cal, cemento, Geopolímeros y activados alcalinamente

(Hall, Lindsay, & Krayenhoff, 2012, p. 222) estudiaron el comportamiento de los bloques estabilizados con cal, cemento y aglomerantes. La técnica de estabilización con óxidos de calcio y magnesio sean utilizando para construir carreteras y aeropuertos, mostrando un buen comportamiento mecánico y duradero. En la antigüedad el templo Horyuji en Japón, fue edificado con tierra compactada y estabilizada con cal entre los 607-750 AD, es una evidencia del potencial de la mezcla. La resistencia de las mezclas del cal hidratada y suelo, oscilan de 0.3 MPa a 10 MPa en un periodo de 28 días de curado. La razón de estos resultados es el bajo pH de la cal hidratada (pH 12) y la composición química del suelo, que presenta una fuente de aluminosilicatos y otros óxidos como Al, Si, Fe, Mg, Mn y Ca (Aluminio, Sílice, Hierro, Magnesio, Manganeso y Calcio), generan una activación alcalina que puede ser de muy reactiva o muy poco reactiva dependiendo de la naturaleza del suelo. La fabricación de bloques estabilizados con cal y puzolanas, curados a vapor con 80°C de temperatura, presentaron una resistencia a la compresión de 10 MPa como media con solo 3 días de curado.

(Morales-Domínguez, Ortiz-Guzmán, & Alavés-Ramírez, 2007) realizaron adobe compactado (Bloques de tierra compactada) sin estabilizar y estabilizados con CPO con variaciones de cemento del 2 al 16% respecto a la masa del bloque. Se sometieron a pruebas de compresión, flexión y absorción obteniendo como resultados que la mezcla estabilizada con el 8% de cemento presenta resistencias a la compresión de 7 a 8.3 MPa con un tiempo de curado de 28 días, es el valor medio solicitado por la norma (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, 2005a). La resistencia a la flexión con el 8% de cemento fue de 0.716 MPa, se considera que la mezcla es la óptima por presentar resultados dentro de norma y no eleva el costo de fabricación. Las pruebas de absorción de agua por durante 24 horas mostraron una tendencia de 14 y 16 %, observando el resultado el % de cemento no disminuye la absorción. Las pruebas de adherencia mostraron que los morteros de cemento-suelo en proporciones 1:2 y 1:3 ofrecen mejor adherencia de las piezas en promedio 0.4 MPa.

(Pacheco-Torgal, Lourenco, Labrincha, Kumar, & Chindaprasirt, 2012) realizaron una comparación de estudios sobre bloques de tierra estabilizada con CPO, encontrando una resistencia de 0.6 a 8.3 MPa, siendo lo más común entre 0.8 y 3.5 MPa, estos valores son aceptados por los documentos nacionales que oscilan entre 1.2 y 2.1 MPa (Illampas et al, 2014). Por los tanto son aceptables.

(Muntohar, 2011) estudio los bloques de tierra compactada y estabilizada con cal y ceniza de cascara de arroz, mezclada con arena y arcilla, la primera con un 100% de arcilla y la segunda con 30% arena y 70% arcilla, con una relación de cal y ceniza de cascara de arroz de 1:1, 1:2, 1:3, 2:1 y 3:1; se fabricó un espécimen de 230 mm de largo por 110 mm con una altura de 55 mm. Para la prueba de flexión se fabricó una viga rectangular de sección 150 mm x 150 mm x 600 mm. El cálculo de las cantidades de material se utilizó el peso máximo seco compactado y la humedad optima, por medio de la prueba proctor para suelos. La presión para compactar se aplicó con una maquina automática registrando una presión de 15 MPa. El curado se realizó por 28 días y recubiertos con una membrana plástica a una temperatura constante de ± 30 °C. Los resultados se presentan en la tabla 3.

Tabla 3 Resultados de las mezclas de Muntohar, 2011

Limo; Relación Ceniza C. Arroz	Seca		Húmeda		Perdidas por esfuerzo	
	Arcilla	Arcilla-arena	Arcilla	Arcilla-arena	Arcilla	Arcilla-arena
0	13.3	11.2	-	-	-	-
1:3	16.7	14.9	10.4	12.0	38	20
1:2	18.1	17.7	11.8	15.1	35	15
1:1	20.7	18.6	15.5	16.1	25	13
2:1	17.3	16.6	14.8	15.2	15	9
3:1	15.4	13.0	13.8	12.4	11	5

(Oti, Kinuthia, & Bai, 2009) realizaron estudios de ladrillos de arcilla estabilizados con cal y escorias granuladas de alto horno sin cocción, esto para reducir el costo de fabricación. Las variables de las mezclas fueron L1 cal viva y L2 cal hidratada mezcladas con las escorias granuladas de alto horno y la arcilla, y de control se realizó una mezcla adicional con cemento portland y las escorias. El porcentaje de cal viva fue de 1.5-3% y para la cal hidratada fue de 1.5%, para el CPO se utilizó el 1.4%, la presión para compactar las mezclas fue de 15 MPa aplicada con medios hidráulicos, las mezclas se identificaron como LG1, LG2, PG1 y PG2, obteniendo los siguientes resultados para las mezclas LG1, la resistencia promedio fue de 2.5 MPa, 3.6 MPa, 6.5 MPa y 7.1 MPa, con 7, 28, 56, 90

días de curado respectivamente. Las mezclas LG2, la resistencia promedio fue de 2 MPa, 3.5 MPa, 5.7 MPa y 6 MPa, con 7, 28, 56, 90 días de curado respectivamente. La mezcla PG1, la resistencia promedio fue de 1.8 MPa, 3.4 MPa, 4.9 MPa y 5.8 MPa, con 7, 28, 56, 90 días de curado respectivamente. La mezcla PG2, la resistencia promedio fue de 1.6 MPa, 3.2 MPa, 4.7 MPa y 5.5 MPa, con 7, 28, 56, 90 días de curado respectivamente. La mezcla que mejor comportamiento presento fue la LG1 con el 1.5 % de cal y 5.5 % de escoria granulada de alto horno. La absorción para todas las mezclas oscilo en un rango del 17 a 22 %.

(El-Mahllawy & Kandeel, 2014) estudiaron las propiedades mineralógicas e ingenieriles de los bloques estabilizados con montmorillonita sin cocción. Las mezclas se diseñaron con arena y arcilla en porcentaje 15% y 55- 75% respectivamente, para el estabilizador se empleó CPO y cal viva. AM0 se empleó 0% de CPO, 0% de cal viva, 15% de arena, 75% arcilla y la relación liquido-sólido fue de 0.35, AMI se empleó 0% de CPO, 30% de cal viva, 15% de arena, 55% de arcilla y la relación liquido-sólido de 0.40, AMII se empleó 10% CPO, 20% de cal viva, 15% de arena, 55% de arcilla y relación liquido-sólido de 0.44 y AMIII se empleó 15% de CPO, 15% de cal viva, 15% de arena, 55% de arcilla y relación liquido-sólido de 0.5.

Los resultados de compresión se presentan en la tabla 4 y en la tabla 5 los resultados de absorción y densidad seca.

Tabla 4 Resultados de las mezclas de El-Mahllawya et. 2014

Tipo de curado	Resistencia a la compresión en seco (MPa)						Resistencia a la compresión en húmedo (MPa)					
	Roció			Húmedo			Roció			Húmedo		
Tiempo de Curado (Días)	7	28	90	7	28	90	7	28	90	7	28	90
Mezcla AMI	1.1	2	2.9	3.7	6	6.5	N/R	N/R	N/R	2	4.9	5
Mezcla AMII	1.8	2.6	3.5	4.9	6.9	7.3	N/R	0.5	0.75	2.2	5.3	5.6
Mezcla AMIII	2.1	3.1	4.1	5.8	7.1	8.1	0.7	1	1.1	3.2	5.9	6.5

El curado más efectivo fue el húmedo, favoreciendo a todas las mezclas en compresión y absorción, la mezcla que mejor comportamiento obtuvo fue la AMIII. El activador fue la variable que intervino en la activación de las escorias con la arcilla.

Tabla 5 Resultados de las mezclas de El-Mahllawya et. 2014

Tipo de curado	Absorción (%)						Densidad seca (gr/cm ³)					
	Roció			Húmedo			Roció			Húmedo		
Tiempo de curado (Días)	7	28	90	7	28	90	7	28	90	7	28	90
Mezcla AMI	N/R	N/R	N/R	18	12	10.5	1.27	1.3	1.32	1.27	1.32	1.47
Mezcla AMII	26.5	24.5	21	15	11	9.5	1.3	1.34	1.363	1.36	1.41	1.5
Mezcla AMIII	23	20	18	12	10	9	1.33	1.36	1.42	1.4	1.46	1.52

(Maskell, Heath, & Walker, 2014) experimentaron con los Geopolímeros, la mezcla entre el NaOH y un suelo limo-arenoso con una arcilla de baja plasticidad según la BS5930:1999. La proporción de las mezclas fue sin estabilizar, 3% NaOH, 5% NaOH, 1% NaOH+ 4% Na₂O.2SiO₃, 3% NaOH+ 15% Na₂O.2SiO₃, 5% NaOH+ 15% Na₂O.2SiO₃ y 5% NaOH+ 20% Na₂O.2SiO₃. Se utilizaron dos métodos de curados el primero a 21°C y 60% humedad relativa durante dos días, posteriormente se desmoldaron se mantuvieron esas condiciones y el segundo a 105°C sin humedad durante dos días, posteriormente se desmoldaron y se mantuvieron a las condiciones del primer método. Los resultados se muestran en la tabla 6.

Tabla 6 Resultados de las mezclas de Maskell, Heath & Walker, 2014

T°. Curado	Resistencia a la compresión en seco (MPa)		Resistencia a la compresión en húmedo (MPa)		Densidad seca (kg/m ³)
	20°C	105°C	20°C	105°C	
Sin estabilizar	1.6	1.25	N/R	N/R	Promedio 1825
3% NaOH	1.4	2.2	N/R	0.12	1875
5% NaOH	0.9	2.5	N/R	0.07	1830
1% NaOH+ 4% Na₂O.2SiO₃	2.3	6.2	N/R	N/R	1845
3% NaOH+ 15% Na₂O.2SiO₃	0.2	7.7	N/R	0.16	1815
5% NaOH+ 15% Na₂O.2SiO₃	2.1	6.8	N/R	0.02	1925
5% NaOH+ 20% Na₂O.2SiO₃	2.1	10.3	N/R	0.05	1980

El mejor curado se obtiene con una temperatura 105°C, mostrando mejores resistencias a la compresión en seco, al realizar el mismo ensayo pero en húmedo existen grandes pérdidas por la saturación del material. No existen datos de absorción.

(Diop, Grutzeck, & Molez, 2011) trabajaron con activación de arcillas (Geopolímeros) con NaOH en concentraciones molares de 4, 8 y 12 molar, las arcillas que utilizadas están en la zona de Senegal, Niemenike, la primer arcilla al natural y la segunda con un pretratamiento térmico de 500-700°C por una hora. La dosificación se realizó con una relación liquido/sólido de 0.25, una 80% de arcilla y un 20% de disolución. Para el curado se utilizaron dos temperaturas 40°C/60% humedad relativa y 120°C/0% humedad relativa en cada caso se curó a tiempos cortos y tiempos prolongados. Se compactaron con una fuerza promedio de 10 MPa. Los resultados se muestran en la tabla 7.

Tabla 7 Resultados de las mezclas de Diop, Grutzeck & Molez, 2011

	Resistencia a la compresión temprana (MPa) promedio			Resistencia a la compresión periodos largos (MPa) promedio		
Molaridad	4	8	12	4	8	12
Niem	4	5.1	6.4	6.2	11.1	16
Niem C	3.6	8.3	13.2	2.5	8	11

Se observa una resistencia temprana y un comportamiento de fraguado rápido, a tiempos prolongados existe un incremento de la resistencia.

(Puertas, 1995) realizó estudios sobre las escorias activadas alcalinamente, según su composición química se puede determinar que activador funciona mejor. La superficie específica de contacto debe estar en un rango 4000-5500 cm²/g, para que genere una reacción óptima de las gelenitas y akermanita. Las pastas revisadas logran resistencias en el rango de 60-150 MPa, en tan solo un día se pueden registrar resistencias de 30-35 MPa. Las relaciones liquido/sólido deben estar en un rango de 0.2-0.4 para lograr estas resistencias.

(Kumar, 2015) investigó la activación de cenizas volantes activadas con NaOH mezcladas con arena de río, adicionando humo de sílices (silicato de sodio) para darle mejor trabajabilidad a las mezclas. El tamaño de los bloques estabilizados fue 200mm x 200m x 400mm. La proporción utilizada fue 1:1.5 de arena y ceniza volante; 1:2 de arena y ceniza volante. La relación liquido/solido fue del 0.46. La relación del NaOH y el humo de silice fue de 1:2.5, para todas las mezclas. El proceso de curado por rociado durante 14 y 28 días, posteriormente secados al sol. Los resultados se muestran en la tabla 8.

Tabla 8 Resultados de las mezclas de Kumar, 2015

Mezcla	Resistencia a la compresión en seco (MPa)			Absorción en 24 horas (%)
1:1.5	1.766	2.35	4.71	14.41
1:2	1.75	2.65	14.4	13.68
Tiempo Curado (días)	7	21	28	

(Cortés Salmerón, 2016) realizó estudio de la síntesis de activación alcalina de escoria de acero, con una concentración molar de NaOH de 10M, con una relación liquido-sólido en un rango de 0.35 a 0.41. La temperatura de pre curado fue de 40 y 20°C, para la primera el tiempo fue de 48hrs y la segunda de 168 horas. El curado fue al exterior con temperatura ambiente no controlada. Los resultados a la compresión promedio fueron 19.42 MPa a 3 días, 22.76 MPa a 7 días, 19.07 MPa a 14 días, 23.93 MPa a 28 días y 25.59 MPa a 90 días. La pérdida de resistencia se puede deber al curado en el exterior. La formación de mineralógica en las mezclas, fue marcada por el cuarzo, hidrotalcita, calcita, C-A-S-H (hidroaluminosilicato de calcio) y akermanita.

(Fernández-Jiménez, Puertas, & Fernández-Carrasco, 2006) evaluaron diferentes activadores para las escorias españolas con una naturaleza básica, los activadores utilizados fueron H₂O (agua des ionizada), Ca (OH)₂ (cal hidratada), NaOH (hidróxido de sodio), Na₂CO₃ (carbonato de sodio) y CaSO₄·2H₂O (sulfato de calcio hidratado) con una concentración molar 0, 3.5x10⁻³M, 1M, 2M y 3x10⁻³M respectivamente. La activación que mejor reacción en su fase calorífica, fue con el activador carbonato de sodio, seguida por el hidróxido de sodio. Las mejores resistencias mecánicas a 7 días se presentaron con el carbonato de sodio con un valor de 30 MPa, a 28 días con el carbonato de sodio con un valor de 40 MPa y a 112 días con el carbonato de sodio con un valor de 45 MPa. Para todos los especímenes se utilizaron moldes de 1 x 1 x 6 cm, se mezcló con una arena de naturaleza sílicea con una relación 2/1 de arena/escoria y con relación liquido-sólido de 0.35. El curado en general fue a 25 °C con una humedad relativa de 99%.

(Banupriya et al., 2016) indagó en la fabricación de concretos activados alcalinamente o geopolimérico. Dividió su metodología en concretos y ladrillo/adoquines, para el diseño de mezclas de concreto utilizó el criterio del ACI-211.1 utilizando disoluciones 5M NaOH. En la tabla 9 se muestran las mezclas y resultados CE (ceniza volante) y E (escoria

granulada). Los resultados son superiores con diferencia con la resistencia de una ladrillo rojo cocido, que oscila entre 7 y 10 MPa.

Tabla 9 Resultados de las mezclas de Banupriya et al, 2016

SN°	Mezcla %	Resistencia a la compresión en 28 días /MPA	Aplicación sugerida
FAB1s	80% CE,20%E	14	Ladrillo geopolimérico
FAB2s	75%CE,25%E	15	Ladrillo geopolimérico
FAB3s	70%CE,30%E	16	Ladrillo geopolimérico
FAB34s	65%CE,35%E	19	Ladrillo geopolimérico
GGB1s	80%E,20%CE	54	Adoquín pavimento
GGB2s	75%E,25%CE	60.5	Adoquín pavimento
GGB3s	70%E,30%CE	44.8	Adoquín pavimento
GGB4s	65%E,35%CE	43.56	Adoquín pavimento





CAPITULO III: MARCO TEÓRICO

3.1 Bloques de Tierra Compactada

Los bloques de tierra comprimida (BTC) tienen varias ventajas: es una tecnología de construcción amigable con el ecosistema (Muntohar, 2011), es superior a las construcciones hechas a base de concreto y madera, en términos de beneficios a la salud, accesibilidad, durabilidad y eficiencia energética. La tecnología de BTC es una mejora de los antiguos métodos de construcción con tierra, los BTC son hechos de arcilla, arena y un pequeño porcentaje de cal y/o cemento comprimido por la máquina. Los beneficios de los BTC, especialmente en comunidades de bajos ingresos y comunidades marginadas, que son muchos (Kumar, 2015). La tierra es abundante, adecuada y los bloques pueden ser comprimidos con prensas de acción manual a bajo costo. La salud, comodidad y durabilidad que ofrecen las construcciones hechas con BTC son superiores a las hechas con bloques de concreto o ladrillos cocidos, que son las construcciones que predominan en las áreas rurales del sur del planeta. Debido a su masa térmica, los hogares hechos con BTC proporcionan un sistema natural de calentamiento y enfriamiento, incrementando el confort para sus habitantes. El BTC surge como una alternativa para retomar el uso del suelo como material de construcción (Figura 2), debido a que presenta mejores características mecánicas, al mejorar el proceso de fabricación y propiedades estructurales gracias a la compactación (Hall et al., 2012) pero requiere de estudios y experimentación para mejorar su calidad. No son tóxicos, son amigables al ambiente, renovables, aislantes del sonido, a prueba de fuego, incluso a prueba de balas, los bloques de tierra comprimida son un material de construcción increíble. Estos bloques o ladrillos poseen encajes como un lego, lo cual hacen su fácil colocación (no requieren de mano de obra cualificada) y a su vez solo necesitan una pequeña porción de mortero para pegarlos. Contribuyendo de esta manera a un ahorro hasta de un 50% en la construcción (Hall et al., 2012).



Figura 2 Bloque de tierra compacta con dos perforaciones (<http://formublock.blogspot.mx/>)

Selección de suelo

El suelo utilizado comúnmente en la fabricación de BTC, debe ser un suelo mixto (Delgado & Guerrero, 2006; Hall et al., 2012; Morales-Domínguez et al., 2007; Pacheco-Torgal et al., 2012) para poder ser triturado, cribado y prensado o apisonado, el contenido de arena debe ser mayor al 33% o entre un rango de 60-80% del total del suelo, la presencia de finos para generar la cohesión necesaria para el desmolde y colocación en almacenaje debe estar compuesta de arcilla y limo, debe ser menor al 30% o entre un rango de 10-30% del total del suelo. Dentro de la clasificación de suelos, la carta de plasticidad determina, al igual que la granulometría, la presencia de suelos limosos, arcillosos o mixtos, los parámetros de límite líquido y plásticos son los que determinan la presencia de estos suelos, el límite líquido debe ser menor a 40% y el límite plástico debe estar en un rango de 12-20%, el índice plástico es el resultado de los límites anteriores y este debe estar entre 6-22%. Teniendo en cuenta estos parámetros se puede determinar qué tipo de suelo tenemos y valorar su aplicación en la fabricación del BTC.

Estabilizador de BTC

El material estabilizante de los BTC por origen es la cal (Hall et al., 2012; Pacheco-Torgal et al., 2012), la incorporación del cemento o materiales aglutinantes bituminosos son relativamente recientes. El contenido de cementante en la fabricación de un BTC se puede estimar en un porcentaje de la masa total del suelo y haciendo el balance de pesos para no superar el 100% del BTC (Gaviria, Nallive, Bedoya Montoya, & Gómez Eusse, 2012; Morales-Domínguez et al., 2007; Pacheco-Torgal et al., 2012). El mejor cementante para lograr la mayor resistencia es el CPO o CPC 30R (Compuesto resistencia máxima a 28 días de 30 MPa) en porcentajes desde un 5% hasta un 15%, esto para lograr la resistencia a la compresión mínima de la norma, esta depende del lugar de fabricación del BTC, en México NMX-404-C-ONNCEE 2005 solicita una resistencia mínima por pieza de 7 MPa a 28 días para este tipo de piezas, con las normativa Europea o Brasileña donde también se elaboran BTC los valores mínimos son de 5 MPa a 28 días, esto se adjudica que existe más tiempo usando estos elementos y un control más riguroso.

Compactación y curado de los BTC

Además de la selección del suelo, el compactado o prensado es clave para la fabricación. Una prueba común para determinar el porcentaje de humedad para lograr la mejor compactación, consiste en recoger una porción de suelo humedecido y apretarlo con la mano si el material se rompe o se hace polvo le falta más humedad y si por el contrario

tiene un comportamiento plástico y se aprecia el agua tiene un exceso de humedad. En laboratorio se realiza la prueba PROCTOR modificada, consiste en recoger 5 kg de material previamente disgregado y homogenizado, se incorpora el agua gradualmente y se va compactando en un molde a 25 golpes, se obtiene una fracción pesada del suelo compactado y se seca en horno a $\pm 100^{\circ}\text{C}$, para determinar la humedad, se detiene la prueba cuando el material se observa con exceso de humedad. Con los datos de cada fracción de suelo con su respectiva húmeda se realiza una gráfica para obtener la húmeda óptima del suelo para compactarse. Se debe controlar la humedad del suelo en estado natural para realizar un balance del agua que se incorpora a la mezcla del BTC. El medio más usual para la compactación del BTC son prensas hidráulicas o de palanca, comercialmente existen maquinas que por medio de presión hidráulica (figura 3) compactan el material a bajas presiones ya que la carga total de compactación oscila en un rango de 6 a 8 toneladas fuerza.



Figura 3 Equipo ECO BRAVA, empresa Brasileña fabricantes de equipo para elaboración de BTC. (<https://ecomaquinas.com.br/index.php/esp/linha-eco-brava.html>)

Las prensa de palanca no controlan la presión de compactación y son más caseras, por tal motivos a nivel comercial e industrial no son muy usadas, su uso es más casero o de autoconstrucción.

Las mejores presiones para compactar cualquier tipo de suelo, pero especialmente los suelos con presencia de granos gruesos y poca arcilla, deben estar en un rango entre 60 y 100 kg/cm², (Oti et al., 2009).

El curado dependerá del cementante, si se usa un CPO, se debe realizar al primer día de fabricación, ya sea en cámaras con control de humedad y temperatura (80% humedad y 25°C) o en bodegas cerradas donde el BTC se rocié al menos 2 veces al día con agua. El tiempo de curado mínimo debe ser de siete días (Hall et al., 2012; Morales-Domínguez et al., 2007).

3.2 Definición de activación alcalina

En los años cincuenta del pasado siglo se iniciaron las investigaciones del efecto de la presencia de sustancias como el sílice y el aluminio inertes en la escoria de alto horno. Así, se obteniendo como resultado materiales cementantes como el CPO, pero sin proceso de clinkerización de la caliza y con ventajas en el manejo del cementante como el calor de hidratación menor y la reducción en la penetración de fluidos a la mezcla endurecida. Glukhovsky (V.D. Glukhovsky, 1965), estableció una definición de la activación alcalina como la formación de cadenas de silicatos amorfos con estructura tridimensional similar a la de las zeolitas (figura 4).



Figura 4 Rocas Ígneas y metamórficas con alto contenido de aluminio y sílice (Zeolita), <https://es.wikipedia.org/wiki/Zeolita>

La activación alcalina es un proceso donde la fuente de aluminosilicatos se hace reaccionar con una disolución concentrada de un material alcalino. Se ha realizado con disoluciones concentradas de NaOH, KOH, Na₂CO₃ y mezclas de Na₂SiO₃/NaOH.

El proceso de activación se resume en las etapas ilustradas en la figura 5 y 6. Al inicio, los aluminosilicatos de las escorias sólidas se disuelven con el álcali; las escorias interactúan con los silicatos del activador, en caso de que éste sea una mezcla de Na₂SiO₃ y NaOH. Tras la reacción inicial, procede la fase estable (nucleación del gel),

Partiendo de lo expuesto anteriormente, se han investigado las propiedades de los Geopolímeros cerámicos como una alternativa en la construcción, considerando su incorporación en concretos, estabilizadores de suelo, aditivos, bloques, etc. El mecanismo general de activación de un geopolímero, divide el proceso de activación en tres etapas diferenciadas: destrucción-coagulación, coagulación-condensación y condensación-cristalización, profundizando en el conocimiento de la síntesis de la zeolita para explicar el proceso de geopolimerización, según las teorías de Glukhovsky. Esto se logra formar por medio de una geo síntesis o geo química utilizando la caolinita activada mediante una solución alcalina.

3.4 Diferencia entre geo polimerización y activación alcalina

Realizando una comparativa de los esquemas de activación alcalina (figura 5) y geopolimerización (figura 7) el resultado es generar geles que fortalezcan la resistencia de un material haciendo más fuertes sus cadenas de monómeros. Al realizar una reacción química siempre se generan residuos, esto pasa con la activación alcalina y la geo polimerización, aquí su diferenciación. La geopolimerización al utilizar como materia base la caolinita, meta caolinita, filosilicatos o zeolitas naturales (García Mejía, 2012) (García Lodeiro, 2008; Hawa, Tonnyopas, & Prachasaree, 2014), libera como residuo un porcentaje de agua en pequeñas cantidades. Una activación alcalina libera con otras fuentes de aluminosilicatos (Cortés Salmerón, 2016; Fernández-Jiménez et al., 2006), en presencia de Fe, Mg y Ca, pequeñas porciones de ácidos básicos, CO₂ y agua. Comparando con los residuos de un clinkerizado o una cocción es mucho menor. El resultado de ambas son polímeros que a temperaturas entre los 100- 250°C, ofrecen resistencias tempranas superiores a los 20 MPa solamente en horas.(Fernández-Jiménez et al., 2006; Palomo & Fernández-Jiménez, 2011; Puertas, 1993)

3.5 Fuentes de aluminosilicatos

El origen de las fuentes de aluminosilicatos será natural o producto de algún proceso industrial, por ejemplo en estado natural el caolín o meta caolín son los más usados, de manera artificial las cenizas volátiles y las escorias son las utilizadas, estas últimas dependerán del proceso industrial como la industria del acero, la termoeléctrica o las industrias del azúcar o el arroz.

Meta caolín y caolinita

El utilizar caolinita o meta caolinita en el trabajo de Davidovits (Davidovits, 1991) fue para formar zeolitas sintéticas (inorgánicas) mediante la reacción del meta caolín y el NaOH. La caolinita es un mineral compuesto principalmente por Al y Si, $Al_2+Si_2+O_5(OH)_4$, es una fuente natural de aluminio y sílice. En la industria se conoce este mismo material como meta caolín, producto de un proceso de calcinación (deshidroxilación) para formar cerámica (figura 8).



Figura 8 Caolín es su estado natural. (<http://ampcyl.blogspot.com/2008/12/caoln.html>)

Ceniza volante

Para no utilizar caolín para la activación alcalina, se buscaron nuevas alternativas (Palomo & Fernández-Jiménez, 2011) como las cenizas volantes (fly ash). Estas se obtienen en la captura de los filtros de los altos hornos y dependen de las concentraciones del combustible (carbón).

También las cenizas volantes son comunes como residuos de la plantas de energía. Para conocer su composición química se realizan pruebas de FRX (tabla 10). Como son procesos de calor por tiempo prolongado, las partículas se calcinan hasta tal punto que se vuelven volátiles.

Tabla 10 Composición química de la cenizas volantes con una prueba de DFX (*Perdidas por calcinación), (Cortés Salmerón, 2016)

Compuesto	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	*LOI
% en masa	53.36	26.49	10.86	1.34	0.37	0.80	1.47	0.77	1.43	1.70	1.39

Escorias con alto

La escoria de alto horno es otra fuente alternativa de aluminosilicatos. Las escorias son los residuos no metálicos obtenidos durante la producción y refinamiento de metales y aceros. Sus propiedades hidráulicas se han estudiado, para determinar su uso potencial como material cementante suplementario, al mezclarlas con CPO (Puertas, 1993). La escoria de alto horno, especialmente la granulada, proviene de los grandes hornos de producción de arrabio, pero también existe la escoria producto de una fundición menor, conocido como hierro colado. Se presenta en una granulometría más amorfa y se puede conseguir fácilmente.

El origen de la escoria y su proceso determinan su composición química (Fernández-Jiménez et al., 2006; Puertas, 1993), la variación de componentes se puede observar en la tabla 11.

Tabla 11 Composición química general para las escorias. (Cortés Salmerón, 2016)

Componente	Intervalo (% en masa)
SiO₂	27-40
Al₂O₃	5-33
CaO	30-50
MgO	1-21
Fe₂O₃	<1
S	<3
Cr₂O₃	0.003-0.007
Cl	0.19-0.26
TiO₂	<3
F	0.09-0.23
MnO₂	<2
P₂O₅	0.02-0.009
Na₂O+K₂O	1-3

La composición de las escorias de acuerdo con relación al SiO₂, Al₂O₃ y CaO, y considerando un bajo porcentaje del resto de los óxidos, permite identificarlas en el diagrama ternario del sistema SiO₂- Al₂O₃-CaO, junto con otros cementantes, incluidos, el CPO, el meta caolín, las puzolanas y las cenizas volantes, (figura 9) (Cortés Salmerón, 2016)

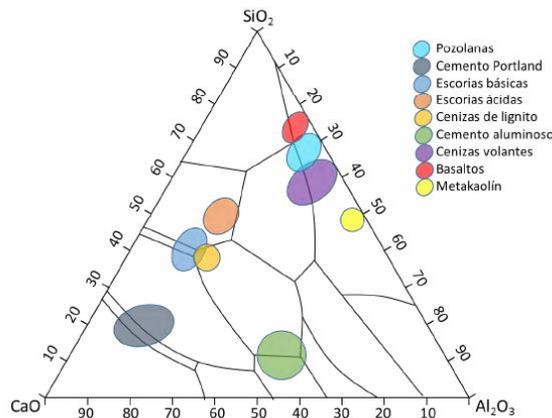


Figura 9 Diagrama de fases ternario del sistema $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, (Cortés Salmerón, 2016)

Estos parámetros son claves para decidir que escoria utilizar. Si no presentaran los valores mínimos de los compuestos esperados de Si y Al, se cambiarían por otra que presente mejor composición química.

La superficie específica de contacto hace referencia al tamaño de partícula, es decir, partículas pequeñas garantizan mayor contacto entre sí; después de ser procesada la escoria, debe pasar entre el 95 y 85 % de la malla 325 (45 micras)(Fernández-Jiménez et al., 2006; Puertas, 1995), para garantizar le mayor contacto entre partículas y puedan lograrse la reestructuración de la macromolécula.

3.6 Química de la activación alcalina

Las escorias activadas han mostrado tener resistencias mecánicas y químicas similares o superiores a las del CPO. Se realizaron estudios para la comprensión de sus propiedades cementantes mediante, la modificación de la solución activadora (tipo, concentración, contenido); la relación activador-escoria; el régimen de pre curado y curado; la química de las escorias como precursor, y el proceso de carbonatación. A continuación, se explica la influencia de estos factores en la activación alcalina de las escorias, y se resumen los valores recomendados de estas variables para la activación, mencionados en trabajos previos. Las escorias, dependiendo de su procedencia, responden de forma distinta a la activación, por lo que se deben determinar las condiciones de reacción específicas para cada una (Puertas, 1993).

Concentración molar del activador y la relación activador/escoria

La selección del activador dependerá de el origen de la fuente de aluminosilicatos, para las escorias ácidas el mejor es el hidróxido de sodio y para escorias básicas el mejor es el

hidróxido de potasio, otro activador para cualquier fuente de aluminosilicatos es el silicato de sodio, (Palomo & Fernández-Jiménez, 2011; Puertas, 1993, 1995). La concentración molar del activador se puede considerar baja con molaridades de 1 a 3 molar, media de 4 a 6 molar y alta superior a 7 molar. La activación se genera con cualquier molaridad, el problema con la concentración alta de activador es la formación de geles muy rápidos que producen materiales rígidos.

La relación activador/escoria, o líquido/sólido (l/s), muestra la proporción del activador con respecto a la cantidad de escoria, en masa. Se ha observado que la disminución de esta relación, mejora las propiedades mecánicas. La fluidez de las muestras está en función de la relación activador/escoria y el aumento de esta relación aumenta la solubilidad inicial de la escoria, e inhibe la formación de los productos de hidratación. (Puertas, 1993). Se debe trabajar en un intervalo entre 0.30-0.6 de la relación l/s (Fernández-Jiménez et al., 2006), estos parámetros son utilizados para la fabricación de cementos alcalinos con resistencias promedio de 30 a 50 Mpa en tres días.

Hidraulicidad y basicidad de las escorias

Para que la activación alcalina sea estable se debe establecer una relación de pH, Las escorias se clasifican de acuerdo a su índice de basicidad. Una escoria se considera básica cuando el índice de basicidad, es superior a uno (Fernández-Jiménez et al., 2006; Puertas, 1993). La escoria, para ser activada alcalinamente, se recomienda que sea básica, aunque las escorias ácidas también son susceptibles a ser activadas (Puertas, 1993)

El índice de basicidad se define como:

$$P1 = \frac{CaO + MgO + Fe2O3 + K2O + Na2O}{SiO2 + Al2O3}$$

Ecuación 1

Donde el contenido de cada sustancia se encuentra en porcentaje de materia.

Se compara el valor del índice P1, si este es inferior a 1, se dice que es una escoria ácida, si el valor es superior a 1, el comportamiento de la escoria será más básico (Puertas, 1993). A partir de este parámetro se determina cuál será el activador.

La capacidad de fraguar mezclando las escorias con agua, es la capacidad hidráulica, es muy atenuada y se manifiesta con lentitud, precisando de ciertos activadores que aceleran su reacción de hidratación (Puertas, 1993).

El índice de hidraulicidad se define como:

$$F9 = \frac{CaO + 0.5MgO + Al2O3}{SiO2 + Fe2O3 + MnO^2}$$

Ecuación 2

Donde el contenido de cada sustancia se encuentra en porcentaje de materia.

Si el índice F9 es mayor o igual a 1-1.4, se dice que tiene buena hidraulicidad, de lo contrario, tiene un comportamiento hidráulico bajo con el agua, con algún activador la hidraulicidad es mejor.

Temperatura de curado

La temperatura de curado y pre curado superior a los 20°C (ambiente) y humedad relativa de 30 - 50%, en un rango de 60 – 100 °C, es benéfica en el desarrollo de las propiedades mecánicas en la activación de escorias con respecto a edades tempranas (Puertas, 1993). El control de la humedad es importante, ya que controlando la humedad con las temperaturas de 60 a 100°C se logra reducir la generación de grietas en la formación de los polímeros producto de la activación.

3.7 Mezclas de suelo más fuente de aluminosilicatos activados

Las cantidades de material usados en la fabricación de BTC ya sea por un proceso de geopolimerización, activación alcalina u otros estabilizantes es muy variado. Las materias primas base son suelos granulares SW (Sand Well) arenas bien graduadas con una mezcla de arcillas plásticas. El estabilizante sustituto del CPO son las cenizas volantes, las escorias granuladas de alto horno, escoria cristalizada o arcilla.

Existe una gran variedad de metodologías para el diseño de mezcla de BTC con materiales activados alcalinamente, la concentración del activador, el activador y la presión de compactación o en algunos casos el tratamiento a la mezcla se manera como un mortero en vez de un BTC.

La metodología más usada para fabricar BTC (Pacheco-Torgal et al., 2012) consideran los pesos volumétricos como los datos iniciales para el cálculo de masas, el porcentaje de cementante o estabilizador, la humedad óptima y la presión de compactación.

3.8 Normativa en la fabricación de ladrillos

NMX-C-404- ONNCCE-2012

La norma reguladora en México para la fabricación de ladrillos, NMX-C-404-ONNCCE - 2012 para las piezas que tendrán uso estructural Se utilizará esta norma como indicador de los parámetros de resistencia mínima por pieza y en promedio (fp*) y la absorción

máxima en 24 horas. Se valorará la pieza para usarse para la fabricación de muros de carga de mampostería a partir de los resultados obtenidos.

Los tipos de piezas fabricadas en México (figura 10), macizas o huecas y por tipo de material. Según sea necesario se pueden fabricar BTC huecos o macizos, la tierra compactada y estabilizada no está dentro de los parámetros.

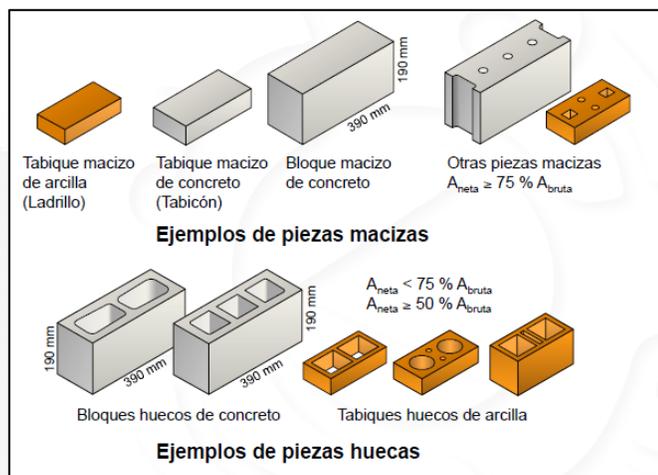


Figura 10 Ejemplos básicos de piezas construidas en México (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, 2005a)

La resistencia mínima para los BTC no aparece en la norma, en la tabla 12 muestra la resistencia promedio de la piezas más comunes en México, se puede considerar que al no estar dentro la norma los valores mínimos será de 60 kg/cm^2 y el máximo de 100 kg/cm^2 , para el valor de absorción se tomaran los valores de la tabla 13, el material más similar es la arcilla prensada, es un similar al usado en la fabricación del BTC pero pasa por una cocción para endurecer la arcilla. El valor máximo de absorción será de 19% con respecto a la masa del BTC.

Tabla 12 Resistencia mínima por pieza estructural (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, 2005a)

Tipo de pieza	$f_p \text{ kg/cm}^2$
Bloque de concreto	60
Tabicón	100
Tabique macizo de arcilla artesanal	60
Tabique extruido o prensado (Hueco Vertical)	100
Tabique extruido multiperforado	100

Tabla 13 Valores de absorción para ladrillos y bloques (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, 2005a)

Tipo de material	Absorción inicial para muros expuestos al exterior $g/(cm^2 \times min^{1/2})$	Absorción inicial para muros interiores o con recubrimiento $g/(cm^2 \times min^{1/2})$	Absorción total en 24 h en porcentaje
Concreto	5	7.5	12
Arcilla artesanal	-	-	23
Arcilla extruida o prensada	5	7.5	19

Estos son los parámetros mínimos que deben cumplir los ladrillos elaborados en México, valores que no encajan directamente con los BTC, en otros países como España o Brasil, existe normativa exclusivamente para los BTC. Es un punto libre donde se podrían incursionar los parámetros para este tipo de material.

NMX-C-441- ONNCCE-2012

Esta norma contiene los parámetros para las piezas no estructurales, para la elaboración de muros tapón o divisorios que no ofrecen una resistencia directa en la estructura. En la tabla 14 se muestran los valores mínimos de resistencia por pieza y en promedio, en la tabla 15 se muestran los valores máximos por pieza y promedio de absorción. Se hace mención de esta norma y sus parámetros, por los datos observados dentro del estado del arte o si no se cumplieran los parámetros de la anterior norma.

Tabla 14 Resistencia a la compresión para piezas no estructurales (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, 2005a)

Tipo de pieza	Resistencia mínima promedio $N/mm^2 (kgf/cm^2)$	Resistencia mínima individual $N/mm^2 (kgf/cm^2)$
Bloques y tabicones	3.5 (35)	3.0 (30)
Tabique recocido	3.0 (30)	3.0 (30)
Tabique ladrillo extruido	3.0 (30)	2.5 (25)
Celosía	2.5 (25)	2.0 (20)
Piezas hechas a mano	2.5 (25)	2.0 (20)

Tabla 15 Absorción para piezas no estructurales (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, 2005b)

Tipo de pieza	Absorción máxima de agua en % durante 24h	
	Máxima promedio	Máxima individual
Bloques y tabicones	25	27
Tabique recocido	22	25
Tabique ladrillo extruido	22	25
Celosía	25	30
Piezas hechas a mano	25	30



CAPÍTULO

IV

PLANTEAMIENTO DE CAMPAÑAS EXPERIMENTALES

CAPITULO IV: Planteamiento de Campañas Experimentales

4.1 Variables del experimento

La ejecución del trabajo se basará un diseño experimental cuantitativo, realizando pruebas de laboratorio, representaciones estadísticas de resultados y comparativas. Se consideran las siguientes variables básicas.

- Características físicas del suelo y su composición química.
- Características físicas de la escoria metalúrgicas y su composición química.
- Molaridad de la solución alcalina y pH.
- Diseño de la pasta de escoria y activador alcalino con las variantes molares.
- Tiempos de curados de la pasta a 1, 3 y 7 días, así como % de humedad en el curado.
- Relación E/S (escoria/suelo)
- Presión de compactación.
- Tiempo de curado y humedad.

La selección y clasificación de los materiales:

Suelo de la región: Tepetate (suelo duro), compuesto por limos y arcillas, suelos finos. La Selección del suelo será independiente del diseño de la solución activadora ya que solo se busca un suelo promedio que cumpla ciertas características de clasificación física.

Escoria de fundición: Se realizará un sondeo de las fundidoras de hierro de la zona para determinar cual contiene la concentración óptima de SiO_2 y Al_2O_3 donde el cociente de esas cantidades debe ser cercano a tres, $(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ (Fernández-Jiménez et al., 2006; García Lodeiro, 2008). Se realizarán pruebas químicas difracción de rayos X (DRX) y fluorescencia de rayos X (FRX) para determinar la presencia de Óxidos de Si, Al y Ca, como elementos predominantes en las escorias.

Solución Química Activadora: NaOH (Hidróxido de sodio o sosa cáustica) es el reactivo que se disuelve en agua a 80 °C, controlando el ambiente y la cantidad de químicos a utilizar, considerando el origen de los reactivos sea estandarizado.

La proporción molar de la solución alcalina:

1. Se probarán diversas proporciones molares en la relación NaOH/escoria.

Se seleccionará la mejor en base al manejo de la mezcla, elasticidad y la proporción de la generación de residuos.

Fases Procedimentales:

4.2 Establecimiento de concentración molar guía

Solución Alcalina: La solución alcalina activadora, está compuesta por un soluto el hidróxido de sodio (NaOH), diluido en agua destilada.

NaOH: El hidróxido de sodio en escamas y al 98% de concentración. Es una base fuerte, transparente y altamente reactiva. En la industria se utiliza para ajustar pH.

Se calentará agua en un vaso de precipitado, colocándolo en un mechero Bunsen, agregando el contenido de hidróxido de sodio al tubo y agitando hasta que se disuelva por completo. Finalmente dejar reposar aproximadamente 10 minutos. Se calcula el peso molecular del NaOH (tabla16).

Tabla 16 Peso Molecular del NaOH

Peso Molecular	
Na	23 gr/mol
O	16 gr/mol
H	1 gr/mol
	40 gr/mol

Se calculara la cantidad de soluto a disolver considerando su impureza del 98% y un volumen requerido de 500 ml, utilizando la ecuación 3, los resultados de los pesos de NaOH por molaridad se presentan en la tabla 17.

$$Peso NaOH (grs) = Vol rec * Peso Mol * Molaridad * \left(\frac{100}{Impureza}\right) \quad \text{Ecuación 3}$$

Tabla 17 Peso en grs de NaOH para disolver

NaOH 98% de pureza							
Molaridad	8	Molaridad	10	Molaridad	12	Molaridad	14
Vol	0.5	Vol	0.5	Vol	0.5	Vol	0.5
Peso NaOH	160	Peso NaOH	200	Peso NaOH	240	Peso NaOH	280
Cantidad corregida		Cantidad corregida		Cantidad corregida		Cantidad corregida	
163.265306	grs	204.081633	grs	244.897959	grs	285.714286	grs

Para mantener la consistencia líquida, lo ideal es mantener la solución en horno a 60°C, si no es posible mantenerla así y se deja en condiciones ambientales, deberá dejarse en un recipiente de cristal con tapa, para evitar el endurecimiento de la disolución.

4.3 Preparación de las escorias

Selección de las escorias: el tamaño de la partícula en la escoria en estado bruto, no significa mucho, solamente viene determinado por el proceso de enfriamiento o si es de alto horno.

Molienda de la escorias: para una mejor reactividad entre la escoria y el activador, es necesario reducir el tamaño de partícula de pulverizar la escoria por medio de un pulverizador y un molino de bolas de abrasión, potencializando así su activación, (Puertas, 1995). Con el equipo de Concretos y Cementos Nacionales en su laboratorio de calidad de cementos (figura 11), se logra este proceso. Posterior a una molienda, se buscará que el retenido en el tamiz 325 sea entre 5 al 20%, (Puertas, 1993) se establece un tamaño máximo de 450 micras.



Figura 11 a) Pulverizador de 10 Hp de discos, b) Quebradora de quijadas de 10 HP y Molino de bolas de 12 lt y 10 Hp. (Fuente propia)

4.4 Cálculo de componentes de la pasta activadora

Para la preparación de la dosificación definitiva, se determinarán ciertos parámetros fijos y variables, establecidos entre algunos rangos conocidos.

En la dosificación hay 2 componentes principales que rigen todas las ecuaciones para el cálculo de la dosificación, fuente de aluminosilicato (f_a) y solución alcalina (s_a)

Se establecerá una relación l/s de la probeta deseada, como parámetro no variable, para llevar a cabo el cálculo de s_a y f_a .

El primer cálculo se realizará con un volumen esperado de 325 ml más su desperdicio, con una relación l/s de 0.8, (Fernández-Jiménez et al., 2006; Maskell et al., 2014) se

realizaron pruebas preliminares con relaciones de 0.6 y 0.4, las cuales fueron poco manejables, no se descarta volver a intentar utilizar una l/s de 0.6 por las resistencias rápidas superiores a los 10 MPa en 1 día. De acuerdo a estudios previos (Fernández-Jiménez et al., 2006; Puertas, 1995), la razón entre la solución alcalina y la fuente de alumino-silicato puede variar entre 0.3 y 0.7, lo que queda directamente relacionado con la trabajabilidad del material. El utilizar una relación de 0.8, más alta a la recomendada, es por la trabajabilidad que ofrecerá la mezcla al activarse y mezclarse con el suelo (Cortés Salmerón, 2016).

La relación molar (Diop et al., 2011) se determinó como un parámetro variable, se iniciaron con relaciones molares de 8M, 10M, 12M y 14M. Los puntos intermedios determinarán la selección de una molaridad baja o alta, según la integridad y manejabilidad de la pasta.

$$\frac{l}{s} = \frac{sa}{fa} = 0.8, 0.6, 0.4$$

Ecuación 4

La relación l/s determina la cantidad en kg o volumen de sa y fa calculada con la ecuación 4, por ejemplo, para un volumen de 225 ml y con una relación l/s de 0.8 se estimó una cantidad de 100 ml de NaOH y 125 ml de escoria resultado del despeje de la ecuación 4, este volumen se multiplicara por la densidad de la escoria, calculada con la ecuación 4 para obtener la cantidad de masa.

La densidad de la escoria, después de ser procesada, facilita el cálculo de las dosificaciones para fabricar las pastas activadas, la ecuación 5, determina el peso específico o densidad de finos.

$$\rho \text{ (densidad)} = \frac{Ps}{Psa - Ps}$$

Ecuación 5

Donde el Ps es el peso seco de la escoria, Psa es el peso de la escoria saturada.

Se realizó un diagrama de flujo que permita controlar las variables y el proceso de la metodología.

En la figura 12 se muestra el esquema de la primera fase del comportamiento de las escorias partiendo de las investigaciones previas (Cortés Salmerón, 2016) para determinar como parámetro la relación l/s y la concentración molar. Se analizarán por FRX y DRX las escorias recolectadas para determinar cuál será la fuente de residuo con la mejor propiedad de óxidos. Para la temperatura de activación en la parrilla, se propuso una temperatura media de 200 °C con un promedio de 200 a 50 rpm, ya que al transcurrir el tiempo la pasta endurece y se debe ir bajando las rpm (revoluciones por minuto).

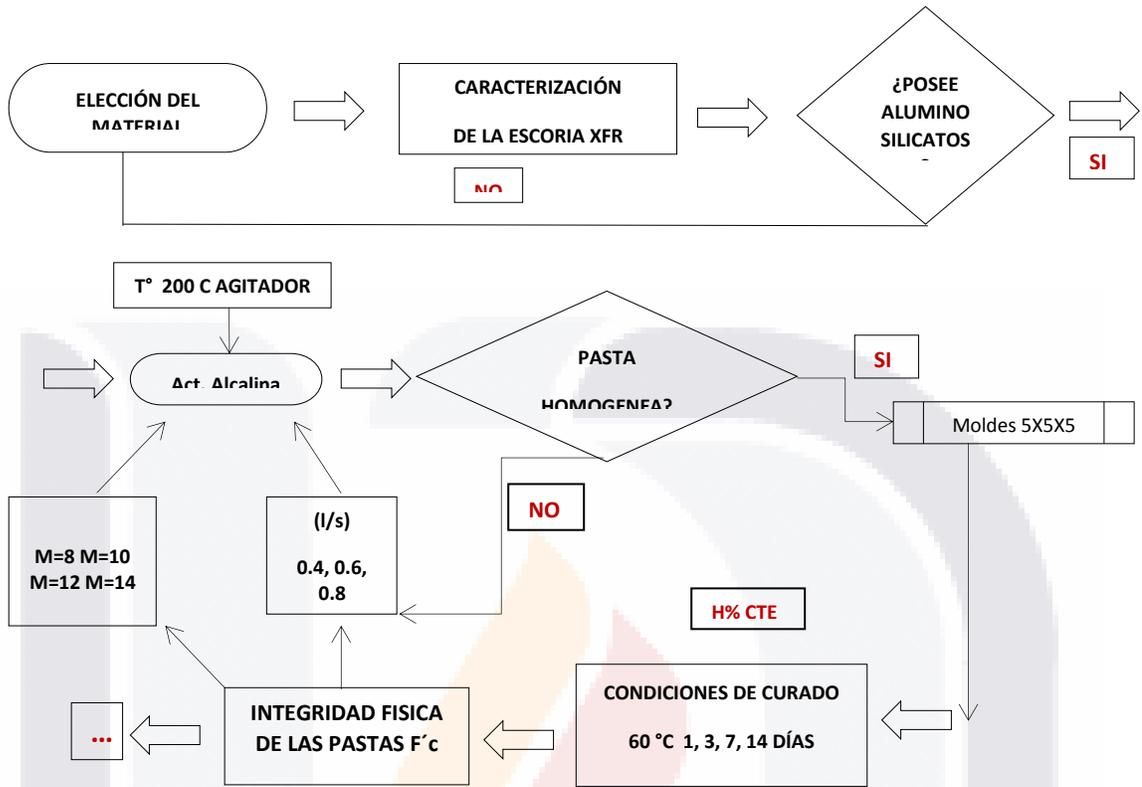


Figura 12 Diagrama de flujo de las pastas con escoria y NaOH primera fase. (Fuente propia)

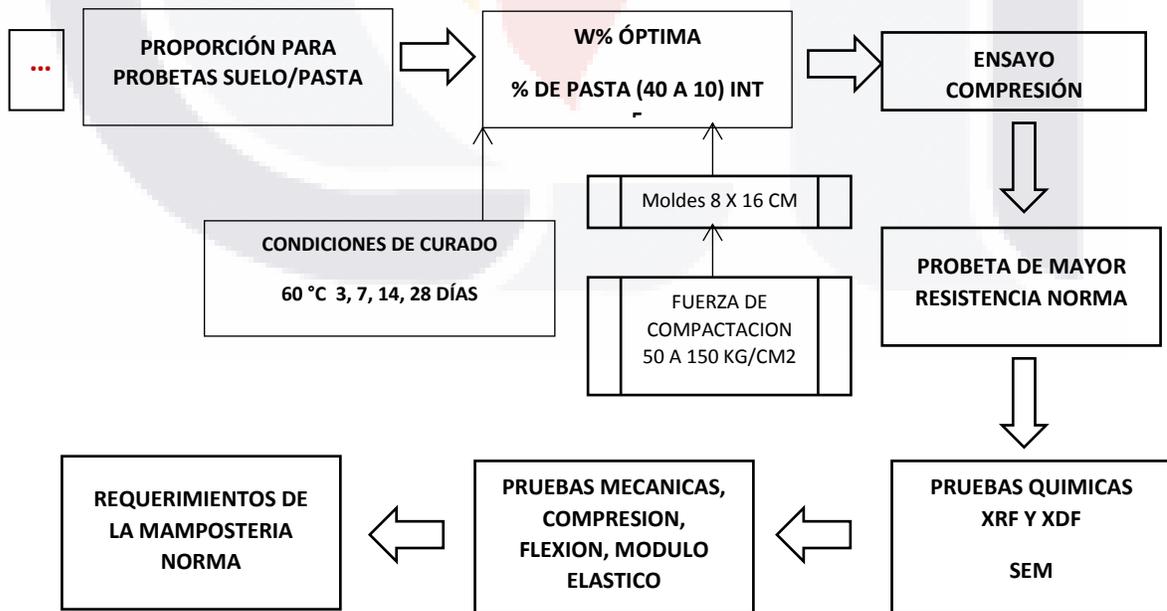


Figura 13 Diagrama de la fase 2 experimental para la elaboracion de un BTC. (Fuente propia)

Al no contar con una cámara de curado o un horno de curado con temperatura y humedad constante se optó por utilizar un desecador que mantiene una temperatura de 60 °C.

La humedad no es controlable en este punto por la falta de equipamiento en el laboratorio, lo que puede generar algunas grietas por cambio de humedad.

En la segunda fase se incorpora la masa de suelo previamente analizado y se elaboran las probetas con diferentes proporciones de escoria activada.

En el esquema de la figura 13 se muestra el diseño de las probetas de suelo estabilizado, la humedad óptima del suelo se determinará mediante la prueba proctor y las proporciones de pasta se establecen con el criterio de fabricación de un BTC, tomando como máximo un 40% de pasta y un mínimo del 5%. Posteriormente se estudia la resistencia a la compresión y absorción de las probetas, utilizando se un molde para fabricar las piezas y evaluar su comportamiento mecánico de forma individual. De los resultados a compresión y absorción se interpolará la cantidad óptima de escoria activada para fabricar un bloque con una resistencia y absorción dentro de la norma.

El volumen total de los tres cubos de pasta activada para todas las molaridades y relaciones l/s es de 350 cm³, como se muestra en la tabla 18, las cantidades con cambian, las concentraciones molares sí, es decir, a mayor molaridad mayor concentración de NaOH, como se muestra en la tabla 19.

Para realizar una comparativa de comportamiento en la resistencia a la compresión, se incluye una prueba con cemento, en el diseño de pastas de cemento se utiliza la relación agua/cemento, que es un sinónimo de líquido/sólido (l/s), en valores de 0.4, 0.6 y 0.8. La tabla 18 muestra la dosificación de las pastas de cemento.

Tabla 18 Dosificación de pastas Cemento

Dosificaciones CEMENTO CPO(Grs)			
Relación A/C	0.8	0.6	0.4
Cemento CP 30R	437.5	492.18	562.5
Agua	350	295.32	225

Tabla 19 Dosificaciones de las pastas activadas

Dosificaciones 8 M , 10 M, 12 M, 14 M (Grs)			
Relación l/s	0.8	0.6	0.4
Escoria LM	337.50	506.25	578.57
NaOH	270.00	303.75	231.43
Por unidad de Volumen 350 cm3			

4.5 Dosificación de masas para BTC's

Con el suelo seleccionado para la fabricación del BTC, se deberán realizar las pruebas de calidad (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, 2005b), para identificar el tipo de suelo y comportamiento físico por medio del SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos).

Posteriormente se determinará la masa de suelo, la cantidad óptima de agua y la cantidad de pasta activada que se agregará, en función del volumen deseado. Para esto se determinará el peso volumétrico compactado dentro del molde con la presión de compactación.

Curado y secado.

El curado se realizará en una cámara de humedad a 60°C con un 60% de humedad constante (buscando adaptarse para este propósito algún equipo en el laboratorio) por 3 días, 7 días, 14 días y 28 días.

Después del curado se procederá a un secado a temperatura ambiente de 17- 30 °C. Este proceso durará un par de horas después se realizarán los ensayos de compresión y absorción.

Moldes: Basándose en la norma (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, 2005b) para ensayos a compresión se pueden utilizar probetas que tengan una relación 1:2 (base y altura). Se utilizarán moldes de 8 x 16 cm. En el caso de no contar con un molde de estas dimensiones se optará por el molde PROCTOR. Para los BTC se buscará diseñar un molde para fabricarlo con estas medidas 7x14x28, que son las medidas para una pieza maciza (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, 2005b).

Presión de compactación: La presión de compactación será en un rango de 120- 160 kg/cm² (12-16 Mpa) con una prensa PORTER con capacidad de 30 T. Para la extracción de la probeta se utilizará un gato hidráulico extractor, con papel film se protegerá la probeta y se colocará en el horno de secado o desecador.

Para el cálculo de las cantidades de material para elaborar una probeta de la mezcla del suelo y pasta activada, se utilizará el volumen del molde proctor y los pesos volumétricos calculados del suelo, como se muestra en la tabla 19. La masa total de la probeta es el punto inicial para la dosificación, el porcentaje de escoria será de 5% inicial hasta un máximo de 40%, el cual define la cantidad de escoria y de NaOH diluido así como su

concentración molar, el agua se corregirá restando la parte líquida del NaOH. La relación l/s se seleccionará por lo observado en las resistencias y manejo de las pastas activadas.

Tabla 20 Cantidades de suelo más escoria activada

Mezcla	Masa por pza (kg)	Escoria %	Masa Escoria (kg)	NaOH M (kg)	Agua %	Relación l/s
P % Escoria	Masa	%	Masa	Masa	Cantidad corregida	Valor óptimo

4.6 Pruebas de laboratorio físicas

Para obtener la resistencia a la compresión de las probetas se utilizará una prensa universal Controls con capacidad de 120 t. Como son materiales totalmente experimentales se considerarán los siguientes parámetros: Velocidad del ensayo de 0.4 kg/cm²/seg y Sensibilidad del equipo de 150 kg. Se realizarán sin cabeceo para obtener un dato representativo solo de las probetas.

Al término de la primera fase de evaluación de las pastas cementantes de escoria activada se elegirá la que mejor trabajabilidad muestre. La resistencia mínima debe ser de 80- 100 kg/cm². Que es la resistencia mínima de un bloque.

Al término de la segunda fase en la fabricación de probetas suelo-escoria se realizará el análisis estadístico para seleccionar las mezclas con la mejor resistencia y absorción. El ensayo de absorción se realizará dentro de los parámetros de la NMX-037-ONNCEE, usando el procedimiento de absorción por capilaridad por 24 horas.

Con esto se podrá realizar la prueba de módulo elástico para así poder determinar la mezcla ideal.



CAPÍTULO

V

RESULTADOS

CAPITULO V: RESULTADOS

5.1 Caracterización química y mineralógica de las escorias

Caracterización química de las escorias

Se realizaron pruebas de fluorescencias de rayos x, para determinar la cantidad en % de masa de los óxidos presentes en la muestra, se consideraron tres muestras iniciales, en tabla 21 se muestran los resultados. En la figura 14 se muestran las escorias preparadas para los ensayos químicos.

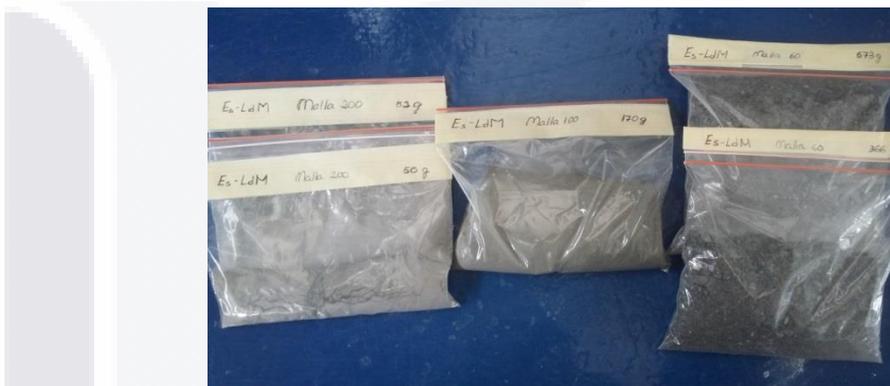


Figura 14 Escorias pulverizadas y molidas hasta un tamaño de 45 micras. (Fuente propia)

Tabla 21 Resultados de la FRX

Componente	E_LM mass%	CV_LM mass%	E_AGS mass%
SiO2	48.25835	29.90755	39.08295
TiO2	0.5732	0.58795	0.580575
Al2O3	16.72535	7.79625	12.2608
Fe2O3	6.1586	20.62485	13.391725
MnO	1.622	1.2823	1.45215
MgO	0.6837	0.98805	0.835875
CaO	17.84895	10.5505	14.199725
Na2O	0.8532	0.7095	0.78135
K2O	1.7225	2.0576	1.89005
P2O5	0.0706	0.38435	0.227475
PXC	4.4538811%	25.0410678%	0.23609406%
La pérdida por calcinación (PXC)			

Relación Sílice y aluminio

La relación entre los óxidos de sílice y aluminio es prioritaria, (Davidovits, 1991; Fernández-Jiménez et al., 2006), la ecuación 6 determina ese parámetro y sugiere que esta relación osciló en un rango de 2.8 a 3.0, en la tabla 22 se muestran los resultados esta relación.

$$Relacion\ S/A = \frac{SiO_2}{Al_2O_3}$$

Ecuación 6

Tabla 22 Relación S/A de las muestras

E_LM	CV_LM	E_AGS
2.89	3.84	3.19

Difracción de Escoria

Para identificar la fase mineral de las escorias, se realizó una prueba de difracción de rayos x (figura 15,16) de las escorias, se observa un perfil amorfo en las dos escorias (Cortés Salmerón, 2016) en el rango de 20 y 30 del grado de refracción.

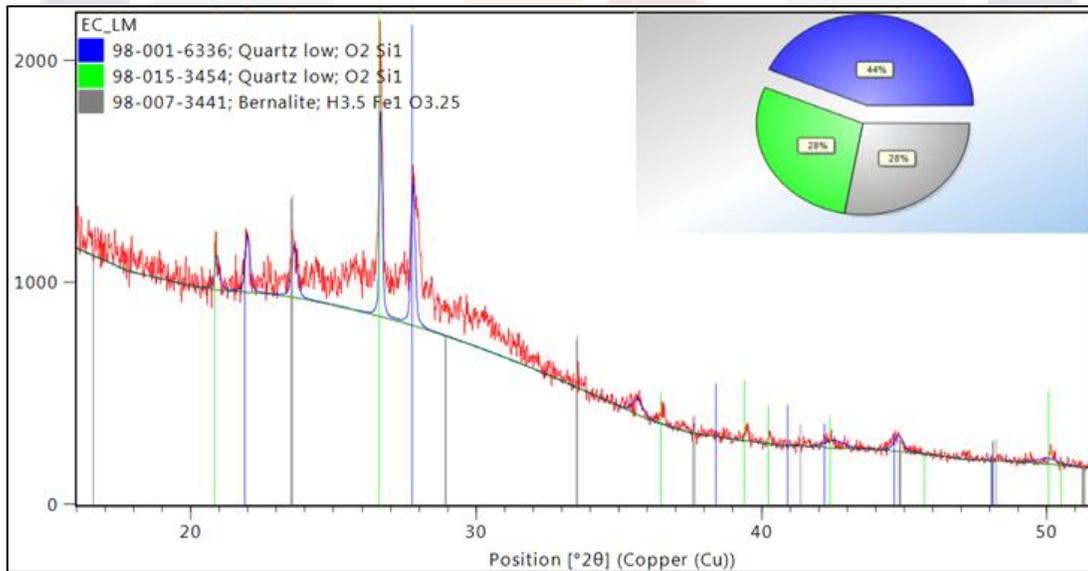


Figura 15 Gráfica de la difracción de la escoria de LDM. (Fuente propia)

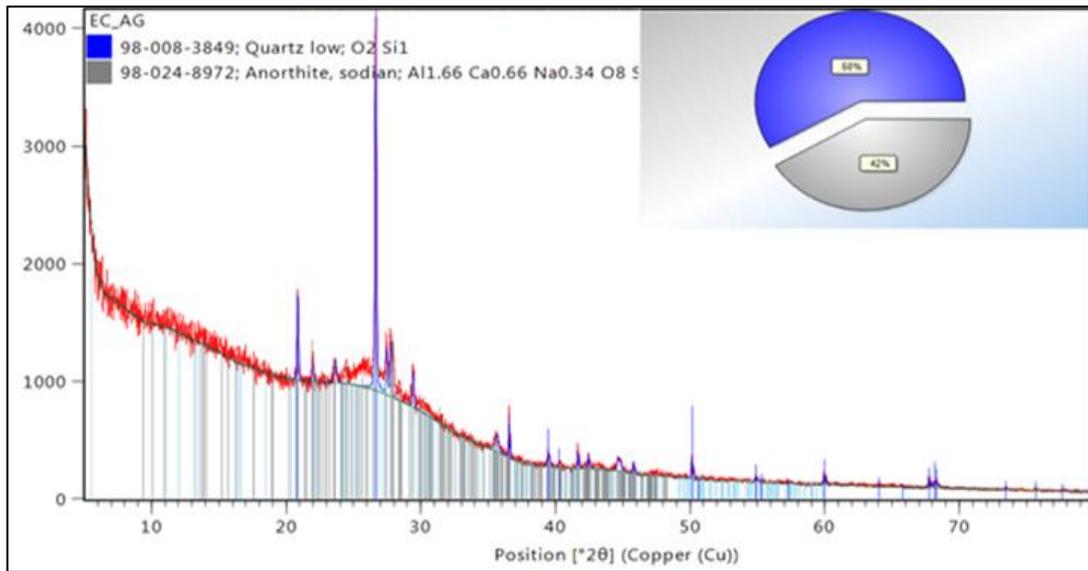


Figura 16 Gráfica de la difracción de la escoria de AGS. (Fuente propia)

Hidraulicidad y pH

Para determinar qué tipo de escoria es necesario calcular el pH, esto define qué tipo de escoria es, ácida o básica, también es un parámetro para la selección del activador. En la tabla 23 se muestra los resultados de la difracción en mineral, pH e índices de basicidad e hidraulicidad de las escorias utilizando la ecuación 2, 3. Se afirman la acidez de las escorias y se selecciona el NaOH como activador.

Tabla 23 Resultados de la caracterización química de las escorias

Muestra	Minerales observados		PH	P1	F9
E_LM	Bicalcium silicate	$2CaO.SiO_2$	Ácida	0.47	0.69
E_AG	Anorthite	$CaO.Al_2O_3.2SiO_2$	Ácida	0.42	0.62

Se descarta la muestra de escoria CV_LM, tiene una relación de sílice/aluminio muy alta y físicamente tenía una textura de ceniza volante.

5.2 Caracterización física de las escorias

Densidad de escorias pulverizada

La densidad de las escorias molidas a 45 micras se determinó con la ecuación 5, peso específico de finos, dando como resultado 2.7 gr/cm^3 .

Superficie específica

Posteriormente al proceso de trituración y molienda de la escoria, se realizó la prueba del retenido con la malla 325, en la tabla 24 se muestran los resultados.

Tabla 24 Porcentaje retenido en la malla 325 (45 micras)

Muestras	% Retenido en la malla 325
E_LM	7
E_AG	8.3

5.3 Comportamiento mecánico

Análisis físico del suelo

Para fabricar un BTC la selección del suelo es importante, por ello se realizaron las pruebas físicas para hacer una clasificación del suelo SUCS.

En la figura 17 se muestra la curva granulométrica del suelo y en la tabla 25 se muestra su clasificación según los parámetros del SUCS.

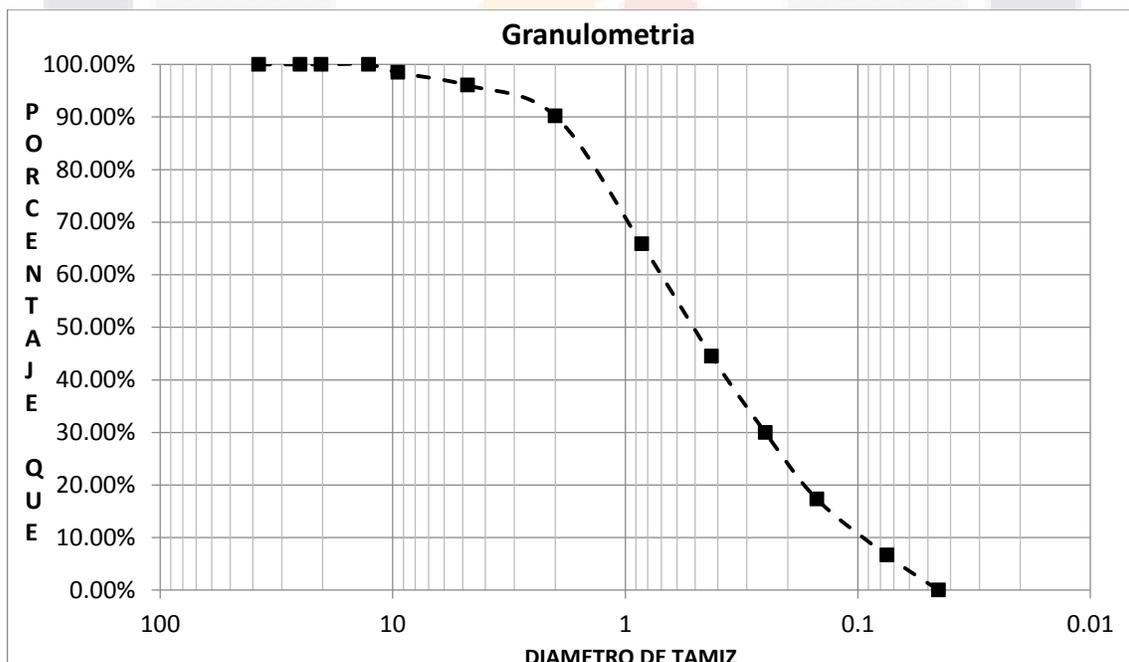


Figura 17 Gráfica de granulometría del suelo de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, (Fuente propia)

Tabla 25 Clasificación del suelo

Suelo 1 Ubicación: Universidad Autónoma de Ags, producto de excavación						
Pasa malla 200	6.64%	Pasa malla 4	96.02%	LL	LP	IP
Clasificación		Arena	SM, SC (Sand, Clay)	40%	36.63%	3.37%
Arenas limosas, con mezcla de limos y arcilla				Cu	7	
				Cv	0.78	

Como adicional se determinó la humedad óptima y el peso volumétrico seco compactado, (figura 18) como resultado el peso máximo volumétrico fue de 1575 kg/m³ y la humedad del 23%.

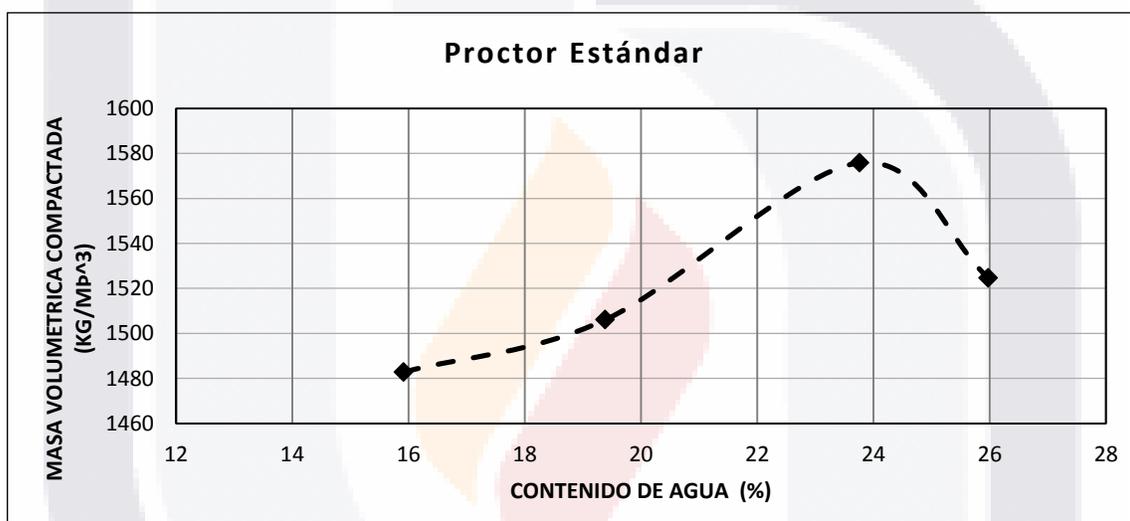


Figura 18 Gráfica de la prueba PROCTOR. (Fuente propia)

Resistencia a la compresión de las escorias activadas

Para realizar una selección de la relación l/s de las escorias activadas, se analizaron los resultados de compresión (figura 20), como las relaciones l/s muy bajas, la resistencia a la compresión es muy superior al CPO y poco trabajables, partiendo de ese punto se opta por una relación más alta de 0.8 con una molaridad 8 M, para tener una resistencia más baja cerca a un bloque de mampostería y por la trabajabilidad presentada. En la figura 19 se muestran algunos cubos de escoria activada con molaridad 10 y relaciones l/s de 0.4 y 0.6 a un día de fabricados. La activación de las escorias se realizó a 250°C y 150 rpm y el curado a 60°C con 60% de humedad.



Figura 19 Cubos de pasta activada con relación 0.6 y 0.4 a 1 día. (Fuente propia)

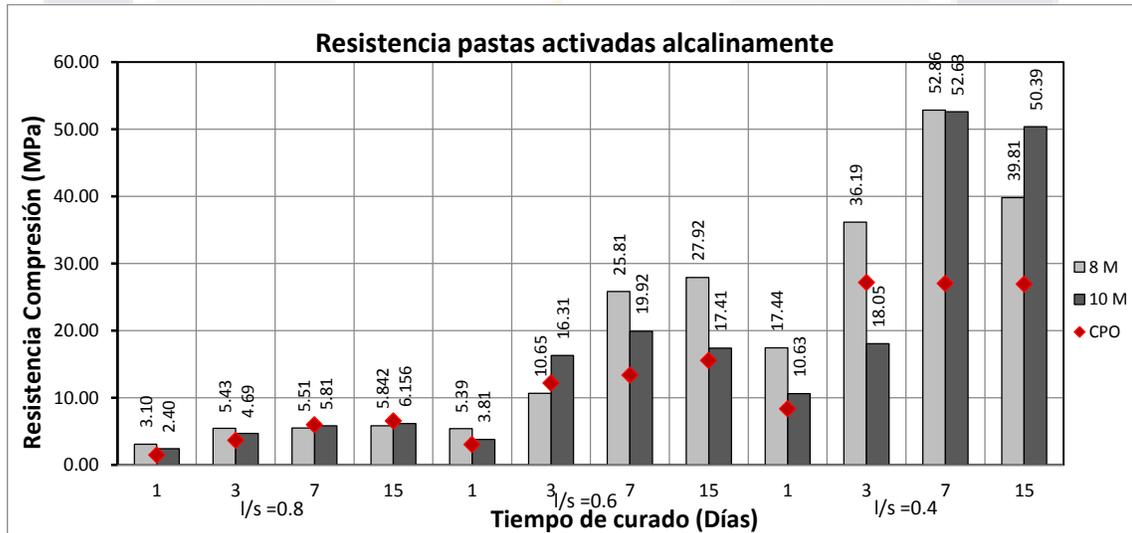


Figura 20 Gráfica de resistencia a la compresión de las escorias activadas y las diferentes relaciones l/s. (Fuente propia)

Resistencia a la compresión y absorción de los BTC^S activados

En la tabla 26 se muestran las resistencias de los BTC^S activados, se observan resistencias menores a los 7 MPa que solicita la norma. En la figura 21 se muestran las probetas de suelo activado a 14 días previas al ensayo de compresión. La escoria fue activada a 250°C y 160 rpm, posteriormente se mezclaron con el suelo y se prensó a 13.5 MPa. El curado se realizó a 60°C y con humedad relativa.

Tabla 26 Dosificaciones, resistencia a la compresión y absorción en 24 horas de las probetas de BTC activados

Mezcla de Suelo arena limo+ escoria								
Mezcla	Masa por pza (kg)	Escoria %	Masa Escoria (kg)	NaOH 8M (kg)	Aguas 23% l/s		Resistencia compresión Mpa	Absorción%
P5E	1.265	5%	0.06325	0.05060	0.21505	0.8	1.94	N/A
P10E	1.265	10%	0.1265	0.10120	0.16445	0.8	2.41	16.16
P15E	1.265	15%	0.18975	0.15180	0.11385	0.8	2.51	15.03
P20E	1.265	20%	0.253	0.20240	0.06325	0.8	3.24	14.06
P25E	1.265	25%	0.31625	0.25300	0.01265	0.8	3.75	12.93
P30E	1.265	30%	0.3795	0.30360	-0.03795	0.8	N/A	N/A
P35E	1.265	35%	0.44275	0.35420	-0.08855	0.8	N/A	N/A
P40E	1.265	40%	0.506	0.40480	-0.13915	0.8	N/A	N/A



Figura 21 Probetas de suelo-escoria activada que presentaron una resistencia inferior a la norma. (Fuente propia)

Los valores que están en color amarillo fueron descartados por el alto contenido de agua corregida por la humedad óptima mezclada con la disolución activadora NaOH, sobresaturan la mezcla y no es posible compactar de manera ideal.

Por el tipo de suelo y la falta de finos que garanticen la cohesión entre partículas, se considera añadir un suelo más arcilloso, se busca bancos de explotación en la región de Aguascalientes, encontrando la siguiente arcilla tabla 27.

Tabla 27 Clasificación de la arcilla proporcionada por la Secretaria de Obras Públicas del Estado de Aguascalientes.

Arcilla Ubicación: Banco San José, Av. Agostaderito y Tercer Anillo, Ags						
Pasa malla 200	68%	Pasa malla 4	92%	LL	LP	IP
Clasificación		Fino	CL (Clay)	40%	24.5%	12.9%
Arcilla de baja compresibilidad				Cu	7	
				Cv	0.78	

Se considera agregar un 10% de arcilla (Cristelo, Glendinning, Miranda, Oliveira, & Silva, 2012; Maskell et al., 2014; Morales-Domínguez et al., 2007; Muntohar, 2011; Oti et al., 2009), la composición del suelo base resulta muy arenoso con poca presencia de finos, esperando que este porcentaje mejora el comportamiento de la mezcla. En la tabla 28 se muestran los resultados de compresión y absorción de las mezclas mejoradas. Se adiciona la resistencia humedad para considerar la pérdida por saturación. En las figuras 22 y 23 se muestran las resistencias y absorciones de las probetas. Las probetas que mejor resultado obtuvieron son las del 15, 20 y 25%, partiendo de esto se diseñara la mezcla para un BTC óptimo en resistencia y absorción.

Tabla 28 Resultados de las mezclas mejoradas con el 15% de arcilla, resistencia a la compresión en seco y saturada; absorción en 24 horas

Mezcla de Suelo arena limo+ arcilla + escoria									
Mezcla	Masa (kg) PZA	Escoria %	Masa Escoria (kg)	NaOH 8M (kg)	Aguas 23%	l/s	Resistencia compresión MPa	Resistencia compresión húmeda MPa	Absorción%
P5E10C	1.266	5%	0.0633	0.05064	0.21522	0.8	2.26	0.73	16.58
P10E10C	1.266	10%	0.1266	0.10128	0.16458	0.8	4.13	1.56	15.59
P15E10C	1.266	15%	0.1899	0.15192	0.11394	0.8	5.94	2.02	13.24
P20E10C	1.266	20%	0.2532	0.20256	0.0633	0.8	7.14	4.16	12.08
P25E10C	1.266	25%	0.3165	0.25320	0.01266	0.8	9.47	6.37	10.13

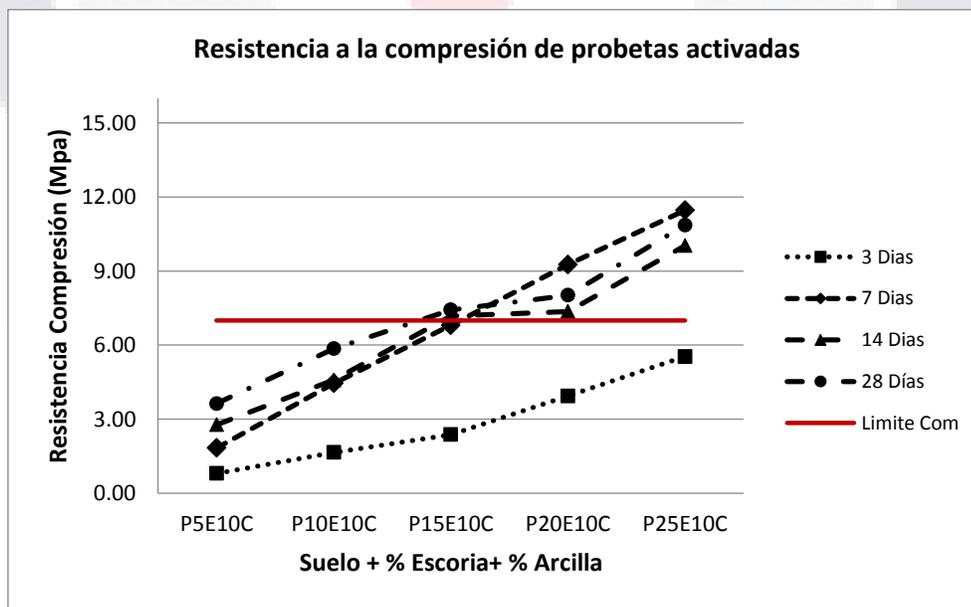


Figura 22 Gráfica de resistencia a la compresión de las probetas de suelo-escoria activada+arcilla.(Fuente propia)

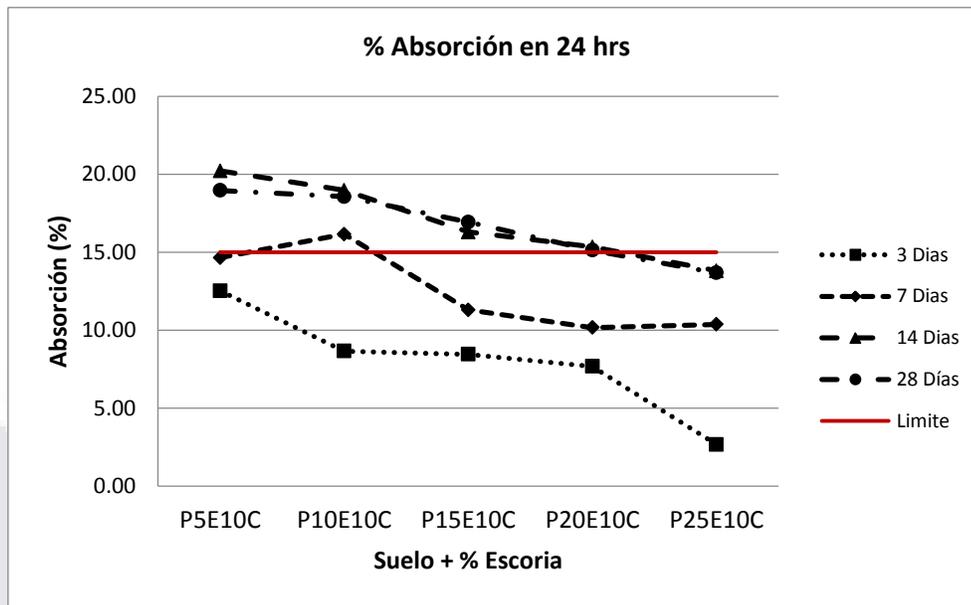


Figura 23 Gráfica de absorción en 24 horas de las probetas suelo-escoria activada con arcilla. (Fuente propia)

5.4 Caracterización química y mineralógica de los BTC's activados

Fluorescencias de los BTC'S

La composición química de las probetas suelo-escoria activada que cumplieron con los parámetros de la norma, muestran un aumento en la concentración del óxido de sílice, en comparación de la escoria sin activar, en la tabla 29 se muestran los resultados.

Tabla 29 Fluorescencia de las probetas suelo-escoria activada, arena y arcilla de los bloques

Muestra	Componentes								
	SiO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	LSF_I
P15E10C	64.20	15.14	4.48	3.69	0.41	0.12	0.89	2.69	1.84
P20E10C	63.26	14.76	4.60	4.30	0.41	0.08	1.16	2.62	2.18
P25E10C	62.55	14.69	4.61	5.31	0.43	0.08	1.25	2.54	2.72
CL	72.93	13.35	3.68	1.21	0.40	0.07	0.32	3.66	0.54
SM, SC	67.51	15.62	4.48	1.09	0.32	0.07	0.11	2.91	0.52

Difractometría de los BTC's

La difracción de las probetas seleccionadas de suelo-escoria activada muestra que el perfil amorfo se mantiene con una tendencia hacia la derecha, hacia los 30° de difracción, con respecto a la difracción de la escoria (figura 24). La cuantificación mineral (figuras 25, 26, 27, 28, 29) muestra una reducción del óxido de aluminio y una variante del 84 al 73% del óxido de sílice (cuarzo) con respecto a las probetas activadas y los suelos utilizados.

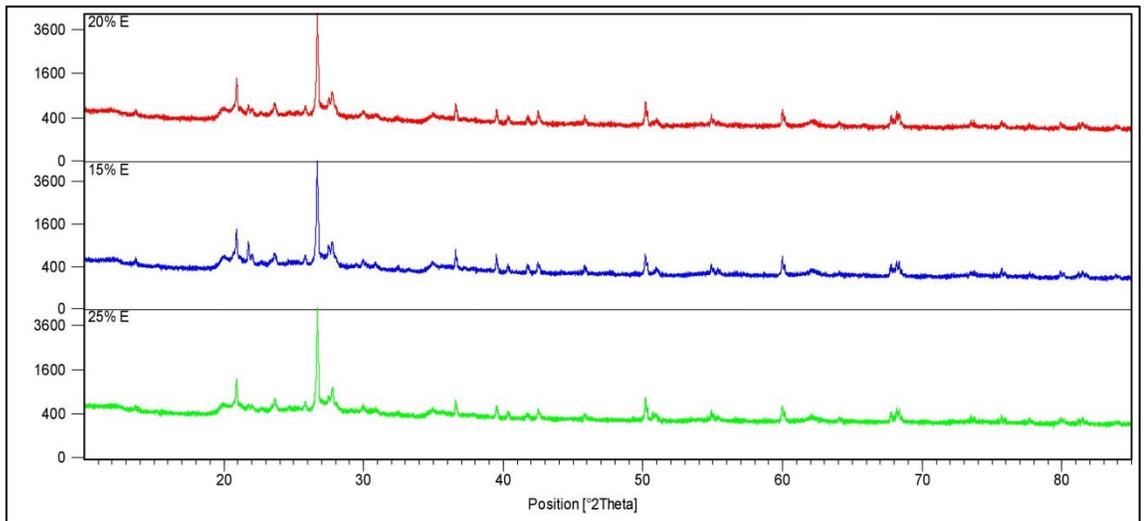


Figura 24 Difractometria de las probetas de suelo-escoria activada que superan la resistencia mínima de la norma, 15%,20% y 25% de escoria activada. (Fuente propia)

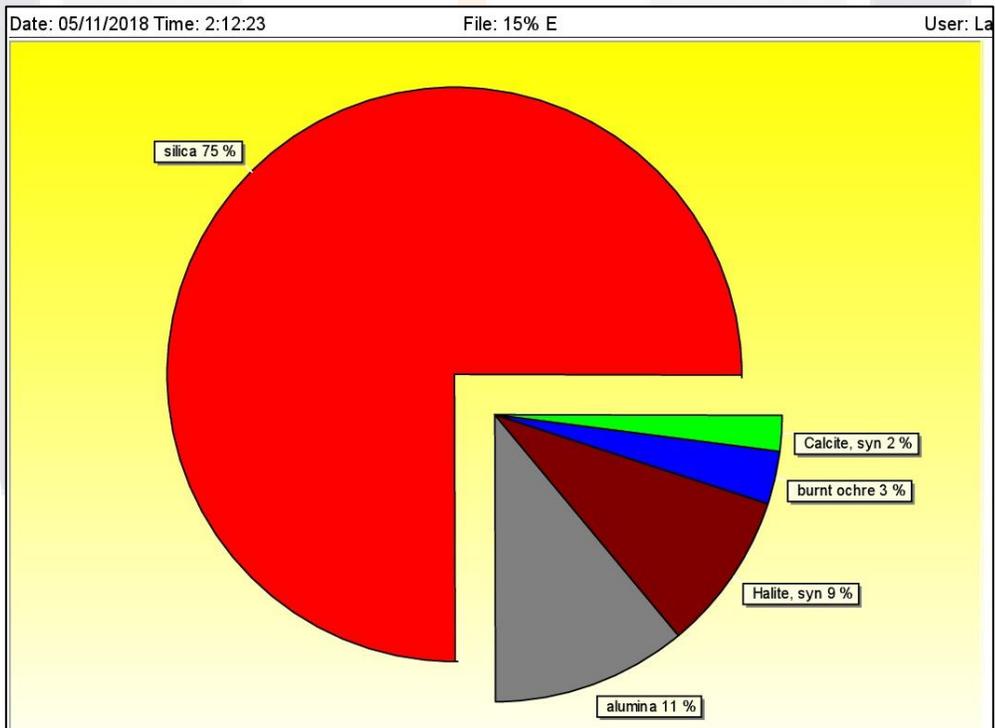


Figura 25 Cuantificación de la probeta PCE15CA10. (Fuente propia)

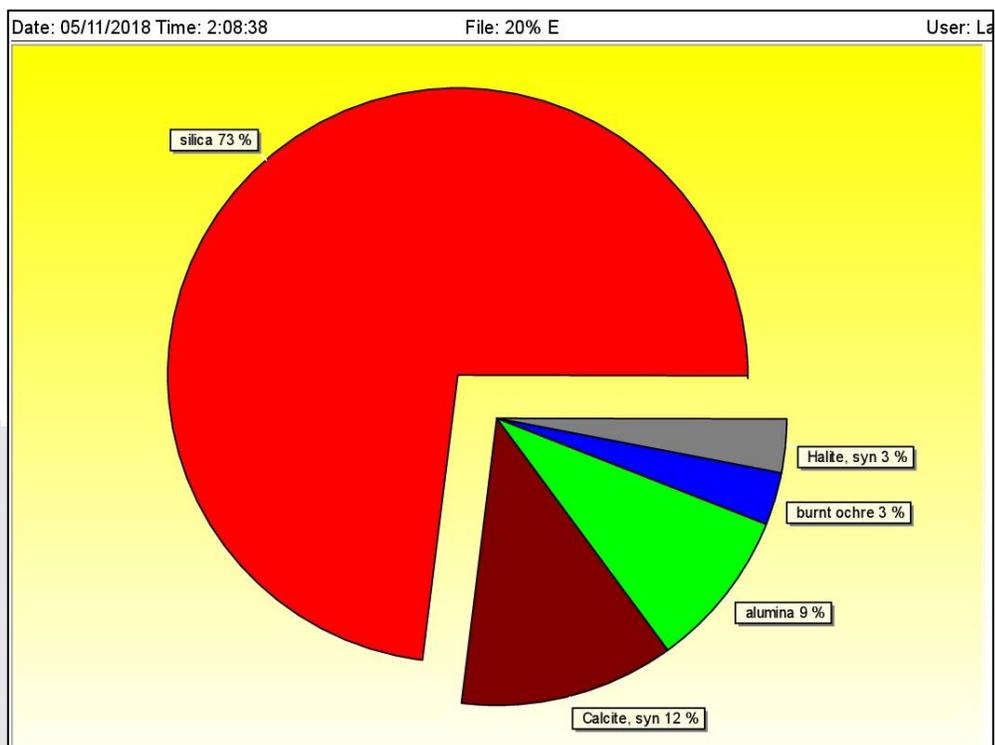


Figura 26 Cuantificación de la probeta PCE20CA10. (Fuente propia)

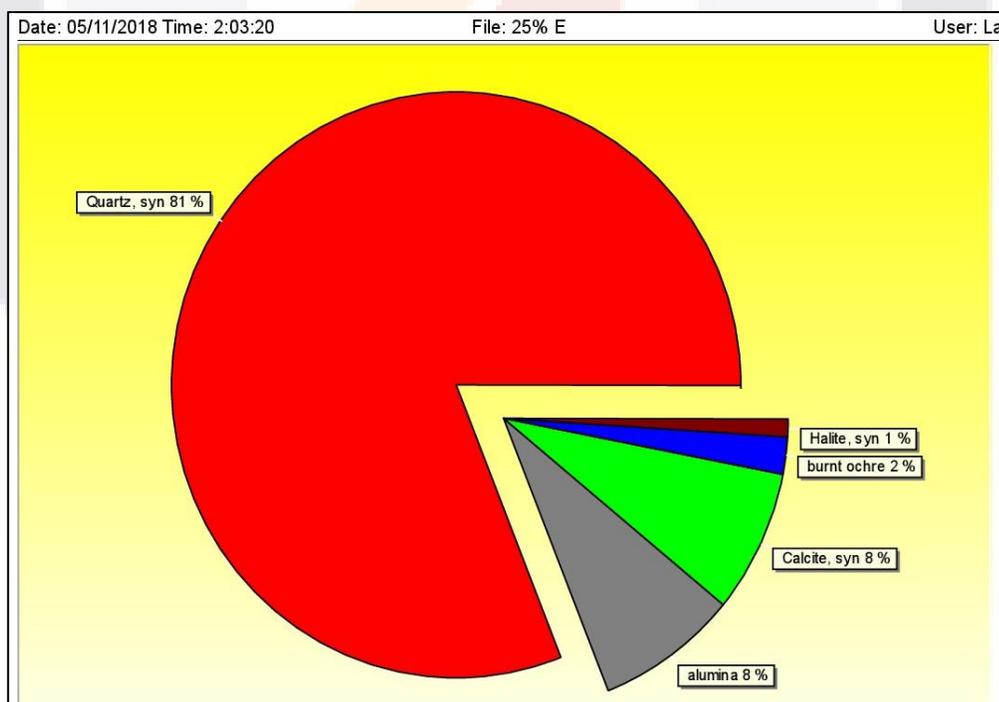


Figura 27 Cuantificación de la probeta PCE25CA10. (Fuente propia)

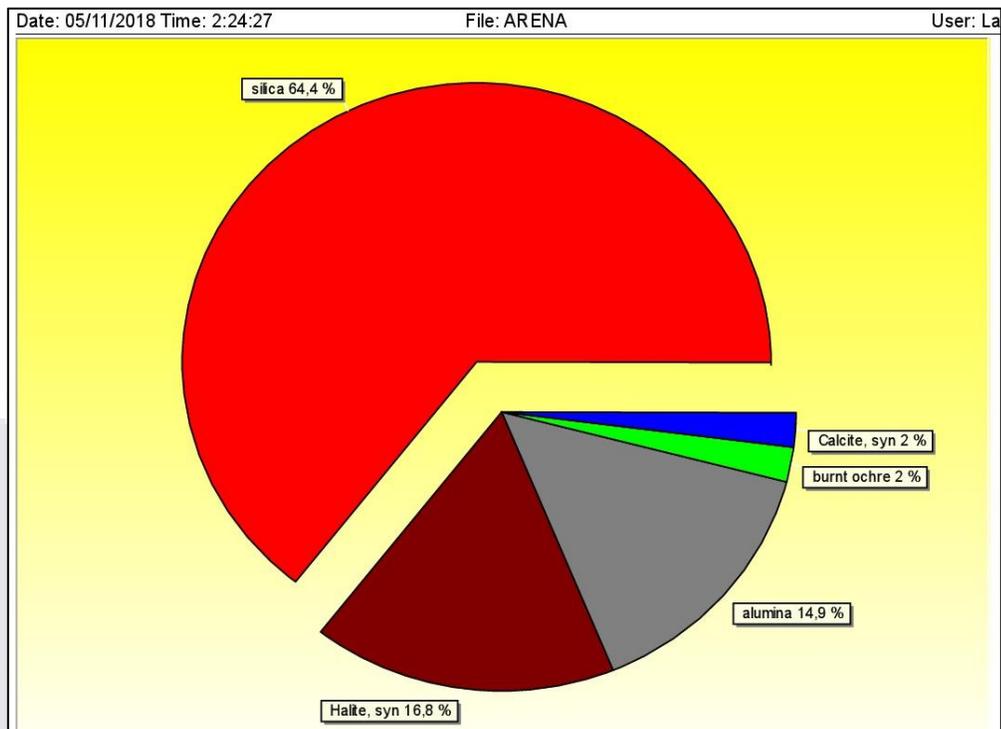


Figura 28 Cuantificación del tepetate (Arena). (Fuente propia)

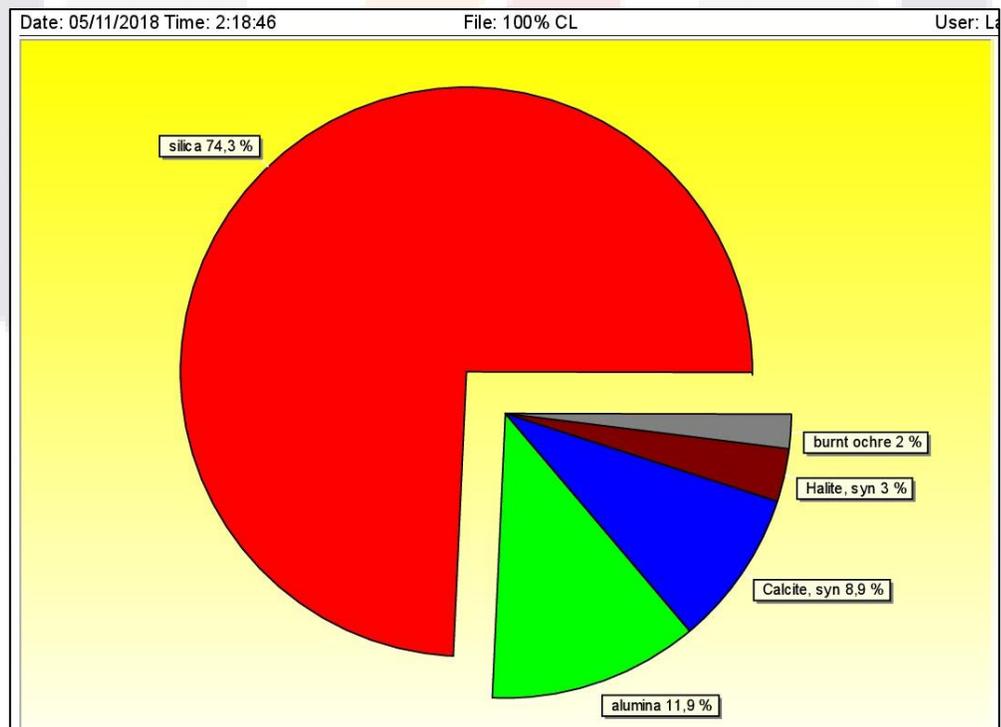


Figura 29 Cuantificación de la arcilla adicionada al 10% de las probetas. (Fuente propia)

En la figura 30 se muestran los resultados de la difracción de los suelos (arena y arcilla) y en la tabla 30 los minerales observados en las probetas activadas y suelos utilizados para

la fabricación de los BTC^s. En las figuras 31, 32, 33 muestra los resultados de la difracción y el reconocimiento de minerales similares a una puzolana, coincidiendo hasta en un 87% con una puzolana pura.

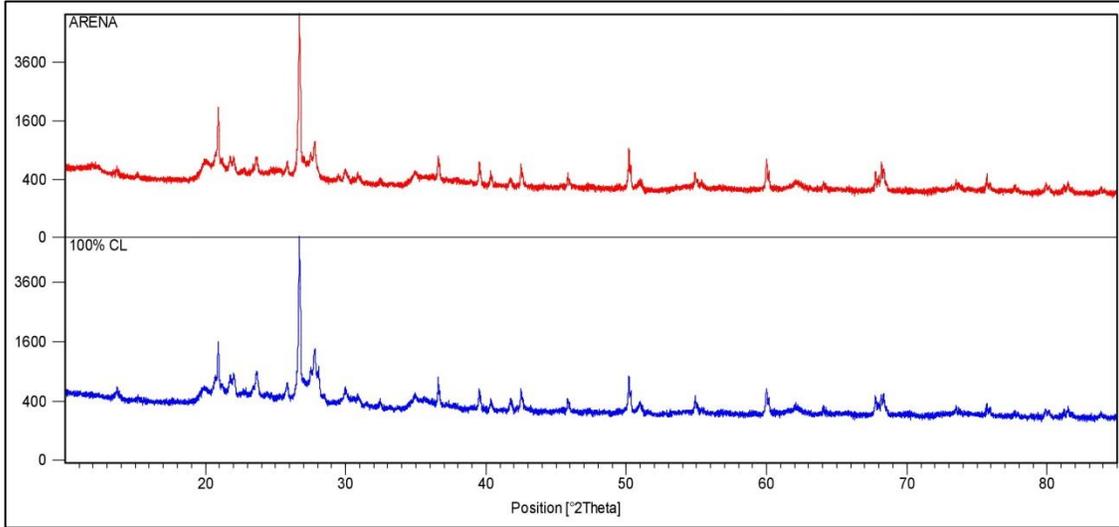


Figura 30 Difracción de los suelos utilizados para elaborar las probetas (Arena y Arcilla). (Fuente propia)

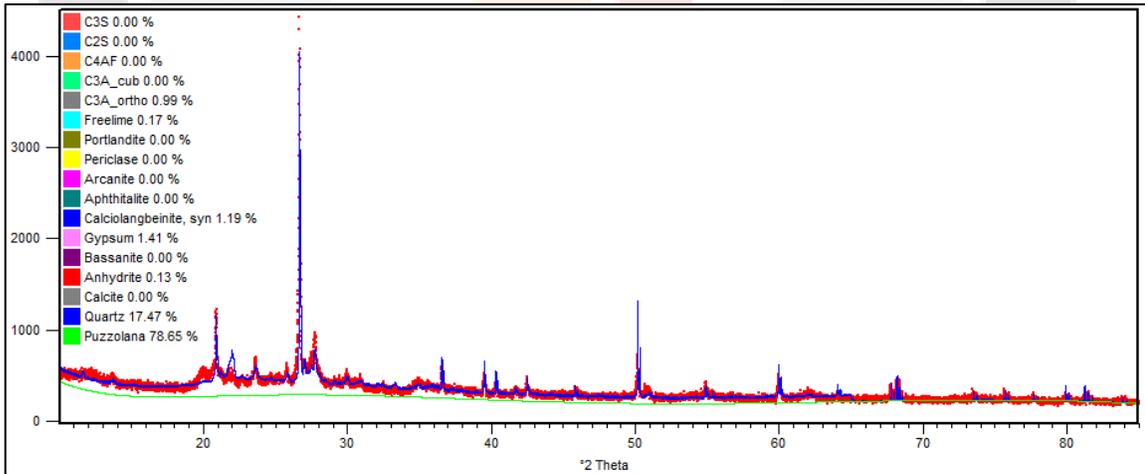


Figura 31 Difracción típica para puzolana aplicada en la probeta PC25CA10. (Fuente propia)

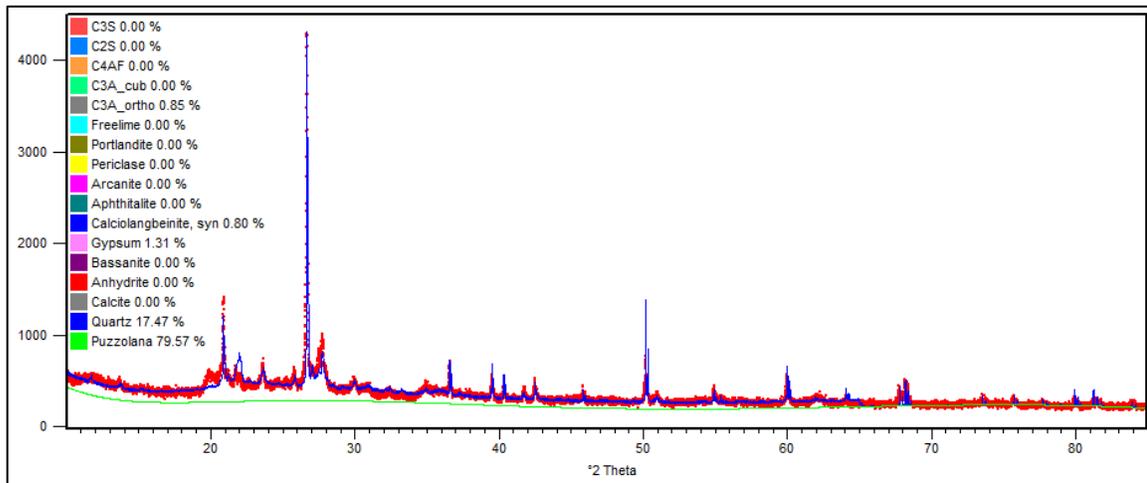


Figura 32 Difractometría típica para puzolana aplicada en la probeta PC20CA10. (Fuente propia)

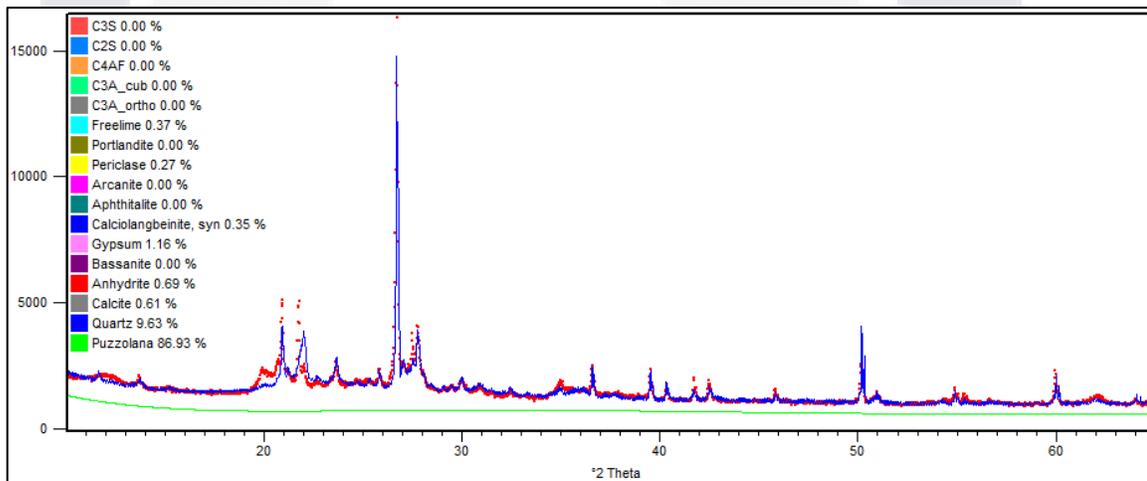


Figura 33 Difractometría típica para puzolana aplicada en la probeta PC15CA10. (Fuente propia)

Tabla 30 Minerales observados de las probetas de suelo-escoria activada, arena y arcilla

Muestra	Minerales observados	
P15E10C	Silica (Oxido de Silicio), Quartz	SiO ₂
P20E10C	Yeso	CaSO ₄ •2(H ₂ O)
P25E10C	Sulfato de calcio anhidro	CaSO ₄
CL	Carbonato de calcio	CaCO ₃
SM, SC	Corindón	Al ₂ O ₃

5.5BTC óptimo

El diseño la mezcla óptima de BTC con escoria activada fue con un 23% de escoria, en la tabla 31 se muestra la dosificación, resistencia y absorción de la mezcla.

Tabla 31 Dosificación de la probeta de suelo-escoria activada al 23%, resistencia a la compresión y absorción

Mezcla ideal 23% Escoria+lino+arcilla									
Mezcla	Arena kg (90%)	Escoria %	Masa Escoria (kg)	NaOH 8M (kg)	Aguas 22%	l/s	Resistencia compresión MPa	Resistencia compresión húmeda MPa	Absorción %
P23E10C	1.14	23	0.291	0.233	0.035	0.8	11.69	6.22	11.69

La resistencia máxima se registró a los 28 días con un valor de 13.90 MPa con una absorción de 14.34% (figura 33 y 34). La resistencia a la compresión de las probetas húmedas posterior a la prueba de absorción registro un valor de 6.00 MPa, la pérdida de esfuerzos es de 56.8%, es decir, se pierde la mitad del esfuerzo en estado seco.

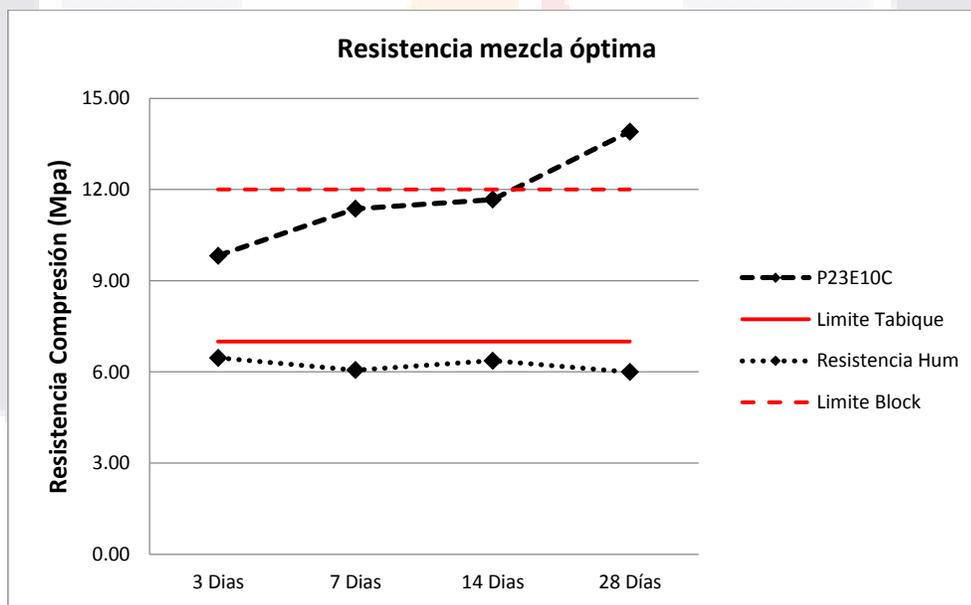


Figura 34 Gráfica de la resistencia a la compresión en seco y húmedo. (Fuente propia)

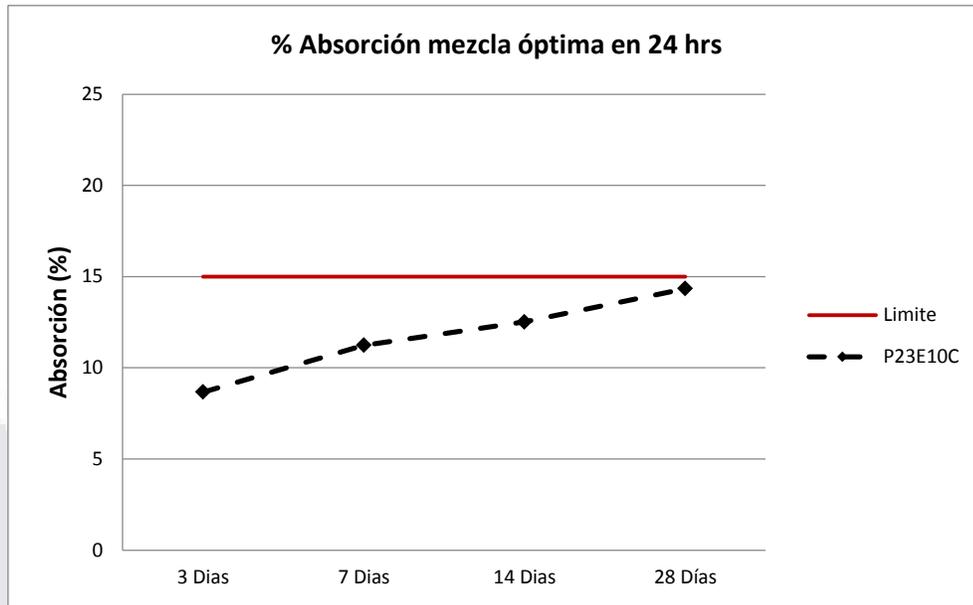


Figura 35 Absorción de la P23EC10. (Fuente propia)

5.6 Módulo Elástico

Como prueba adicional, se determinó el módulo elástico de la mezcla con el 23% de escoria, en la figura 35 se muestra el comportamiento dúctil de la mezcla óptima al 10% y 80% de la capacidad a compresión. El valor del módulo elástico es de 461.24 MPa con deformación unitaria de 0.0263.

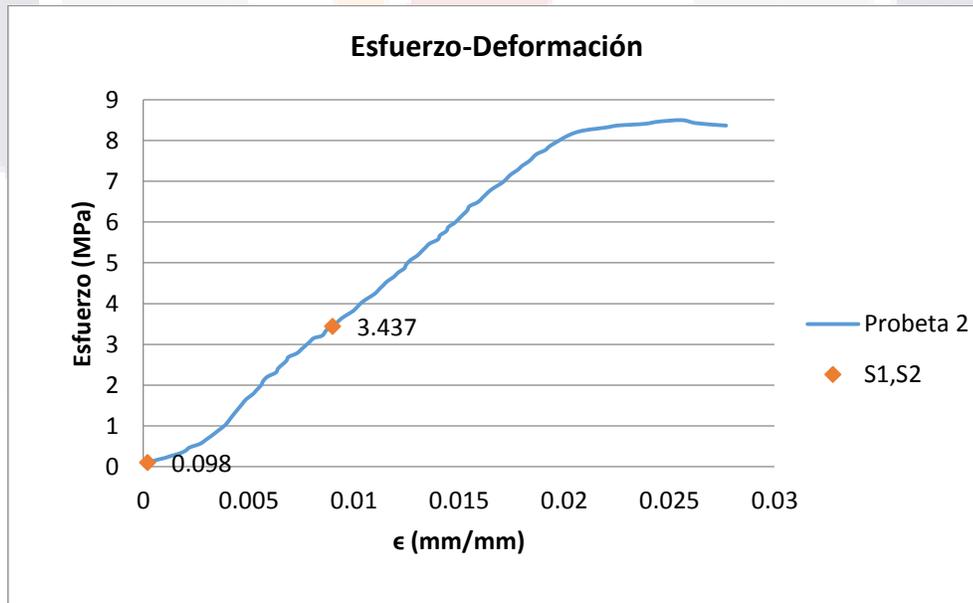


Figura 36 Gráfica Esfuerzo-Deformación unitaria de la mezcla óptima. (Fuente propia)



CAPÍTULO

VI

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CAPITULO VI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Caracterización físico-química de las escorias

En la tabla 21 se muestran los valores de porcentaje de masa de los óxidos que componen las tres escorias analizadas. La escoria de Lagos de Moreno (E_LM) tiene mayor porcentaje de óxido de sílice y aluminio con respecto a las otras dos.

En la tabla 22 están las relaciones sílice-aluminio de las tres escorias, observando que la E_LM tiene una relación de 2.89 que está dentro del rango de 2.8-3.0. Con este parámetro y los resultados de las fluorescencias se considera que es la más viable para ser activada.

Para completar el análisis químico y corroborar los resultados de la fluorescencia se realiza una prueba de difracción, en las figuras 15 y 16 se muestran las gráficas de difracción de las escorias E_LM y la escoria de Aguascalientes (E_AG), mostrando un perfil amorfo y los picos de difracción de ángulo en el rango 20° a 30°. Esto afirma que ambos materiales son buenos para activación, pero la E_LM con la relación sílice-aluminio es mejor.

Los índices de basicidad e hidraulicidad determinan la acidez y reactividad con el agua de las escorias. La identificación de minerales da un panorama a la composición de las escorias comparadas con otros materiales. Las escorias resultan ser de carácter ácido y con baja hidraulicidad (tabla 23), se selecciona como activador el NaOH en concentraciones molares del 8, 10, 12, 14, posteriormente se seleccionará solo una molaridad que ofrezca una buena resistencia para el BTC y que sea fácil de trabajar.

El peso específico de la escoria es de 2.7 gr/cm³, con este parámetro se calcularon las masas para la dosificación de pastas activadas. En comparación con el peso específico del cemento que es de 3.15 gr/cm³, se puede considerar que las escorias son más livianas en peso.

Los porcentajes de retenido en la malla 325 garantizan que el contacto entre partícula de escoria activada y exista una reestructuración de geles buena. La escoria E_LM presentó un 7% de retenido en la malla después de su procesamiento.

Obteniendo el resultado a compresión de las escorias (figura 20), se observa que la relación l/s de 0.4 con 8M presenta resistencias superiores al CPO, registrando una máxima de 52.86 MPa a los 7 días mientras que el cemento registró un valor de 28 MPa durante el mismo tiempo, una diferencia de 53% en resistencia última a compresión.

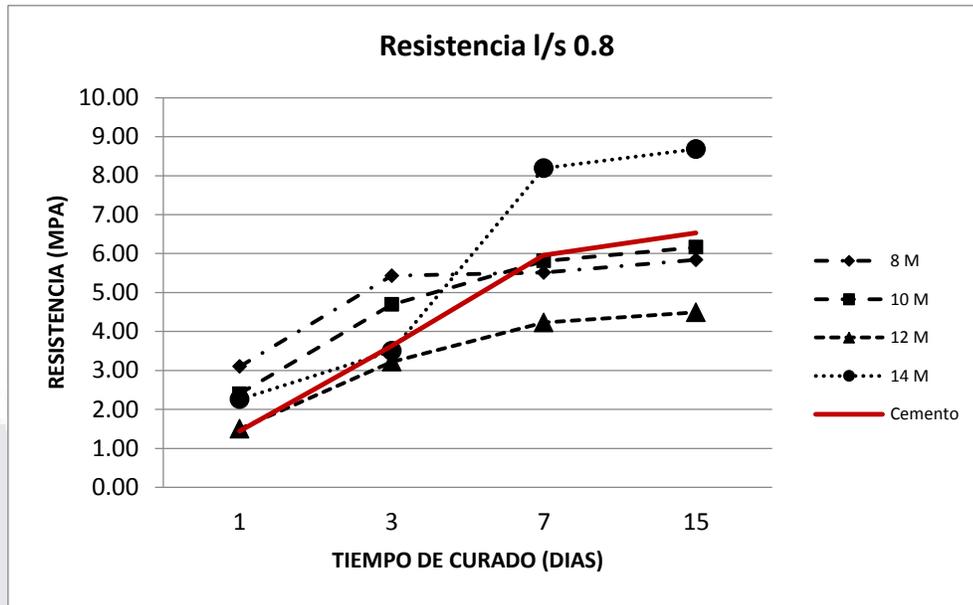


Figura 37 Curvas de resistencia de la pasta de 0.8 con diferentes molaridades y comparada con el CPO. (Fuente propia)

La relación 0.6 con 8 M mostro una máxima de 27.92 MPa a los 15 días y el cemento registro un valor de 18 MPa en el mismo tiempo una diferencia de 64% en resistencia última a compresión. La relación de 0.8 con 8M presento un comportamiento muy similar al CPO, registrando una resistencia promedio para ambos 6 MPa a los 15 días (figura 37). En el Anexo A se muestran los resultados de todas las pastas activadas y pastas de cemento, se observó que a mayor molaridad la resistencia aumenta, pero en un rango muy corto de 2 MPa con respecto al tiempo, con lo observado y los comentarios de la tabla 32 se descartan las molaridades 12 y 14 por su trabajabilidad y resistencias (figura 38).



Figura 38 Pastas activadas a 250°C y curadas a 60°C y 60% humedad. (Fuente propia)

Tabla 32 Comentarios de las pastas activadas con la relación 0.8 y molaridades de 8, 10, 12, 14

RELACIÓN L/S DE 0.8		
Probeta	Molaridad	Observación
P-8-8	8	Una mezcla muy fluida, presento un fraguado tardío, pero la activación fue lenta pero manejable
P-10-8	10	No presento agrietamiento, el manejo de la pasta fue más estable dando la posibilidad de trabajar con ella más tiempo
P-12-8	12	Pasta con un fraguado semi rápido, poco manejable, pocas grietas durante el proceso de endurecimiento
P-14-8	14	Pasta muy deshidratada, fraguado rápido, poco manejable

6.2 Caracterización físico-química de los BTC´s activados

En la tabla 25 se muestra la clasificación del suelo utilizado para la fabricación del BTC, se cataloga como arena con poca presencia de arcillas, con una tonalidad roja. La curva granulométrica presenta homogénea entre sus partículas, una plasticidad baja, comportamiento de una arena común pero con más partícula fina. Se determina la humedad óptima para compactar. El material se recolecto del producto de excavación de la cimentación de un edificio de la universidad.

Se inicia la dosificación de las mezclas de BTC con escoria activada con relación 0.8 y molaridad de 8, se parte de un 5% hasta un 40% incrementando en intervalos de 5%. Se limita hasta un máximo del 25% de escoria activada, por la correlación entre la cantidad de escoria, disolución y agua, si la cantidad de escoria aumenta, también aumenta la cantidad de disolución, por la relación l/s de 0.8, ocasionando que se supere la cantidad de agua para compactar, esto generaría problemas de saturación de la mezcla y no lograría una compactación ideal.

En la tabla 26 se muestran los cantidades de cada material y los resultados de compresión y absorción, no se cumple con el mínimo de resistencia de 7 MPa que solicita la norma. Se replantea una mejora, agregar arcilla para sellar poro y que exista una mayor superficie de contacto entre las partículas de suelo y la escoria activada.

En la tabla 27 se presenta la clasificación de la arcilla a utilizar proporcionada por la Secretaria de Obras Públicas del Estado de Aguascalientes, se clasifica como una arcilla de baja compresibilidad. En la figura 39 se muestran las probetas mejoradas.

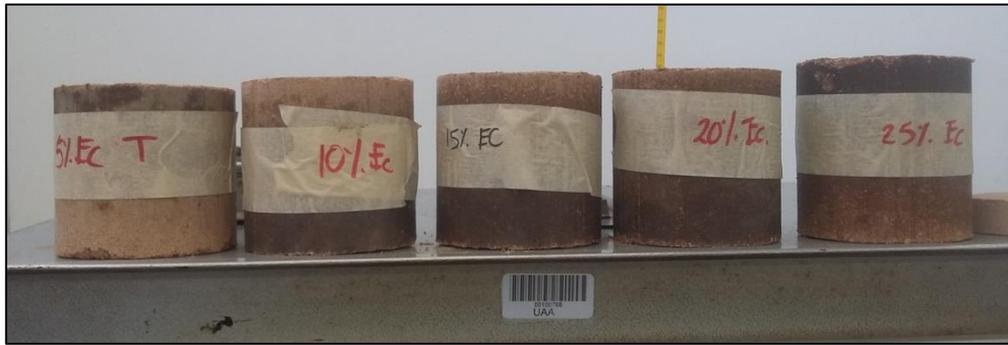


Figura 39 Probetas de suelo-escoria activada y arcilla, previas al ensayo de compresión. (Fuente propia)

En la tabla 28 se presenta las cantidades de material para la elaboración de las probetas mejoradas, la masa total para fabricarlas es de 1.26 kg, el 10% de arcilla es de 0.126 kg. Los resultados a compresión son favorables para los porcentajes superiores al 10% de escoria activada. La resistencia máxima registrada es de 19 MPa a los 28 días y la resistencia promedio es de 9.47 MPa, cumpliendo con la resistencia solicitada por la norma de 7 MPa de manera individual y la resistencia mínima promedio de 10 MPa (tabla 1). La absorción máxima permisible es del 15% y las probetas registraron valores desde 13.24% hasta el 10.13%, se considera que están dentro de la norma. En las figuras 22 y 23 se muestran los valores promedio graficados para cada probeta. En el Anexo B se presentan las gráficas de peso volumétrico y dimensiones de todas las probetas y las tablas de las resistencias por mezcla.

La tabla 29 muestra los valores de las fluorescencias de las probetas que mostraron mejor comportamiento mecánico y la composición de los suelos utilizados.

El rango del óxido de sílice es de 64.20 a 62.55 y se observa una reducción del sílice cuando el porcentaje de escoria activada aumenta, lo mismo se observa con el óxido de aluminio en las cuantificaciones se afirma ese comportamiento (figuras 25, 26, 27). Los óxidos de calcio aumentan en función de la cantidad de escoria activada, lo mismo sucede con los óxidos de sodio y de hierro.

En los perfiles de la difracción se observa que el comportamiento amorfo que la escoria presentaba por si misma se sigue manteniendo pero los valores pico tienden más a estar hacia la derecha cerca de los 30°. Esto puede ser por la presencia mayoritaria del suelo, en la figura 30 se observan los perfiles de difracción de los suelos y comparándolos con la figura 24, presentan un comportamiento muy similar.

Se puede asumir que la parte amorfa y la composición mineralogía se mantienen en casi todas las probetas por el origen de los materiales, todos en su mayoría presentan una cantidad considerable de sílice y aluminio, así como óxidos de calcio y hierro (tabla 30).

Con los resultados de difracción de las probetas, se realizó un barrido típico para la detección de puzolana y otros minerales, este es el control de calidad de la empresa Concretos y Cemento Nacionales (figuras 31, 32, 33) observando que tiene entre un 86.93 a 78.65% de similitud a la puzolana, además de presentar minerales minoritarios como el yeso (tabla30).

6.3BTC óptimo y módulo elástico

Como resultado final se diseña una mezcla que garantice la resistencia a la compresión y una absorción inferior a los límites. En la tabla 31 se presentan las cantidades y resultados de la mezcla con el 23% de escoria activada y el 10% de arcilla, se optó por ese porcentaje por ser un punto medio entre los valores observados de las probetas 20% y 25% de escoria activada.

La resistencia mínima registra fue de 9.02 MPa (figura 34) y la resistencia promedio fue de 11.69 MPa (tabla 31) ambos valores satisfacen los requerimientos de la norma, la absorción máxima registrada fue de 14% (figura 35) y la absorción promedio fue de 6.22%, satisfaciendo los requerimientos de la norma. En el Anexo C se presentan las gráficas de peso volumétrico y dimensiones de esta mezcla.

En la figura 36 se presenta la gráfica de esfuerzo-deformación unitaria de la mezcla con el 23% de escoria, se observa una pendiente pronunciada que indica que existe ductilidad del material, el valor del módulo elástico fue 387.65 MPa con una deformación unitaria de 0.0263, esto representa a un material que puede soportar esfuerzos de compresión cercanos a los de un concreto pobre (10 MPa) con deformaciones más prolongadas sin presentar fallas frágiles. En el anexo C se presentan datos de los ensayos.

El módulo de la mampostería en conjunto (piezas y mortero) oscila en un rango de 3000 a 5000 MPa, por la falta de tiempo no se logró estimar este valor, pero por el valor obtenido, se puede estimar que una pieza tiene casi diez veces menos del valor del módulo elástico de la mampostería tradicional, esto quiere decir, que resiste cargas prolongadas y continuas con deformaciones considerables.

6.4 Comparativa entre las piezas comerciales y el BTC activado

Como dato adicional y extra, se realizó el análisis del precio unitario de un BTC activado, en la tabla 33 se muestran los materiales a utilizar en la fabricación de un BTC. El peso aproximado para una pieza de 8x15x30 es de 7 kg aproximadamente, dando un costo directo de \$ 1.70, agregando la mano de obra y equipos necesarios el costo final sin utilidad es de \$ 2.82, como se aprecia en la tabla 34.

Tabla 33 Costo unitario directo para elaborar un BTC activado con escoria de 7 kg aproximadamente

Concepto	Cantidad/ unidad	Precio unitario	Total
Suelo (SM)	5.745 kg/u	\$169.31/ ton	\$0.972
Suelo (CL)	0.766 kg/u	\$169.31/ ton	\$0.129
NaOH 4M	0.9192 kg/u	\$3840.00 /ton	\$0.396
Escoria Molida 45um 15%	1.149 kg/u	\$ 1.01 kW/hr	\$0.170
Agua	0.727 l/u	\$45.80 m3	\$0.034
Total			\$1.70 x pza

En la tabla 34, se puede comparar que el comportamiento físico de la probeta óptima con el 23% de escoria con las resistencia registradas en el estado del arte, se observan que la resistencia esta por encima de los estudios realizados excepto por los trabajos de Banupriya y Muntohar, la absorción es muy similar asi como la resistencia en estado húmedo.

Tabla 34 Comparativa de resultados del bloque de escoria activada con las realizadas en el estado del arte.

Bloque	Resistencia Media MPa	Resistencia Humeda MPa	Perdida Esfuerzo	% Absorción
Bloque de escoria activada	12	7	5	13.42
Morales et all 2007	8.3	N/A	N/A	16
Muntohar 2011	18.6	16.1	2.5	5
Oti, et all 2009	7.1	N/A	N/A	20
El-Mahllaway et. 2014	7.1	5.9	1.2	11
Maskell et 2014	6.2	N/A	N/A	N/A
Diop, et 2011	11.1	5.1	N/A	N/A
Banupriya et 2016	19	N/A	N/A	N/A
N/A	No aplicaron ensayo			

En la tabla 35, se puede comparar que el comportamiento físico y el costo del BTC de escoria activada, se observa que en peso volumétrico es muy similar al de un tabicón pesado y la resistencia es similar al tabicón pesado y superior al tabicón normal y al tabique rojo (ladrillo rojo). El costo es muy cercano al del tabique rojo, pero muy superior en resistencia. En resumen es un material muy competitivo que podría abrir una oportunidad de mercado y negocio aceptable.

Tabla 35 Comparativa de las piezas comerciales y el BTC activado con escoria

Fabricante	Descripción	Material	Dimensiones AnchoxAltoXLargo (cm)	Precio unitario \$ M.N.	Peso Volumétrico Seco (Kg/m3)	Resistencia Compresión (MPa) Promedio
1	Tabicón	Solido Concreto Ligero	10x14x28	\$ 6.00	1800	(8-9)
	Block 12	Concreto	12x20x40	\$ 9.36	1010	(6-9)
	Block 15	Concreto	15x20x40	\$ 10.80	1010	(6-9)
	Block 20	Concreto	20x20x40	\$ 16.20	1010	(6-9)
	Tabique Convencional	Arcilla cocida	12x6x24	\$ 3.00	1500-1600	(5-7)
	Tabique de Primera	Arcilla cocida	12x6x24	\$ 3.36	1500-1600	(4-6)
	Cuña	Arcilla cocida	10x5x15	\$ 2.76	1400-1600	(8-10)
2	Tabicón ligero	Solido Concreto Ligero	10x14x28	\$ 5.80	1400	8
	Tabicón pesando	Solido Concreto Alta resistencia	10x14x28	\$ 6.20	1800	(15-20)
	Block Hueco Liso (Pesado)	Concreto Alta Resistencia	10x20x40	\$ 9.00	900-1000	(6-9)
			12x20x40	\$9.50	900-1000	(6-9)
			15x20x40	\$ 10.90	900-1000	(6-9)
			20x20x40	\$ 16.50	900-1000	(6-9)
			25x20x40	\$ 17.20	900-1000	(6-9)
30x20x40	\$ 18.50	900-1000	(6-9)			
BTC 23%EC	Bloque de tierra compactada con escoria solido	Suelo+ Escoria	15x8x30	\$ 2.82	1834.99	11.69



CAPÍTULO

VII

CONCLUSIONES

CAPITULO VII: CONCLUSIONES

Conclusión General

El uso de la escoria activada para fabricar BTC es aplicable, con resultados similares y superiores a los BTC fabricados con CPO. Se cumple la hipótesis del proyecto.

Conclusiones Particulares

La escoria activada funciona como material cementante alternativo al CPO, se puede mezclar con más materiales, por ejemplo con suelos o residuos de la construcción.

El proceso de activación alcalina ofrece comportamiento mecánicos superiores a los del CPO.

En la fabricación de los BTC es una alternativa viable que reduce el consumo del CPO, cuidando el costo de fabricación.

El análisis químico es fundamental en el desarrollo de nuevos materiales y determina los pasos a seguir en la elaboración de BTC con escorias activadas

El comportamiento del BTC con escorias activadas es muy dúctil en comparación de otras piezas de mampostería que presentan comportamiento más rígido.

Nichos de Investigación

Las posibilidades de desarrollar mampostería de conjunto o como sistema constructivo, realizar los estudios como un material sismo resistente.

El desarrollo de mezclas con residuos de obra (demolición), fuentes de aluminosilicatos (cenizas volantes, cerámica, etc.) y mejoras en las mezclas de morteros o cementos híbridos.

Desarrollar la metodología general de los BTC de escoria activada y su posible normalización.

La incorporación de estos materiales al mercado de la construcción.

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Suiza para el desarrollo y la Cooperación COSUDE. (2011). *ENERGY EFFICIENCY IN ARTISANAL BRICK KILNS IN LATIN AMERICA TO MITIGATE CLIMATE CHANGE* (Eficiencia energética en ladrilleras artesanales) (p. 31). México, City: Red Ladrillera de Latino America. Recuperado de <http://www.redladrilleras.net/assets/files/f99822ad87d534ef8158c302a72ccc12.pdf>
- Banupriya, C., John, S., Suresh, R., Divya, E., & Vinitha, D. (2016). Experimental Investigations on Geopolymer Bricks/Paver Blocks. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(16). <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i16/92209>
- Cortés Salmerón, O. F. (2016). *Síntesis de geopolímeros por activación alcalina de escoria de acero* (Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México, Cd de México.
- Cristelo, N., Glendinning, S., Miranda, T., Oliveira, D., & Silva, R. (2012). Soil stabilisation using alkaline activation of fly ash for self compacting rammed earth construction. *Construction and Building Materials*, 36, 727-735. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.037>
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*, 37(Reprint of a paper published 2), 1633-1656.
- Delgado, M. C. J., & Guerrero, I. C. (2006). Earth building in Spain. *Construction and Building Materials*, 20(9), 679-690. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.006>
- Diop, M. B., Grutzeck, M. W., & Molez, L. (2011). Comparing the performances of bricks made with natural clay and clay activated by calcination and addition of sodium silicate. *Applied Clay Science*, 54(2), 172-178. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.08.005>
- El-Mahllawy, M. S., & Kandeel, A. M. (2014). Engineering and mineralogical characteristics of stabilized unfired montmorillonitic clay bricks. *HBRC Journal*, 10(1), 82-91. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2013.08.009>
- Fernández-Jiménez, A., Puertas, F., & Fernández-Carrasco, L. (2006). Procesos de activación alcalino-sulfáticos de una escoria española de alto horno.
- García Lodeiro, M. I. (2008). Compatibilidad de geles cementantes CSH y NASH: estudios en muestras reales y en polvos sintéticos.

- García Mejía, T. A. (2012). *Síntesis y caracterización de geopolímeros a base de clinoptilolita y montmorillonita* (Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México, Cd de México.
- Gaviria, Y., Nallive, O., Bedoya Montoya, C. M., & Gómez Eusse, J. D. (2012). Hacia un avance ambiental y tecnológico de la construcción con tierra como patrimonio futuro. Del bloque de suelo cemento (BSC) al bloque de tierra con geopolímeros (BTG). *Apuntes: Revista de Estudios sobre Patrimonio Cultural-Journal of Cultural Heritage Studies*, 25(2), 240–247.
- Hall, M. R., Lindsay, R., & Krayenhoff, M. (Eds.). (2012). *Modern earth buildings: materials, engineering, construction and applications*. Oxford: Woodhead Pub Ltd.
- Hawa, A., Tonnyopas, D., & Prachasaree, W. (2014). Performance Evaluation of Metakaolin Based Geopolymer Containing Parawood Ash and Oil Palm Ash Blends. *Materials Science*, 20(3). <https://doi.org/10.5755/j01.ms.20.3.4543>
- Kumar, S. (2015). A STUDY ON GEOPOLYMER ECO BRICKS.
- López, F. (2004). *FUNDAMENTOS DE POLÍMEROS.pdf*. Apuntes de química, Mérida, Venezuela.
- Maskell, D., Heath, A., & Walker, P. (2014). *Geopolymer Stabilisation of Unfired Earth Masonry Units.pdf*. *Key Engineering Materials*, 600. <https://doi.org/https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.600.175>
- Morales-Domínguez, V. J., Ortiz-Guzmán, M., & Alavéz-Ramírez, R. (2007). Mejoramiento de las propiedades mecánicas del adobe compactado. *Nature Desar*, 5(1), 41–8.
- Muntohar, A. S. (2011). Engineering characteristics of the compressed-stabilized earth brick. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4215-4220. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.061>
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2005a). *NMX-C-404-ONNCCE-2005*. México, Cd de México: Diario Oficial de la federación.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2005b). *NMX-C-441-ONNCCE*. México, Cd de México: Diario Oficial de la federación.
- Oti, J. E., Kinuthia, J. M., & Bai, J. (2009). Engineering properties of unfired clay masonry bricks. *Engineering Geology*, 107(3-4), 130-139. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.05.002>

- Pacheco-Torgal, F., Lourenco, P. B., Labrincha, J. A., Kumar, S., & Chindaprasirt, P. (Eds.). (2012). *Eco-efficient masonry bricks and blocks Design, properties and durability*. Oxford: Woodhead Publishing.
- Palomo, A., & Fernández-Jiménez, A. (2011). Alkaline activation, procedure for transforming fly ash into new materials. Part I: Applications. En *World of Coal Ash (WOCA) Conference* (pp. 1–14). Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Ana_Fernandez-Jimenez/publication/268003550_Alkaline_activation_procedure_for_transforming_fly_ash_into_new_materials._Part_I_Applications/links/5601773208aeb30ba7345cc6.pdf
- Puertas, F. (1993). Escorias de alto horno: composición y comportamiento hidráulico. *Materiales de construcción*, 43(229), 37–48.
- Puertas, F. (1995). Cementos de escorias activadas alcalinamente: Situación actual y perspectivas de futuro. *Materiales de Construcción*, 45(239), 53–64.
- SEMARNAT. (2017). SEMARNAT [Secretaria de Gobierno]. Recuperado de www.semarnat.gob
- V.D. Glukhovsky. (1965). *Soil silicates, Their properties, Technology and manufacturing and fields of application* (Doct Tech Sc). Civil Engineering Institute, Kiev.

ANEXO

A

En el anexo A se presentan los resultados de las escorias activadas, con las diferentes molaridades y las relaciones l/s.

Tabla Resistencia de la escoria con l/s de 0.4 y con molaridades de 8 y 10.

0.4				
Pasta	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	1 Día
8 M	17.72	18.10	16.51	17.443
10 M	12.28	8.95	10.68	10.634
pasta	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	3 Días
8 M	27.92	38.18	42.46	36.186
10 M	17.62	18.00	18.52	18.045
pasta	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	7 Días
8 M	54.04	50.42	54.13	52.862
10 M	52.53	53.82	51.55	52.634
pasta	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	15 Días
8 M	37.09	41.18	41.18	39.814
10 M	51.01	49.18	51.00	50.393

Tabla Resistencia de la escoria con l/s de 0.6 y con molaridades de 8 y 10.

0.6				
pasta	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	1 Día
8 M	5.85	5.20	5.13	5.392
10 M	3.79	3.87	3.76	3.807
pasta	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	3 Días
8 M	11.14	9.71	11.09	10.647
10 M	17.00	16.08	15.84	16.308
pasta	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	7 Días
8 M	27.24	23.78	26.42	25.812
10 M	20.73	18.66	20.37	19.921
pasta	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	15 Días
8 M	28.84	21.77	33.16	27.920
10 M	19.06	16.58	16.58	17.406

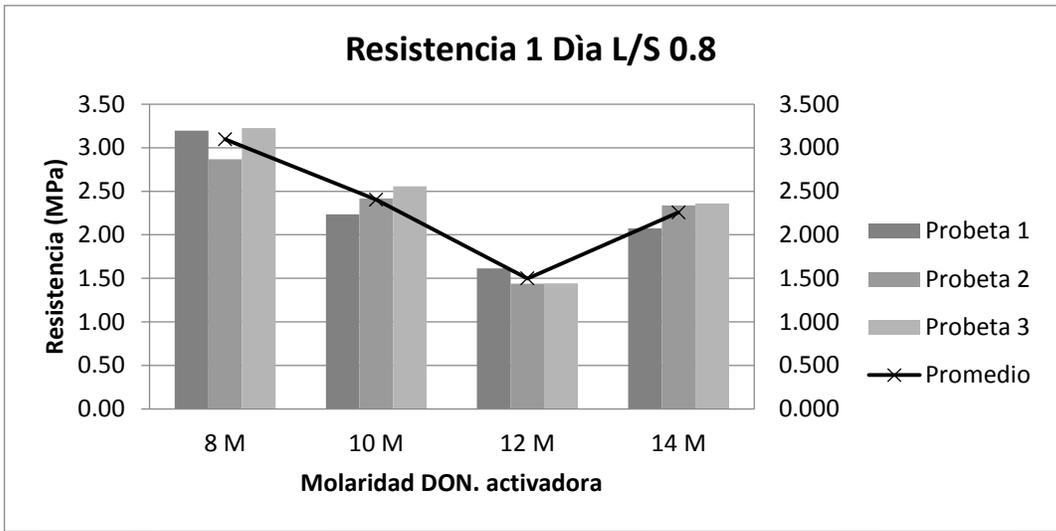
Pastas de cemento que sirven de control de las pastas activadas de escoria, así como comparativa de resultados.

Tabla Resistencia de las pastas de cemento con relaciones de 0.4, 0.6, 0.8.

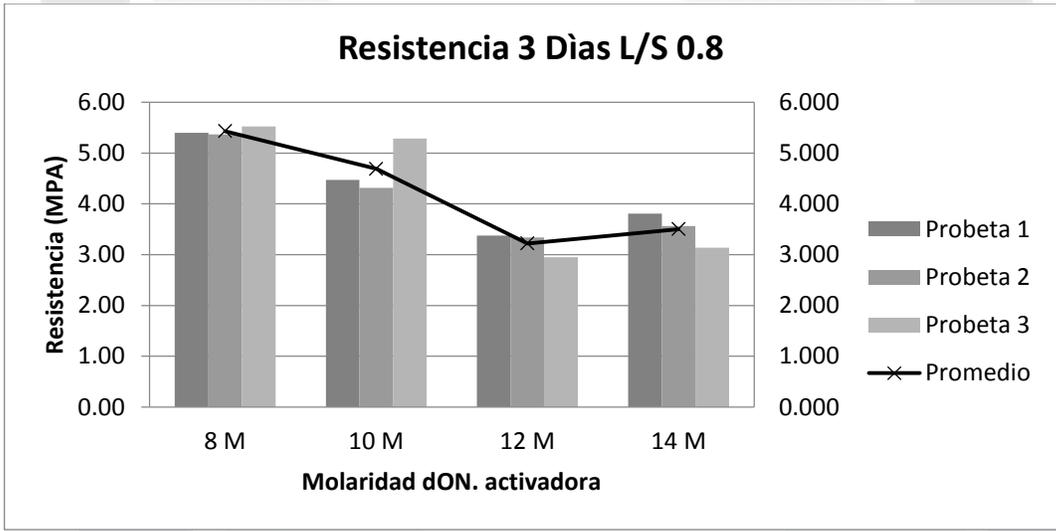
Pastas cemento				
1 día	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
0.4	8.49	8.37	8.09	8.317
0.6	2.71	3.09	3.20	3.000
0.8	1.20	1.54	1.60	1.447
3 días	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
0.4	27.03	25.77	28.66	27.154
0.6	12.33	12.18	11.96	12.155
0.8	3.56	4.10	3.23	3.630
7 días	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
0.4	27.21	26.42	27.32	26.983
0.6	13.58	12.60	13.88	13.351
0.8	5.23	6.45	6.20	5.960
15 días	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
0.4	26.93	28.03	25.67	26.876
0.6	15.86	15.47	15.23	15.520
0.8	6.45	6.01	7.12	6.527

Tabla Resistencia de la escoria con l/s de 0.8 y con molaridades de 8, 10, 12, 14.

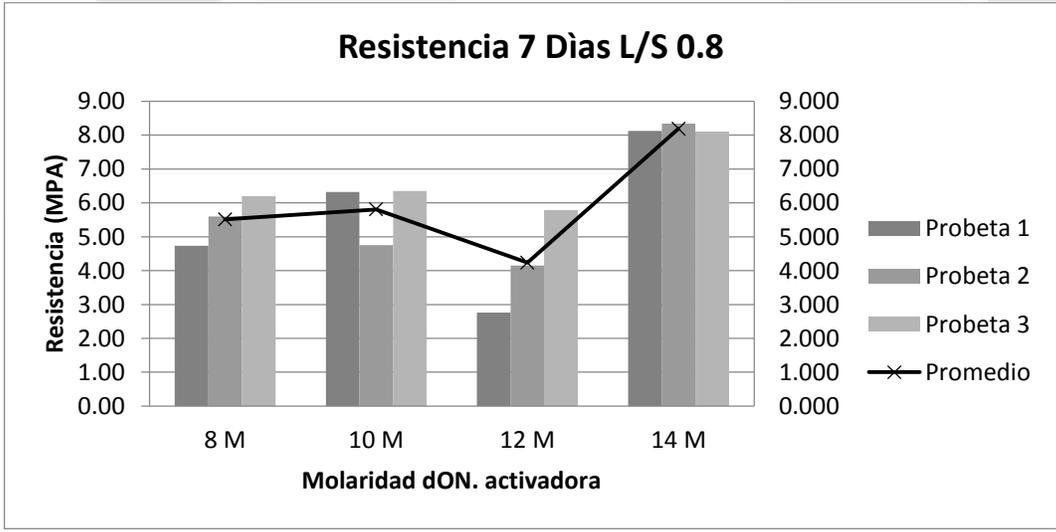
0.8				
pasta	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	1 Día
8 M	3.20	2.87	3.23	3.097
10 M	2.23	2.42	2.56	2.402
12 M	1.61	1.44	1.44	1.498
14 M	2.07	2.34	2.36	2.257
pasta	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	3 Días
8 M	5.40	5.37	5.52	5.430
10 M	4.47	4.31	5.29	4.689
12 M	3.38	3.34	2.95	3.221
14 M	3.81	3.56	3.13	3.502
pasta	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	7 Días
8 M	4.73	5.60	6.20	5.511
10 M	6.32	4.75	6.35	5.808
12 M	2.76	4.15	5.79	4.233
14 M	8.13	8.34	8.11	8.191
pasta	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	15 Días
8 M	5.01	5.94	6.58	5.842
10 M	6.70	5.04	6.73	6.156
12 M	2.93	4.40	6.13	4.487
14 M	8.62	8.84	8.59	8.683



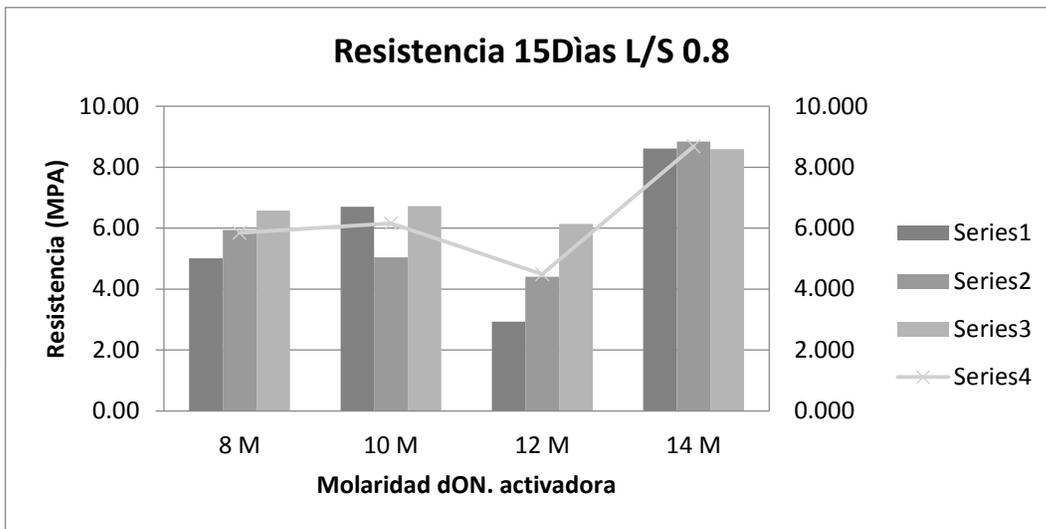
Gráfica de resistencia



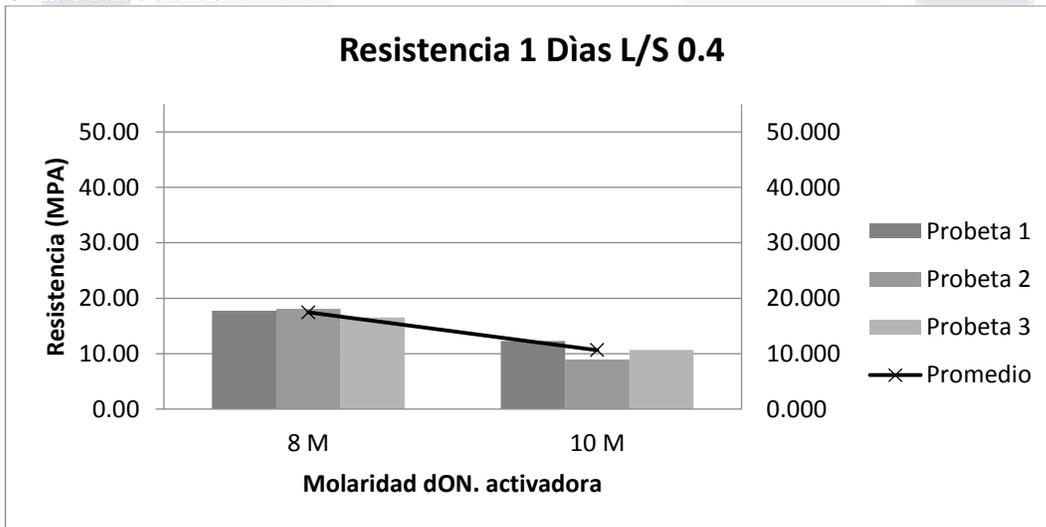
Gráfica de resistencia



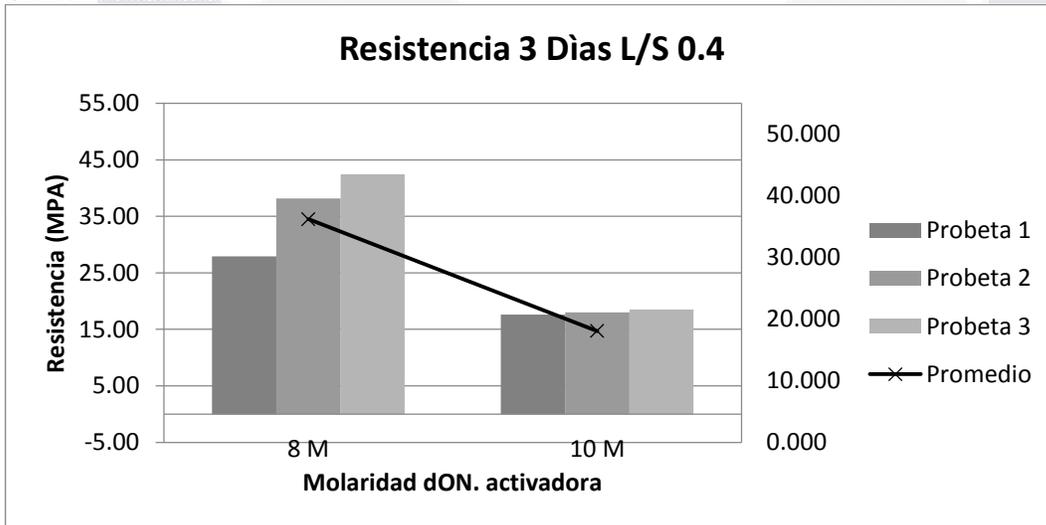
Gráfica de resistencia



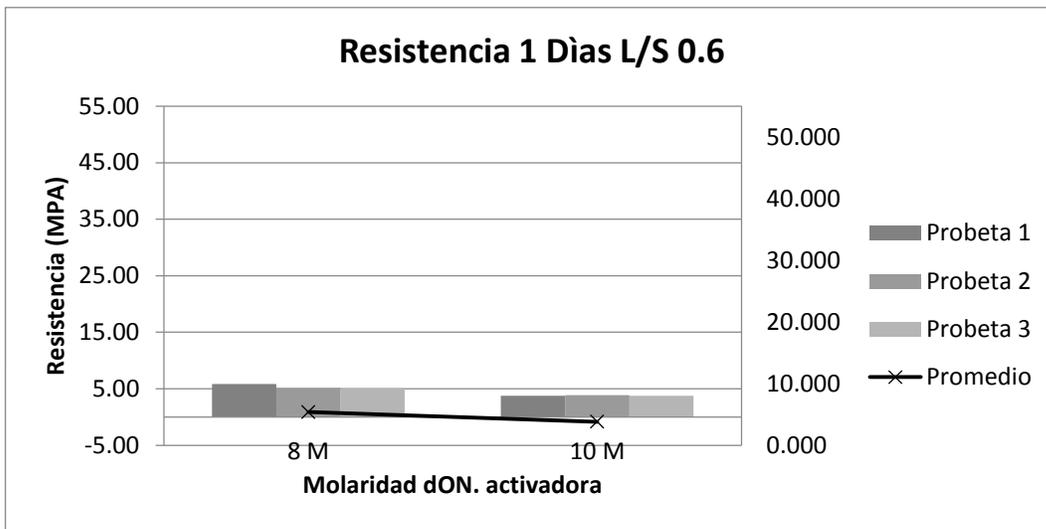
Gráfica de resistencia



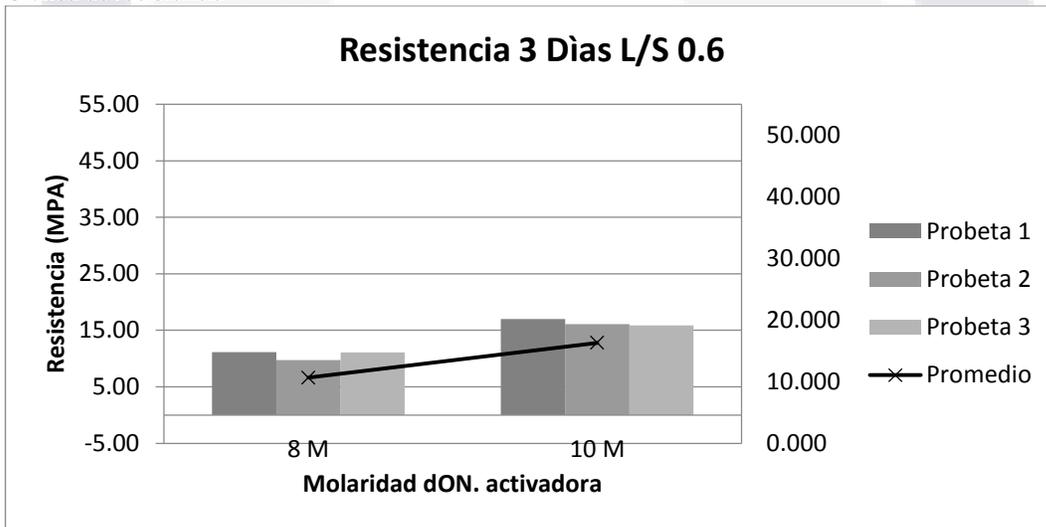
Gráfica de resistencia



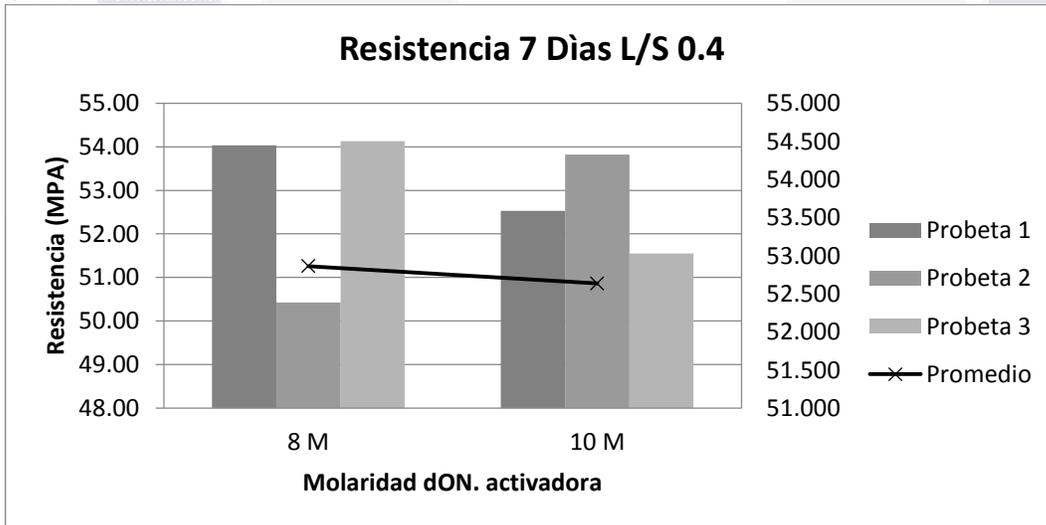
Gráfica de resistencia



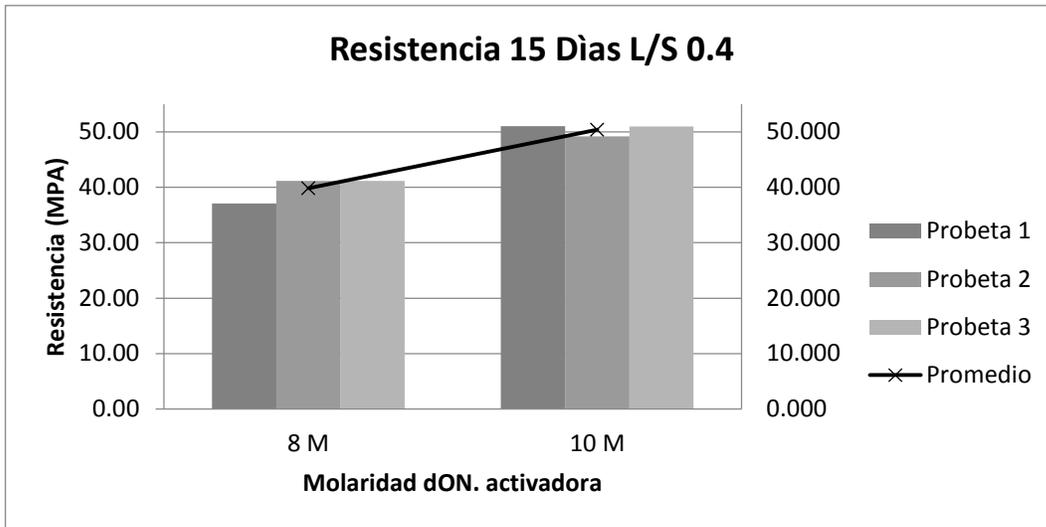
Gráfica de resistencia



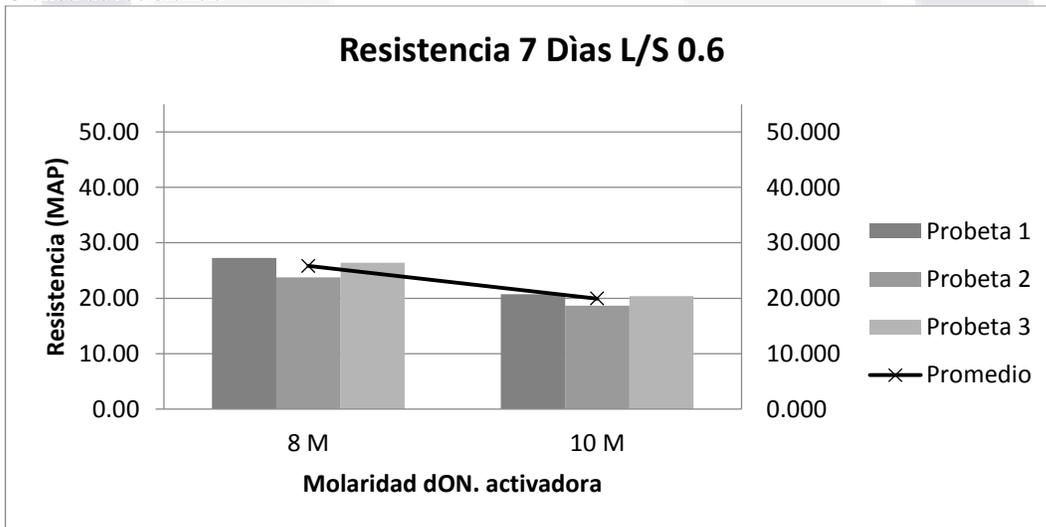
Gráfica de resistencia



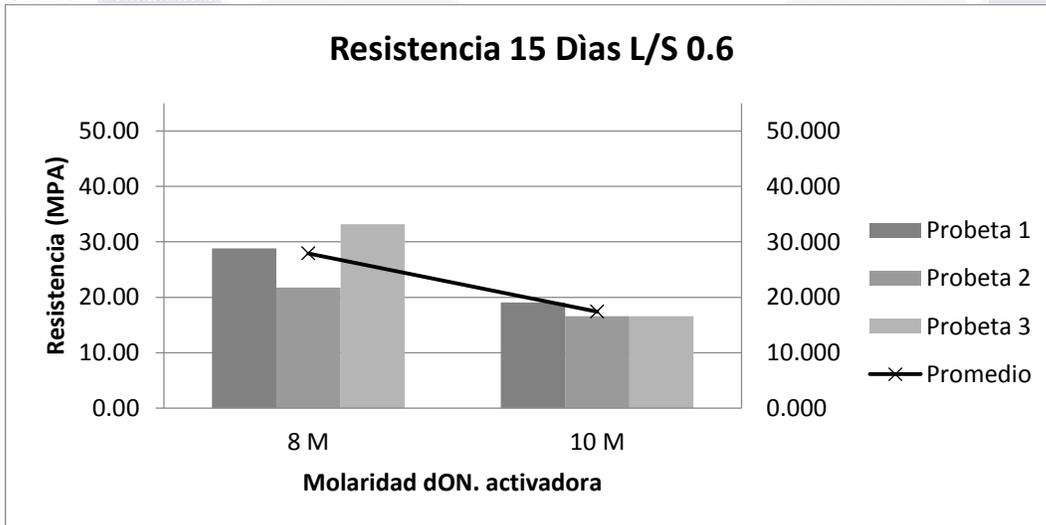
Gráfica de resistencia



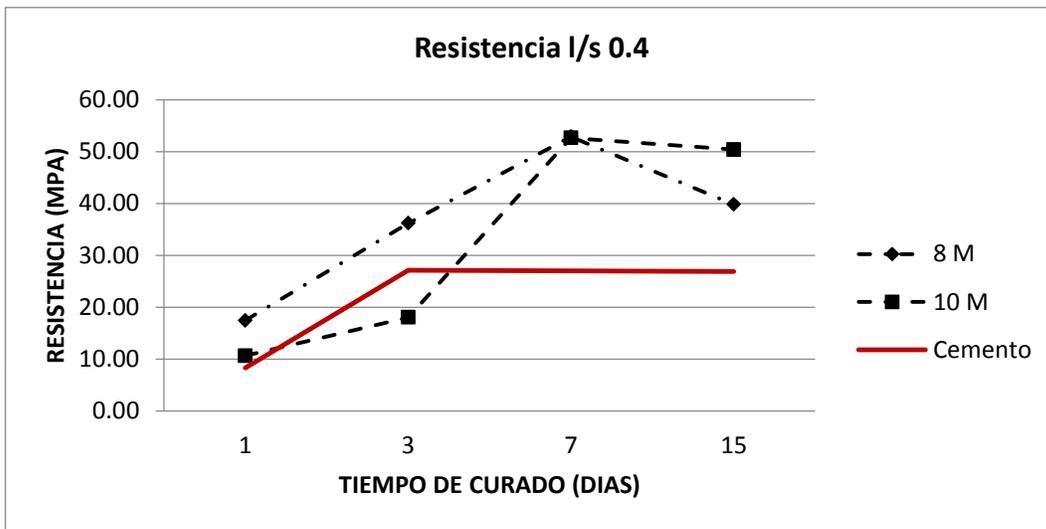
Gráfica de resistencia



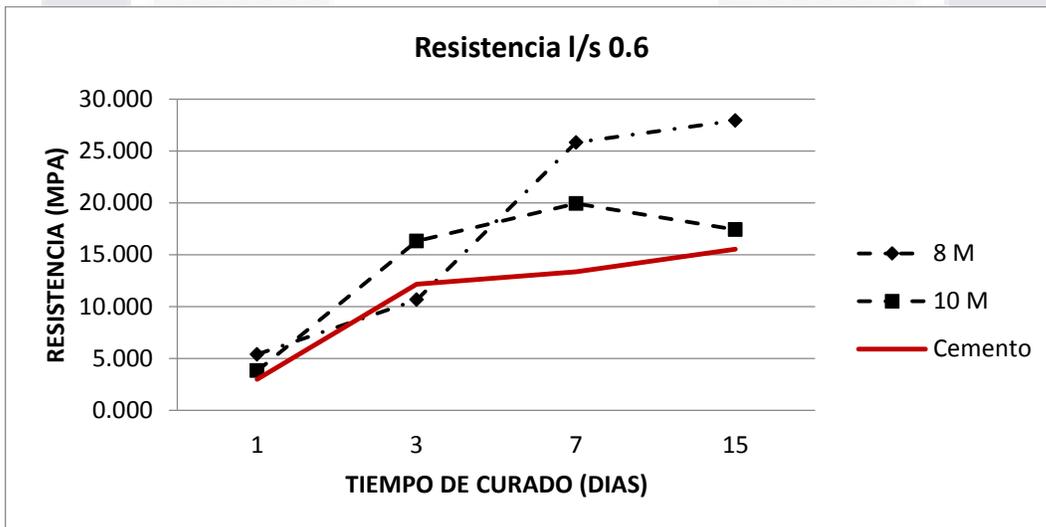
Gráfica de resistencia



Gráfica de resistencia



Gráfica de resistencia comparando la molaridad con la misma l/s



Gráfica de resistencia comparando la molaridad con la misma l/s



ANEXO B

Compresion Mezcla suelo+ escoria activada																	
Mezcla	3 Días			7 Días			14 Días			28 Días			Resumen en Mpa				
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	3 Días	7 Días	14 Días	28 Días	Promedio
P5E	10.76	10.01	9.53	18.14	16.87	16.07	24.82	23.08	21.98	30.44	28.31	26.96	0.99	1.67	2.28	2.80	1.94
P10E	24.38	22.67	21.59	26.99	25.10	23.90	26.03	24.21	23.06	27.13	25.23	24.03	2.24	2.48	2.40	2.50	2.41
P15E	23.71	22.05	21.00	28.17	26.20	24.95	27.63	25.70	24.48	29.52	27.45	26.14	2.18	2.59	2.54	2.72	2.51
P20E	19.03	17.70	16.86	28.06	26.10	24.86	44.97	41.82	39.83	48.63	45.23	43.08	1.75	2.58	4.14	4.48	3.24
P25E	24.67	22.94	21.85	38.28	35.60	33.90	46.75	43.48	41.41	53.24	49.51	47.15	2.27	3.52	4.30	4.90	3.75

Compresión Mezcla de suelo+escoria activada + arcilla																	
Mezcla	3 Días			7 Días			14 Días			28 Días			Resumen en Mapa				
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	3 Días	7 Días	14 Días	28 Días	Promedio
P5E10C	8.98	8.08	7.35	20.61	18.55	16.86	31.19	28.07	25.52	40.81	36.73	33.39	0.80	1.83	2.77	3.63	2.26
P10E10C	18.53	16.68	15.16	50.01	45.01	40.92	51.58	46.42	42.20	65.88	59.29	53.90	1.65	4.44	4.58	5.85	4.13
P15E10C	26.68	24.01	21.83	76.49	68.84	62.58	80.77	72.69	66.08	83.59	75.23	68.39	2.37	6.80	7.18	7.43	5.94
P20E10C	44.33	39.90	36.27	104.21	93.79	85.26	82.82	74.54	67.76	90.26	81.23	73.85	3.94	9.26	7.36	8.02	7.14
P25E10C	62.27	56.04	50.95	128.99	116.09	105.54	112.90	101.61	92.37	122.26	110.03	100.03	5.53	11.46	10.03	10.86	9.47

Compresion Humeda 24 h Mezcla de suelo+ escoria activada + arcilla																	
Mezcla	3 Días			7 Días			14 Días			28 Días			Resumen en Mpa				
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	3 Días	7 Días	14 Días	28 Días	Promedio
P5E10C	11.24	10.12	9.20	11.66	10.49	9.54	5.36	4.82	4.38	4.59	4.13	3.75	1.00	1.04	0.48	0.41	0.73
P10E10C	18.62	16.76	15.24	22.82	20.54	18.67	13.66	12.29	11.17	15.28	13.75	12.50	1.65	2.03	1.21	1.36	1.56
P15E10C	26.06	23.45	21.32	27.59	24.83	22.57	18.36	16.52	15.02	19.16	17.24	15.67	2.31	2.45	1.63	1.70	2.02
P20E10C	61.30	55.17	50.15	51.62	46.46	42.24	32.70	29.43	26.75	41.57	37.41	34.01	5.45	4.59	2.91	3.69	4.16
P25E10C	117.97	106.17	96.52	59.18	53.26	48.42	57.82	52.04	47.31	51.87	46.68	42.44	10.48	5.26	5.14	4.61	6.37

En las tablas anteriores se muestran los resultados de las mezclas elaboradas en tercias, donde se registra la resistencia a la compresión, la absorción y datos que determinaron la selección de la mejor mezcla.

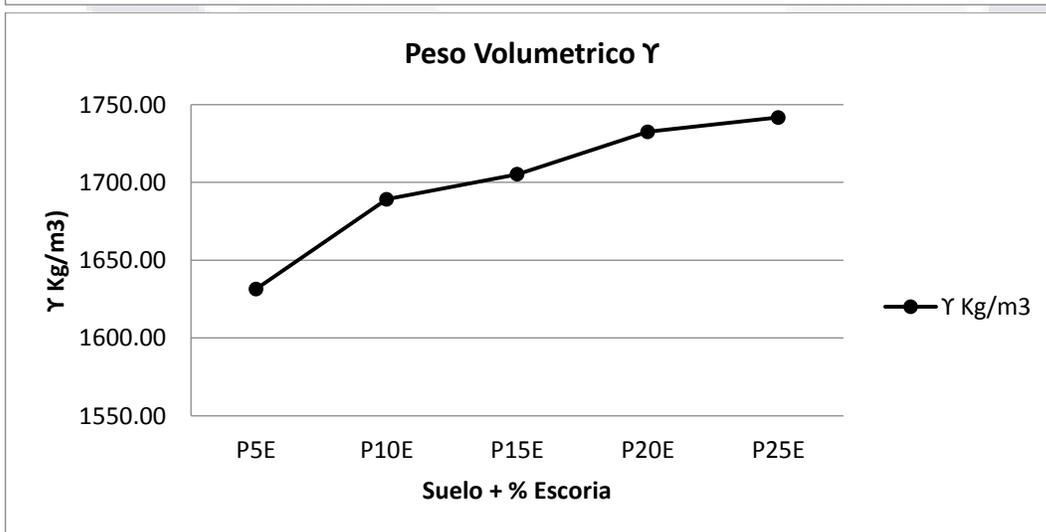
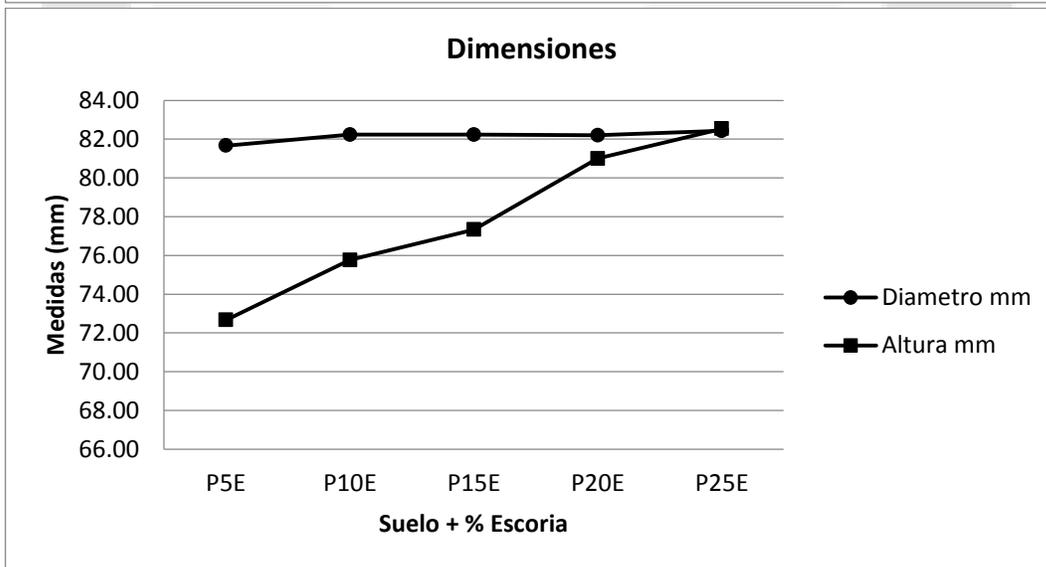
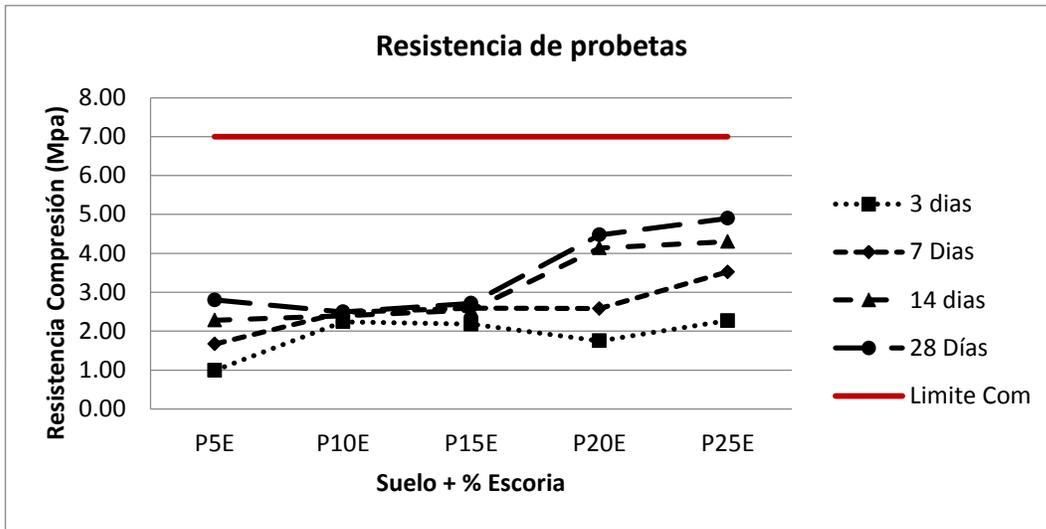
Compresion mezcla óptima																		
Mezcla	3 Dias			7 Dias			14 Dias			28 Dias			Resumen en Mpa					
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	3 Dias	7 Dias	14Días	28Días	Media	
P23E10C	110.57	99.51	90.46	127.96	115.16	104.69	131.37	118.23	107.48	156.48	140.83	128.03	9.82	11.37	11.67	13.90	11.69	

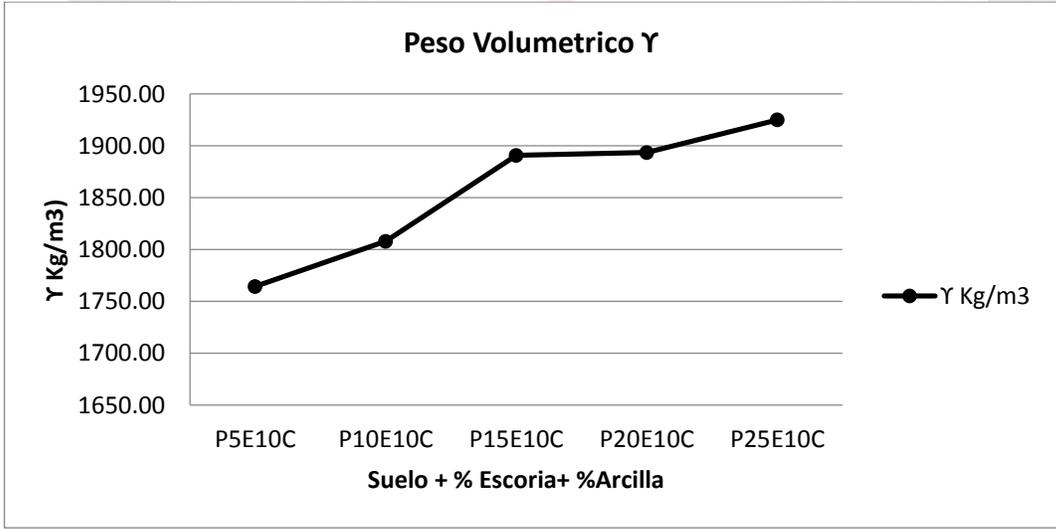
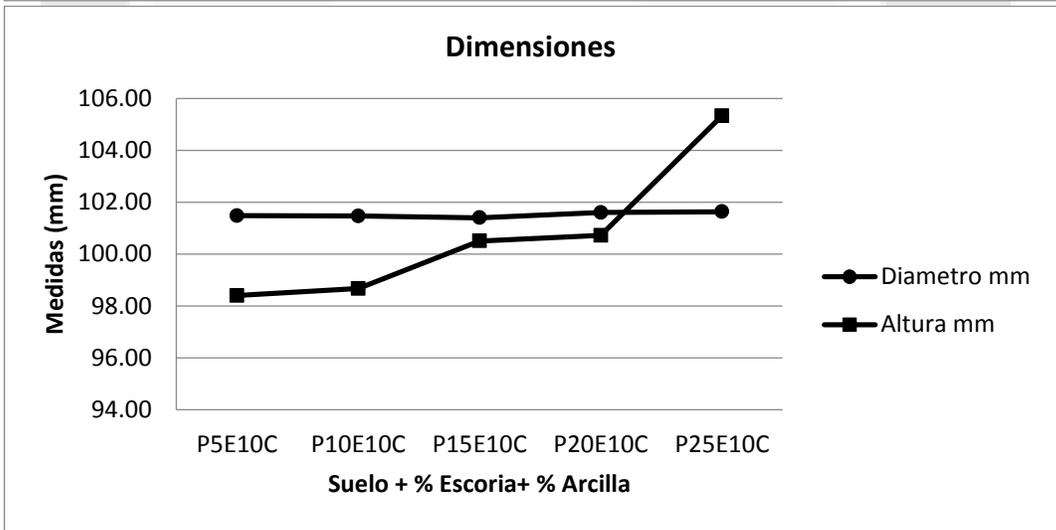
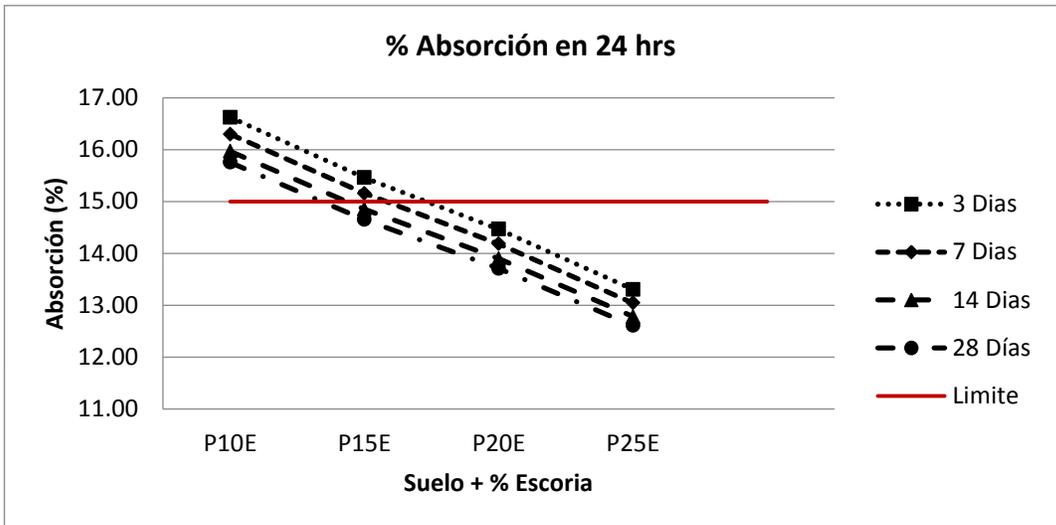
Absorcion mezcla óptima																		
Mezcla	3 Dias			7 Dias			14 Dias			28 Dias			Resumen					
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	3Días	7Días	14Días	28Días	Media	
P23E10C	9.02	8.66	8.33	11.69	11.22	10.79	13.02	12.50	12.02	15.01	14.41	13.59	8.67	11.23	12.51	14.34	11.69	

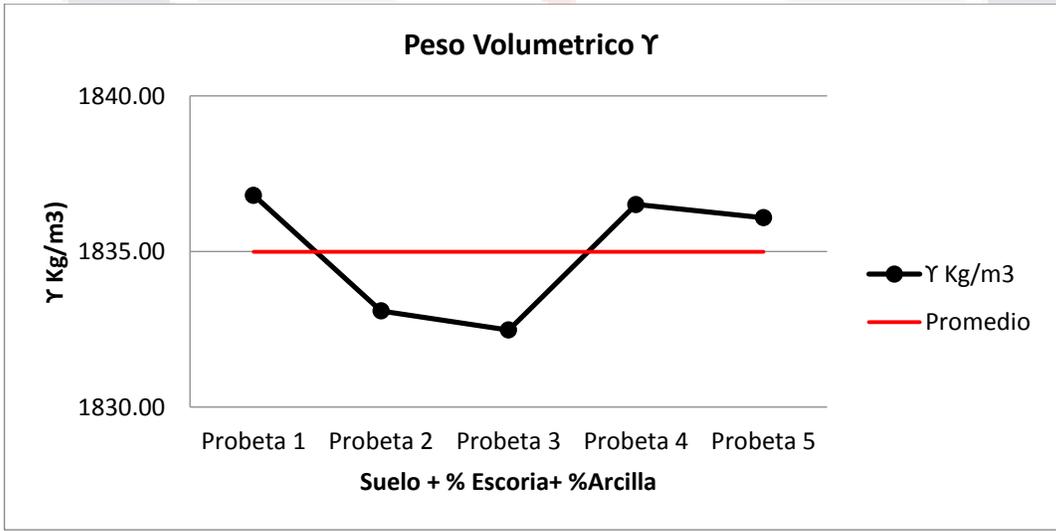
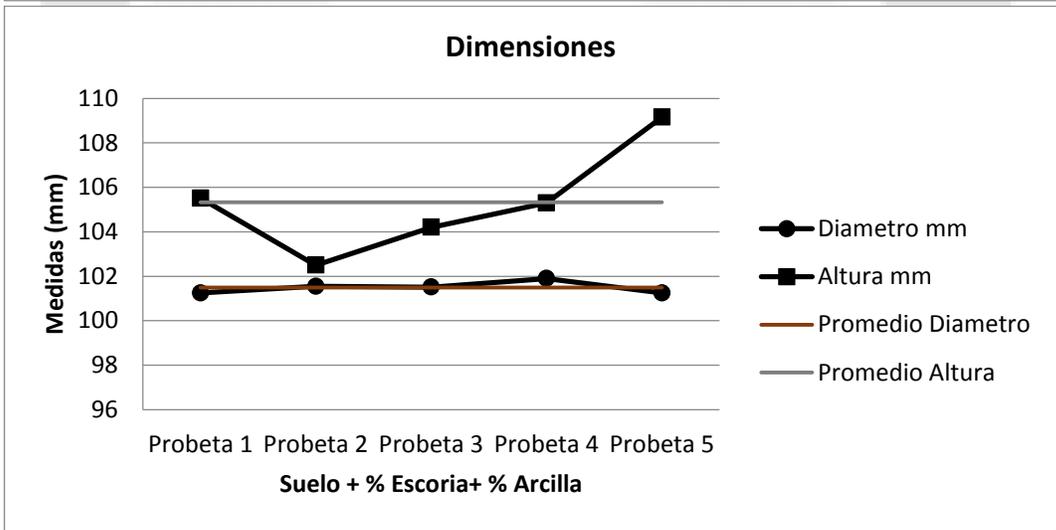
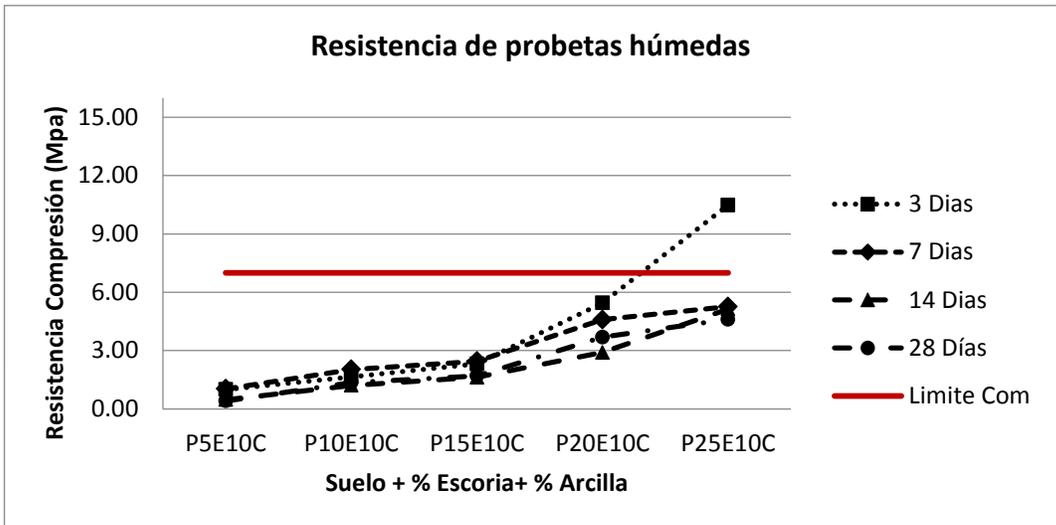
Compresion humeda 24 h mezcla óptima																		
Mezcla	3 Dias			7 Dias			14 Dias			28 Dias			Resumen en Mpa					
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	3Días	7Días	14Días	28Días	Media	
P23E10C	72.73	65.4	59.51	68.22	61.40	55.82	71.70	64.53	58.66	67.50	60.75	55.23	6.46	6.06	6.37	6.00	6.22	

Absorcion mezclas suelo+escoria activada																		
Mezcla	3 Dias			7 Dias			14 Dias			28 Dias			Resumen					
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	3 Dias	7 Dias	14 Dias	28 Dias	Promedio	
P5E	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	#iDIV/0!	#iDIV/0!	#iDIV/0!	#iDIV/0!	#iDIV/0!	
P10E	17.96	17.0646	14.84	17.61	16.73	14.55	17.26	16.40	14.26	16.91	16.23	14.11	16.62	16.30	15.97	15.75	16.16	
P15E	16.71	15.8712	13.80	16.38	15.56	13.53	16.05	15.25	13.26	15.73	15.10	13.13	15.46	15.16	14.85	14.65	15.03	
P20E	15.63	14.8512	12.91	15.33	14.56	12.66	15.02	14.27	12.41	14.72	14.13	12.28	14.47	14.18	13.90	13.71	14.06	
P25E	14.38	13.6578	11.88	14.09	13.39	11.64	13.81	13.12	11.41	13.54	12.99	11.30	13.30	13.04	12.78	12.61	12.93	

Absorcion mezclas suelo+ escorias activadas+ arcilla																		
Mezcla	3 Dias			7 Dias			14 Dias			28 Dias			Resumen					
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	3 Dias	7 Dias	14 Dias	28 Dias	Promedio	
P5E10C	13.03	12.51	12.03	15.24	14.63	14.07	21.03	20.19	19.41	19.84	19.05	17.97	12.52	14.65	20.21	18.96	16.58	
P10E10C	9.01	8.65	8.32	16.81	16.14	15.52	19.74	18.95	18.22	19.43	18.65	17.59	8.66	16.16	18.97	18.56	15.59	
P15E10C	8.79	8.44	8.12	11.76	11.29	10.86	16.96	16.28	15.65	17.72	17.01	16.05	8.45	11.30	16.30	16.93	13.24	
P20E10C	7.99	7.67	7.38	10.58	10.16	9.77	15.96	15.32	14.73	15.83	15.20	14.34	7.68	10.17	15.34	15.12	12.08	
P25E10C	2.78	2.67	2.57	10.79	10.36	9.96	14.36	13.79	13.26	14.31	13.74	12.96	2.67	10.37	13.80	13.67	10.13	









Esfuerzo- Deformación					
Datos	Probeta	P23EC10	Bloque de escoria activada		
Di	101.51	mm	Def max mm	2.739	
hi	104.2	mm	A	8092.962666	mm2
Def ini	5.62	mm	97 s	Tiempo	
RESULTADOS					
Tiempo s	Carga KN	Def LEC mm	Def mm	Esfuerzo MPa	ε
0	1.004	5.62	0	0.124	0
1	0.673	5.621	0.001	0.083	0
2	0.683	5.624	0.004	0.084	0
3	0.797	5.644	0.024	0.098	0.0002
4	0.963	5.657	0.037	0.119	0.0004
5	1.149	5.677	0.057	0.142	0.0005
6	1.418	5.697	0.077	0.175	0.0007
7	1.708	5.728	0.108	0.211	0.001
8	2.112	5.755	0.135	0.261	0.0013
9	2.588	5.795	0.175	0.32	0.0017
10	3.157	5.824	0.204	0.39	0.002
11	3.81	5.852	0.232	0.471	0.0022
12	4.545	5.898	0.278	0.562	0.0027
13	5.414	5.933	0.313	0.669	0.003
14	6.315	5.967	0.347	0.78	0.0033
15	7.298	5.997	0.377	0.902	0.0036
16	8.302	6.023	0.403	1.026	0.0039
17	9.358	6.044	0.424	1.156	0.0041
18	10.424	6.07	0.45	1.288	0.0043
19	11.439	6.086	0.466	1.413	0.0045
20	12.443	6.111	0.491	1.538	0.0047
21	13.437	6.134	0.514	1.66	0.0049
22	14.369	6.158	0.538	1.775	0.0052
23	15.29	6.178	0.558	1.889	0.0054
24	16.18	6.199	0.579	1.999	0.0056
25	17.029	6.217	0.597	2.104	0.0057
26	17.857	6.234	0.614	2.206	0.0059
27	18.685	6.275	0.655	2.309	0.0063
28	19.472	6.289	0.669	2.406	0.0064
29	20.248	6.305	0.685	2.502	0.0066
30	21.014	6.324	0.704	2.597	0.0068
31	21.77	6.342	0.722	2.69	0.0069
32	22.505	6.384	0.764	2.781	0.0073
33	23.261	6.4	0.78	2.874	0.0075
34	23.996	6.422	0.802	2.965	0.0077

35	24.752	6.445	0.825	3.058	0.0079
36	25.507	6.465	0.845	3.152	0.0081
37	26.014	6.509	0.889	3.214	0.0085
38	27.081	6.527	0.907	3.346	0.0087
39	27.816	6.56	0.94	3.437	0.009
40	28.592	6.581	0.961	3.533	0.0092
41	29.369	6.604	0.984	3.629	0.0094
42	30.197	6.633	1.013	3.731	0.0097
43	31.004	6.658	1.038	3.831	0.01
44	31.863	6.678	1.058	3.937	0.0102
45	32.66	6.706	1.086	4.036	0.0104
46	33.52	6.733	1.113	4.142	0.0107
47	34.317	6.763	1.143	4.24	0.011
48	35.176	6.783	1.163	4.346	0.0112
49	35.994	6.804	1.184	4.448	0.0114
50	36.812	6.831	1.211	4.549	0.0116
51	37.66	6.858	1.238	4.653	0.0119
52	38.499	6.876	1.256	4.757	0.0121
53	39.348	6.91	1.29	4.862	0.0124
54	40.155	6.926	1.306	4.962	0.0125
55	41.014	6.946	1.326	5.068	0.0127
56	41.832	6.973	1.353	5.169	0.013
57	42.629	6.996	1.376	5.267	0.0132
58	43.458	7.021	1.401	5.37	0.0134
59	44.265	7.038	1.418	5.47	0.0136
60	45.093	7.074	1.454	5.572	0.014
61	45.911	7.092	1.472	5.673	0.0141
62	46.749	7.117	1.497	5.777	0.0144
63	47.567	7.136	1.516	5.878	0.0145
64	48.416	7.158	1.538	5.982	0.0148
65	49.224	7.179	1.559	6.082	0.015
66	50.062	7.205	1.585	6.186	0.0152
67	50.88	7.227	1.607	6.287	0.0154
68	51.687	7.24	1.62	6.387	0.0155
69	52.505	7.273	1.653	6.488	0.0159
70	53.302	7.297	1.677	6.586	0.0161
71	54.11	7.321	1.701	6.686	0.0163
72	54.876	7.344	1.724	6.781	0.0165
73	55.704	7.369	1.749	6.883	0.0168
74	56.491	7.4	1.78	6.98	0.0171
75	57.319	7.42	1.8	7.083	0.0173
76	58.106	7.442	1.822	7.18	0.0175

77	58.923	7.471	1.851	7.281	0.0178
78	59.72	7.495	1.875	7.379	0.018
79	60.518	7.527	1.907	7.478	0.0183
80	61.294	7.546	1.926	7.574	0.0185
81	62.07	7.567	1.947	7.67	0.0187
82	62.836	7.61	1.99	7.764	0.0191
83	63.582	7.633	2.013	7.856	0.0193
84	64.348	7.662	2.042	7.951	0.0196
85	65.083	7.689	2.069	8.042	0.0199
86	65.756	7.725	2.105	8.125	0.0202
87	66.408	7.762	2.142	8.206	0.0206
88	66.853	7.815	2.195	8.261	0.0211
89	67.07	7.858	2.238	8.287	0.0215
90	67.402	7.924	2.304	8.328	0.0221
91	67.712	7.967	2.347	8.367	0.0225
92	67.888	8.035	2.415	8.389	0.0232
93	68.075	8.11	2.49	8.412	0.0239
94	68.499	8.177	2.557	8.464	0.0245
95	68.789	8.285	2.665	8.5	0.0256
96	68.178	8.359	2.739	8.424	0.0263
97	67.702	8.51	2.89	8.366	0.0277
ε					
ε	0.0263		E	3294.961977	kg/cm2
Esf Max	8.50	MPa	E	323.1939163	MPa
Esf S1	0.098				
Est S2	3.437				
ε1	0.0002				
ε2	0.0090				
E m	379.43	MPa			
E m	3868.29	Kg/cm2			