



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

**PROPUESTA DE DESARROLLO TECNOLÓGICO PARA PRODUCCIÓN DE BLOQUES BTC
ESTABILIZADOS CON AGLOMERANTE PUZOLÁNICO**

Edgar Fernando Alvarado Figueroa

Asesorado por el Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz

Guatemala, octubre de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE DESARROLLO TECNOLÓGICO PARA PRODUCCIÓN DE
BLOQUES BTC ESTABILIZADOS CON AGLOMERANTE PUZOLÁNICO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

EDGAR FERNANDO ALVARADO FIGUEROA

ASESORADO POR EL ING. FRANCISCO JAVIER QUIÑÓNEZ DE LA CRUZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Inga. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Claudio César Castañón Contreras
EXAMINADOR	Ing. Juan Ramón Ordoñez Hernández
EXAMINADOR	Ing. Luis Estuardo Saravia Ramírez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

PROPUESTA DE DESARROLLO TECNOLÓGICO PARA PRODUCCIÓN DE BLOQUES BTC ESTABILIZADOS CON AGLOMERANTE PUZOLÁNICO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 30 de octubre de 2018.



Edgar Fernando Alvarado Figueroa



Guatemala, 29 de marzo de 2019

Ingeniero
José Gabriel Ordóñez Morales
Coordinador Área de Materiales y Construcciones Civiles
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería

Ingeniero Ordóñez:

Tengo el agrado de dirigirme a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación **"PROPUESTA DE DESARROLLO TECNOLÓGICO PARA PRODUCCIÓN DE BLOQUES BTC ESTABILIZADOS CON AGLOMERANTE PUZOLÁNICO"**, desarrollado por el estudiante universitario **Edgar Fernando Alvarado Figueroa**, quien contó con mi asesoría.

Considero que el trabajo realizado por el estudiante **Alvarado Figueroa**, satisface los objetivos para los que fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,


Francisco Javier Quinonez de la Cruz
Ingeniero Civil Colegiado No. 1941

FRANCISCO JAVIER QUINONEZ DE LA CRUZ
Ingeniero civil colegiado No. 1941



USAC
TRICENTENARIA
 Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

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

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala,
 15 de mayo de 2019

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

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **PROPUESTA DE DESARROLLO TECNOLÓGICO PARA PRODUCCIÓN DE BLOQUES BTC ESTABILIZADOS CON AGLOMERANTE PUZOLÁNICO** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Edgar Fernando Alvarado Figueroa, CUI 2425794690101 y No. De Registro Estudiantil 201313837 quien contó con la asesoría del Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz.

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

Atentamente,

ID Y ENSEÑANZA A TODOS


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

FACULTAD DE INGENIERIA
 AREA DE MATERIALES Y
 CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/mrrm.

Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

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

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



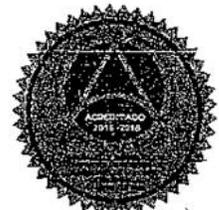
El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz y Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales al trabajo de graduación del estudiante Edgar Fernando Alvarado Figueroa **PROPUESTA DE DESARROLLO TECNÓLOGICO PARA PRODUCCIÓN DE BLOQUES BTC ESTABILIZADOS CON AGLOMERANTE PUZOLÁNICO** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco



Guatemala, octubre 2019

/mmm.



Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref.DTG.498.2019

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA DE DESARROLLO TECNOLÓGICO PARA PRODUCCIÓN DE BLOQUES BTC ESTABILIZADOS CON AGLOMERANTE PUZOLÁNICO**, presentado por el estudiante universitario **Edgar Fernando Alvarado Figueroa**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada ★
Decana

Guatemala, Octubre de 2019

AACE/asga
cc

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres

Marvin Evenildo Alvarado Espinoza y María Esther Figueroa Carrera, por su amor y apoyo en las diferentes etapas de mi educación.

Mis Hermanos

Marvin Grover y Hugo Ahmad Alvarado Figueroa, por estar siempre a mi lado.

A las familias

Alvarado y Figueroa, que siempre han estado pendientes de mi progreso académico.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por otorgarme la capacidad espiritual y material, para culminar mi carrera profesional.
Facultad de Ingeniería	Por proveerme los conocimientos necesarios para mi desarrollo académico en el campo de la Ingeniería Civil.
Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz	Por su valiosa guía y asesoramiento en este trabajo de graduación.
Ing. Marvin Grover Alvarado Figueroa	Por su apoyo brindado en el transcurso de mi carrera universitaria.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
ANTECEDENTES.....	XVII
JUSTIFICACIÓN.....	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXIII
1. SÍNTESIS DE RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES SOBRE PUZOLANA, REALIZADAS EN LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA	1
1.1. Resultados de la investigación geológica y caracterización física de puzolanas de la zona oriental de Guatemala	1
1.1.1. Resultados de investigación geológica.....	2
1.1.2. Resultados de ensayos de laboratorio.....	4
1.2. Resultados de la caracterización geológica y física de 8 muestras de puzolanas de origen volcánico de la región de occidente de Guatemala.....	6
1.2.1. Resultados de los ensayos en las muestras de puzolanas según normas de la sociedad americana para pruebas de materiales –ASTM–.....	6
1.3. Resultados del índice de reactividad mecánica de dieciocho muestras de materiales volcánicos de Guatemala	10

1.3.1.	Flujo de mezclas IAR e IRC	11
1.3.2.	Especímenes para su evaluación como IAR.....	13
1.3.3.	Especímenes para su evaluación como IRC.....	14
1.4.	Índice de reactividad puzolánica de diez bancos de materiales de la franja volcánica de Guatemala para la industria de cemento	16
1.4.1.	Resultados de la ubicación y cuantificación de la materia prima	17
1.4.2.	Resultados de la identificación de los materiales volcánicos.....	17
1.4.3.	Resultados de la caracterización física de los materiales volcánicos seleccionados	19
1.4.4.	Resultados de la caracterización física y química del hidróxido de calcio.....	19
1.4.5.	Resultados de la determinación del índice de actividad puzolánica de las muestras, en función de su respuesta mecánica.....	20
2.	SINTESIS DE RESULTADOS DE INVESTIGACIONES SOBRE BLOQUES DE TIERRA COMPACTADA, REALIZADOS EN LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS	23
2.1.	Bloques de tierra compactada estabilizados con aglomerante natural CP	23
2.2.	Parámetros de diseño de mampostería elaborada con bloques de tierra compactada BTC.....	27
2.2.1.	Ensayos de laboratorio a BTC.....	28

3.	IDENTIFICACION Y DESCRIPCION DE MAQUINARIA DISPONIBLE PARA LA ELABORACION DE AGLOMERANTES CON CAL PUZOLANA Y BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA EN UNA INDUSTRIA GUATEMALTECA	31
3.1.	Molino de Suspensión de Alta Presión	31
3.2.	Tamiz vibrador.....	37
3.3.	Máquina para elaboración de bloques de tierra comprimida ...	39
4.	PROPUESTA DE LINEAMIENTOS PARA EL DESARROLLO TECNOLÓGICO PARA LA PRODUCCIÓN DE BLOQUES DE TIERRA COMPACTADA ESTABILIZADOS CEMENTO, CAL Y PUZOLANA A NIVEL DE PEQUEÑA INDUSTRIA.....	45
4.1.	Transferencia de Tecnología	45
4.2.	Ejemplo de Investigación Aplicada	49
4.2.1.	Materiales a utilizar	49
4.2.1.1.	Cemento tipo ARI	49
4.2.1.2.	Cal hidratada	50
4.2.1.3.	Puzolana.....	50
4.2.1.4.	Arcilla.....	50
4.2.2.	Preparación de materiales.....	52
4.2.3.	Proporciones de las mezclas	53
4.2.4.	Norma a utilizar para ensayos de calidad.....	55
4.2.4.1.	Resistencia a compresión de BTC.....	55
4.2.4.2.	Humectación secado	57
4.2.4.3.	Ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET).....	59
4.2.4.4.	Ensayo de absorción de agua por capilaridad	60

4.2.5.	Maquinaria necesaria para fabricación de bloques.....	62
4.2.6.	Procedimiento de curado de los bloques de tierra compactada.....	62
4.2.7.	Costo del Bloque de tierra comprimida.....	62
4.3.	Desarrollo tecnológico.....	62
CONCLUSIONES.....		65
RECOMENDACIONES		67
BIBLIOGRAFÍA.....		69
ANEXO		71

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Desarrollo de la resistencia de 18 muestras con cemento	13
2.	Molino de suspensión de alta presión	32
3.	Elevador y depósito	33
4.	Vibrador.....	33
5.	Entrada al área de molienda	34
6.	Puerta para mantenimiento	34
7.	Maquinaria interna del molino	35
8.	Canal de paso para material procesado.....	35
9.	Silo de material molido correctamente	36
10.	Filtro de partículas finas	36
11.	Caja de controles	37
12.	Tamiz vibrador... ..	37
13.	Motores de máquina tamizadora	38
14.	Mallas para procesar el material	38
15.	Conductos extractores de material.....	39
16.	Maquina productora de bloques de tierra comprimida	40
17.	Mezclador de materiales	40
18.	Depósito para material para la producción de bloques	41
19.	Moldes para fabricación de bloques.....	42
20.	Palancas de control de procesos de fabricación	42
21.	Esquema general de transferencia de tecnología	46
22.	Resistencia a compresión de muestras 1, 2 y 3.....	51
23.	Resistencia a compresión muestra 4	52

24.	Resistencia a compresión de mezclas 4 y 8	56
25.	Aplicación de ensayo de erosión acelerada.....	60
26.	Inmersión de bloque en agua.....	61
27.	Bloques después del ensayo	61

TABLAS

I.	Resultado evaluación previa de los bancos.....	3
II.	Ubicación y dimensionamiento de los bancos	8
III.	Valor del flujo respecto a la cantidad de agua requerida (IAR).....	111
IV.	Cantidad de agua requerida para cada muestra con respecto a su valor de flujo (IRC).....	12
V.	Tabla comparativa, resultados de resistencia para IAR e IRC.....	15
VI.	Identificación de materiales volcánicos.....	18
VII.	Esfuerzos de primera grieta de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana ensayados a compresión	24
VIII.	Esfuerzos de ruptura de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana ensayados a compresión	25
IX.	Esfuerzos de primera grieta de los BTC estabilizados con cemento tipo UGC ensayados a compresión.....	25
X.	Esfuerzos de ruptura de los BTC estabilizados con cemento tipo UGC ensayados a compresión... ..	26
XI.	Resultados ensayo a compresión de unidades tipo A	28
XII.	Resultados ensayo a compresión de unidades tipo B	29
XIII.	Resultados ensayo a compresión de unidades con aglomerante ternario.....	29
XIV.	Normas sobre bloques de tierra compactada BTC	47
XV.	Resistencia a compresión (MPa)	52
XVI.	Mezclas 1 y 5 del grupo B.....	53

XVII.	Mezclas 2 y 6 del grupo B	54
XVIII.	Mezclas número 3 y 7 del grupo B.....	54
XIX.	Mezclas 4 y 8 del grupo B	55
XX.	Resistencia a la compresión respecto al área bruta, grupo B	56
XXI.	Condiciones de rechazo a ciclos de humectación secado	57
XXII.	Resultados mezcla 4.....	58
XXIII.	Resultados mezcla 8.....	58
XXIV.	Profundidad de huella en bloques del grupo B.....	59
XXV.	Coeficiente de absorción muestras 4 y 8 del grupo B	60

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm	Centímetros
cm²	Centímetro cuadrado
cv	Coeficiente de variación
σ	Desviación Estándar
g	Gramos
Kg	Kilogramo
Km	Kilómetro
Km²	Kilómetro cuadrado
Km³	Kilómetro cúbico
Mpa	Mega pascales
m	Metro
msnm	Metros sobre el nivel del mar
mm	Milímetros
ml	Mililitros
%	Porcentaje
f'c	Resistencia a la compresión
t	Tiempo

GLOSARIO

Aglomerante	Material que sirve para unir partículas de una o más sustancias y compactarlas, formando una sola masa.
Capilaridad	Es una propiedad física del agua por la que ella puede avanzar a través de un canal minúsculo (desde unos milímetros hasta micras de tamaño) siempre y cuando el agua se encuentre en contacto con ambas paredes de este canal y estas paredes se encuentren suficientemente juntas.
Eflorescencias	Cristales de sales, generalmente de color blanco, que se depositan en la superficie de los materiales.
Factibilidad	Refiere a la disponibilidad de los recursos necesarios para llevar a cabo los objetivos o metas señalados.
Fiabilidad	Probabilidad de buen funcionamiento de algo.
Lanzamiento	Acción de sacar un producto al mercado y promocionarlo para que llegue a un gran número de personas.
Molienda	Proceso en el cual se reduce la fineza de un material.

Oquedad	Espacio hueco en el interior de un cuerpo sólido.
Reactividad	Capacidad de reacción química que presenta ante otros reactivos.
Sistemática	Que sigue o se ajusta a un sistema (conjunto ordenado de normas y procedimientos).
Susceptible	Que tiene las condiciones necesarias para que suceda o se realice aquello que se indica.

RESUMEN

Este trabajo de investigación agrupa los resultados de las diversas investigaciones sobre puzolana, realizadas en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, con la finalidad de conocer el material puzolánico, para la elaboración de aglomerantes naturales, que posee Guatemala.

De igual forma, se incluyen los resultados de los trabajos sobre bloques de tierra compactada estabilizados con aglomerante cal-puzolana, realizados en los años 2014 y 2015 en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos. Asimismo, se identifica y caracteriza la maquinaria disponible para la elaboración de aglomerantes con cal-puzolana y bloques de tierra compactada (BTC), por medio de visitas técnicas a una de las industrias privadas de producción de elementos de mampostería en Guatemala.

Al realizar la síntesis de resultados de las investigaciones, conocer la maquinaria disponible en la industria guatemalteca y obtener información por medio de ensayos, se define una posible ruta para el desarrollo tecnológico de bloques de tierra comprimida estabilizados con un aglomerante a base de cal-puzolana a nivel de pequeña industria. También se propone un conjunto de lineamientos para realizar la transferencia tecnología al sector de pequeña industria.

Se hace la observación que no se da una recomendación en cuanto a mezclas y proporciones para elaboración de bloques de tierra comprimida debido a la diversidad de combinaciones posibles, sino una recomendación

general de pasos a seguir para lograr la transferencia de tecnología a la industria.

OBJETIVOS

General

Elaborar una propuesta de desarrollo tecnológico para la producción de bloques BTC estabilizados con aglomerante puzolánico, a partir de una síntesis de las investigaciones realizadas en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, sobre puzolanas y bloques de tierra comprimida.

Específicos

1. Desarrollar una síntesis bibliográfica a partir de los resultados obtenidos en investigaciones elaboradas sobre las puzolanas y bloques de tierra compactada, realizadas en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
2. Identificar y describir maquinaria disponible para la elaboración de aglomerantes con cal-puzolana y bloques de tierra comprimida, por medio de visitas de campo a una de las industrias guatemaltecas productoras de elementos de mampostería.
3. Analizar los resultados de los objetivos 1 y 2 para generar una propuesta de lineamientos del desarrollo tecnológico para la producción de bloques de tierra compactada estabilizados con un aglomerante a base de cal-puzolana, a nivel de pequeña industria.

ANTECEDENTES

En la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se han realizado diversas investigaciones sobre la puzolana en Guatemala. La principal investigación se realizó en los años 1988-1993, Conjuntamente con el Departamento de Materiales de la Universidad de Calgary y apoyados por el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo de Canadá.

En ese proyecto se estableció que Guatemala cuenta con un potencial recurso de origen volcánico que puede ser utilizado como adiciones en la producción de cemento o para uso directamente en la elaboración de concreto.

En el año 2010 se publicó el informe de la investigación denominada *Estado del arte de puzolanas naturales volcánicas como adiciones activas en la producción de cementos*, desarrollada por el Ingeniero Civil Francisco Javier Quiñonez de la Cruz. En el informe presentó un resumen del estado del arte de las puzolanas naturales volcánicas como adiciones activas en la producción de cementos hasta 1990, año en el que se inicia una nueva etapa en la industria del cemento en opinión del autor.

En la primera parte mostró una presentación de los conceptos fundamentales; la historia del uso y su disposición alrededor del mundo. En la segunda parte presentó los sistemas de clasificación y muestra los aspectos relacionados con su proceso de reactividad. En la tercera parte presentó los procedimientos para la caracterización de este tipo de materiales, así como las propiedades que deben reunir, atendiendo a la normativa internacional.

Finalmente indicó los factores que influyen el uso de las puzolanas en los países en vías de desarrollo y las recomendaciones para investigaciones futuras que se consideraron importantes en ese tiempo.

En el año 2013 es publicada la investigación sobre la *Determinación y evaluación experimental del índice de reactividad puzolánica de diez bancos de materiales de la franja volcánica de Guatemala para la industria del cemento*, desarrollada por el Ingeniero Civil Francisco Javier Quiñónez de la Cruz, donde determinó de manera experimental, el índice de reactividad de diez muestras de bancos de materiales de la franja volcánica de Guatemala en combinación con hidróxido de calcio, para su consideración como adiciones minerales.

Para tal propósito, seleccionó las muestras en función de una exhaustiva búsqueda de información geológica. Posteriormente las muestras fueron procesadas en los laboratorios y realizó su caracterización física, mineralógica y química. Finalmente, determinó el índice de reacción de las muestras por procedimientos químicos y mecánicos. Los procesos de laboratorio se basaron en las recomendaciones vigentes de la Sociedad Americana para Ensayo de Materiales.

La investigación a nivel macro que se desarrolló en la Universidad de San Carlos de Guatemala; fue complementada con los análisis microscópicos que se desarrollaron en la Universidad Politécnica de Valencia, lo cual fue relevante en este estudio. Los resultados obtenidos de los análisis de laboratorio, tanto a nivel macro como a escala microscópica, evidenciaron que las muestras de origen volcánico seleccionadas tienen las características recomendadas por la normativa internacional para ser consideradas como posibles adiciones minerales o para producción de otros aglomerantes.

Por otra parte, los resultados de la evaluación de la reactividad por procedimientos mecánicos y químicos en matrices formadas por esos materiales e hidróxido de calcio, indicaron que todas las muestras tienen un índice de reactividad intermedio-alto, de acuerdo con las clasificaciones internacionales para estos materiales. Los resultados indicaron que las muestras son fuertes candidatas para su utilización en la producción de aglomerantes.

En el año 2015 es publicado el trabajo de graduación *Bloques de tierra compactada estabilizados con aglomerante natural CP*, desarrollado por el Ingeniero Civil Marvin Grover Alvarado Figueroa, donde evaluó la incidencia del aglomerante natural cal-puzolana en las características físicas y propiedades mecánicas de los bloques elaborados con tierra compactada, atendiendo los requerimientos de la normativa internacional.

Elaboró bloques de tierra compactada sin estabilizar, estabilizados con aglomerante natural cal-puzolana y otros estabilizados con cemento, Portland tipo I (PM), para uso general en la construcción. Con base en resultados de laboratorio, verificó la incidencia, del aglomerante natural cal-puzolana, en el mejoramiento de las características físicas y propiedades mecánicas de los bloques, respecto a los no estabilizados. Asimismo, los bloques estabilizados con cemento tipo UGC, los elaboró para tener un punto de comparación con los estabilizados con aglomerante natural cal puzolana; obtuvo resultados muy variables.

La Ingeniera Civil Génesis Argentina Cap Morales, desarrolló en el año 2016 el trabajo de graduación denominado *Evaluación experimental de los parámetros de diseño de mampostería elaborada con bloques de tierra compactada* (BTC), que consistió en la fabricación y evaluación de bloques de tierra compactada para uso en construcción de viviendas económicas.

En esa investigación, buscó producir bloques de tierra compactada con los materiales guatemaltecos y determinar el comportamiento de los mismos al utilizarlos como unidades de mampostería en el levantado de muros. Además, determinó los parámetros de diseño en el laboratorio, al aplicar cargas de compresión y de corte a prismas elaborados con los bloques.

Con base en los resultados obtenidos determinó que los bloques elaborados con puzolana, limo y aglomerante ternario, no son aptos para su utilización como elementos de mampostería, debido a su bajo rendimiento en los ensayos. También determinó que los bloques no son adecuados para resistir fuerzas de corte.

JUSTIFICACIÓN

Es necesario hacer una síntesis y análisis de los resultados sobre las investigaciones realizadas sobre la puzolana en Guatemala debido a la demanda de cemento y la conciencia ambiental que existe acerca de su producción, el consumo energético y emisiones nocivas que provoca.

Es importante estudiar nuevos aglomerantes que cumplan con características similares que el cemento Portland y ante la presencia de las puzolanas, tanto naturales como artificiales. Se han llevado a cabo estudios de factibilidad que demuestran su capacidad no solo de cumplir con desempeños similares que el cemento, sino que también reducir la contaminación y disminuir los costos que estén relacionados a su producción.

Los trabajos de investigación sobre bloques de tierra compactada elaborados entre los años 2014 y 2015, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala indican que no se ha conseguido una proporción y materiales adecuados para la obtención de resultados aceptables según las normas internacionales.

Al analizar las investigaciones y conocer la maquinaria disponible en la industria, es posible el planteamiento de una nueva investigación para la fabricación de los bloques de tierra compactados cuyos resultados finales sean aptos para la construcción y para la industria.

Uno de los problemas es que no se ha logrado transmitir el conocimiento adquirido a la industria. Por lo cual es necesario la investigación de un modelo

de transferencia de tecnología que garantice la apropiación del conocimiento desarrollado.

INTRODUCCIÓN

En el territorio Guatemalteco, existe un elevado volumen de material puzolánico que se puede utilizar para la construcción. En la Universidad de San Carlos de Guatemala se han realizado diversas investigaciones sobre la puzolana y sobre bloques de tierra compactada BTC estabilizados con aglomerante puzolánico, debido a que este tipo de bloques son una alternativa de los elementos constructivos que se utilizan en la actualidad.

Hay diversas investigaciones sobre bloques de tierra comprimida realizadas en la Universidad de San Carlos de Guatemala, cuyos conocimientos no se han transmitido a la industria. En este trabajo de investigación, se presentan un modelo de transferencia de tecnología, el cual indica una ruta posible a seguir para transmitir ese conocimiento a la industria.

El proceso de transmisión de conocimientos inicia con la creación de un vínculo entre la universidad y las empresas, debido a que las industrias tienen capital para obtener materiales, maquinaria especial para la fabricación de los bloques de tierra comprimida o la capacidad de comprarla; y las universidades aportan el conocimiento necesario para guiar la investigación al descubrimiento de resultados aptos para las necesidades del sector constructivo y satisfacción del mercado.

Al definir la metodología, en este trabajo se incluyen lineamientos para realizar la transferencia del conocimiento, de tal forma que la industria se apropie de la tecnología, produzca y comercialice los bloques.

1. SÍNTESIS DE RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES SOBRE PUZOLANA, REALIZADAS EN LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

1.1. Resultados de la investigación geológica y caracterización física de puzolanas de la zona oriental de Guatemala

La investigación consistió en realizar una búsqueda de documentos sobre la puzolana que dieran una descripción geológica de la región oriente de Guatemala. Tomó como base los estudios realizados por diversos autores y mapas geológicos del área en estudio, obtuvo muestras de materiales volcánicos que posteriormente evaluó para determinar las características físicas dictadas por las normas internacionales y otras que determinó por considerarlas importantes.

Los materiales piroclásticos investigados, los obtuvo en la región delimitada por los departamentos de Guatemala, El Progreso, Baja Verapaz y Alta Verapaz. El muestreo en esa región la realizó en aquellos yacimientos que consideró con mejor acceso, uniformidad y volumen, entre otras. En total tomó muestras de 9 yacimientos de distintas capas estratigráficas, a lo largo de la región en estudio.

Las muestras, una vez que las ubicó en el laboratorio, las secaron, tamizaron y molieron, determinaron su superficie específica (finura Blaine), pérdida por ignición, fracción soluble en agua, peso específico y porcentaje que

pasa el tamiz 325. Los diferentes resultados que obtuvieron fueron comparados con los parámetros recomendados por las normas internacionales. Indicó que lo resultados son un parámetro muy importante para explicar los efectos de ensayos mecánicos cuando estos materiales se combinan con cemento portland o cal.

1.1.1. Resultados de investigación geológica

Los mapas procesados dieron a conocer las áreas que abarca cada región, las delimitó de acuerdo con la cantidad de material puzolánico que se encuentra por departamento. Con estos datos realizó un cálculo aproximado de los volúmenes del material que se encuentran cercanos a cada muestra; la medida del estrato la tomó de manera muy aproximada ya que es muy variable de región en región.

El recorrido según el investigador inició por la carretera CA-9 hasta El Rancho, luego recorrió hacia Cobán por la carretera CA-14. Identificó los bancos y lugares que se consideraron importantes para el estudio.

Determinó que las muestras son tobas producidas por cenizas volcánicas. Indicó la necesidad de ensayos más específicos para realizar una clasificación mineralógica, sin embargo, por una descripción macroscópica y por aportes de los distintos autores de los documentos consultados, identificó las características básicas pero no menos importantes de cada muestra.

Determinó que las muestras son de origen volcánico extrusivo de la era Cuaternaria, y desarrolló la comparación de las coordenadas donde se extrajo el material, con el mapa geológico. En el recorrido hizo una breve descripción de los bancos, pero para propósitos del estudio realizó una descripción de cada

muestra. Los resultados del recorrido previo se expresan en la tabla I, donde el investigador calificó de 1 a 10 cada aspecto del yacimiento en estudio.

Tabla I. Resultado evaluación previa de los bancos

No.	Identificación Muestra	Ubicación	Acceso	Uniformidad	Estratigrafía	Volumen	Calidad
1	1P	Km 22 ruta CA-9 a	10	8	10	10	8
2	1R	Km 84 CA-9	10	8	10	7	8
3	1M	Carretera Cobán a Morazán	8	8	10	10	8
4	1ARIS	Carretera Cobán a Morazán	8	8	10	10	8
5	1S	Salamá	6	8	10	5	8
6	1SC (Rosado)	Carretera Santa Cruz Verapaz hacia San Cristóbal Verapaz	7	6	6	5	8
7	2SC (Blanco)	Carretera Santa Cruz Verapaz hacia San Cristóbal Verapaz	7	6	6	5	8
8	1NPS	Km 147 de Rancho a Cobán	10	8	8	5	8
9	1GC	Camposanto Guastatoya	9	10	10	10	10

Fuente: ROSALES RIVAS, Víctor. Geología y caracterización física de puzolanas de la zona oriental de Guatemala. p. 84.

Las coordenadas obtenidas en la investigación, de los lugares exactos de donde se extrajeron las muestras coincidieron con la delimitación del material puzolánico realizado de los mapas geológicos. La única muestra que no le coincidió es la 1NPS; debido a que el yacimiento es de un volumen por debajo del rango, para que el mapa geológico lo contenga.

1.1.2. Resultados de ensayos de laboratorio

Las características físicas de cada material proporcionan información importante para una identificación previa de las muestras que, finamente divididas, darán mejor reactividad puzolánica. Estos parámetros no son condicionantes de que las muestras en mejor estado físico tengan una mejor reactividad, sino que se requiere de estudios químicos, mineralógicos e incluso mecánicos, para tener una mejor decisión respecto de las mejores muestras.

El material llega a una fineza adecuada después de 2 horas de molienda, sin embargo, depende del volumen de material introducido en el molino y de la carga de choque y desgaste en el proceso. Esta característica es muy importante y en las muestras procesadas el investigador evidenció que no se necesita mucha energía para llegar a una fineza adecuada.

La muestra identificada como 1S mostró los mejores valores de fineza, obteniendo un valor del 94 % que pasa el tamiz # 325. La muestra 1S presentó una fineza alta con 1 hora de molienda, en el desarrollo de la investigación esperaban una reactividad puzolánica alta. También en su estado natural presentó una fineza adecuada.

En el ensayo de Pérdida por ignición obtuvo resultados favorables para su uso; el rango de resultados oscila entre 1,5 y 3,15 de un valor máximo de

diez por ciento según la norma ASTM C 311 – 11a “*Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland – Cement Concrete*”. El investigador destacó que la muestra 1S tiene un 2,65 % que es un valor muy cercano al promedio de todas las muestras, que es de 2,74 %. En el ensayo la mejor muestra es la que identificó como 1M, lo cual podría ser indicativo de que posee poca cantidad de materia orgánica.

La muestra 1R presentó un valor alto de fineza con poco tiempo de molienda y un valor aceptable en la pérdida de peso por ignición, por lo que al realizar los ensayos correspondientes, se espera que tenga una reactividad puzolánica alta y que mejore propiedades ingenieriles al ser mezclada con cemento portland, aunque ello depende también de su mineralogía.

El porcentaje del material soluble en agua fue más alto que el máximo propuesto por la norma C 114 – 11a “*Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement*”, que no debe ser mayor al 10 %. Este parámetro tiene importancia en las características del material pero no tiene influencia directamente en las propiedades mecánicas de este; sin embargo, al tener otros parámetros desfavorables a la reactividad puzolánica este valor podría tomar mayor importancia.

La muestra 1S tuvo características favorables tanto en fineza como en pérdida por ignición, con un valor cercano al 10 % de fracción soluble en agua. Los valores de superficie específica se encuentran entre los 2 900 y 9 500 cm²/g, teniendo un promedio de 5 408 cm² /g, aunque el valor de 9 500 cm²/g está sujeto aún a revisión.

1.2. Resultados de la caracterización geológica y física de 8 muestras de puzolanas de origen volcánico de la región de occidente de Guatemala

El trabajo de investigación realizado por el Ingeniero Luis Alfredo Ochoa Marroquín presenta una descripción general de la geología de la franja volcánica occidental de Guatemala, y los resultados de la caracterización física de 8 muestras extraídas de bancos ubicados dentro del área delimitada en el Mapa Geológico de Guatemala, como rellenos y cubiertas gruesas de cenizas, pómez de origen diverso (rocas ígneas y metamórficas del Período Cuaternario). Presenta una descripción de las puzolanas y de la ubicación del material en la zona occidental del país.

Describe la forma como localizó los bancos potenciales donde encontró el material, los viajes que realizó para la recolección e identificación de las muestras y la descripción detallada sobre cómo ejecuto los ensayos, así como el cálculo de los resultados. Enlista los resultados de los ensayos, acompañados de fotografías que ilustran parte del procedimiento que siguió para su realización.

1.2.1. Resultados de los ensayos en las muestras de puzolanas según normas de las sociedad americana para pruebas de materiales –ASTM–

Para la ubicación de los lugares utilizó mapas obtenidos en el Instituto Geográfico Nacional (IGN) los cuales escanearon para un mejor manejo a través de un software. En la tabla II se muestra el área aproximada de cada banco así como el volumen, también aproximado, según lo observado en campo.

Para la norma ASTM C 618-08a “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, 2008” el porcentaje máximo que debe ser retenido en el tamiz No. 325 es 34 % para una muestra tipo N (puzolana natural). La mayoría de las muestras presentaron una fineza bastante aceptable después de 1 hora de molienda, pero el investigador trabajó con las muestras extraídas después de 2 horas de molienda.

Las muestras que presentaron un porcentaje más bajo las identificó como 2TF y 1C, dando como resultado 23,69 % y 25,14 % retenido respectivamente. El resto de las muestras dieron resultados promedio de 6,2 % retenido. En la muestra 2T’G presentó una fineza alta con 1 hora de molienda se espera una reactividad puzolánica alta, después de pasar la muestra por el tamiz No. 325, esta dio como resultado que pasa un 87,49 %. Cumpliendo, con 1 hora de molienda, la norma antes mencionada.

Con dos horas de molienda, los resultados mejoran aún más, la muestra que arroja el mejor resultado es la identificada como SX2F dando un valor del porcentaje que pasa el tamiz No. 325 igual a 98,68. A la tercera hora de molienda, todas las muestras arrojan resultados arriba del 98 % que pasa el tamiz No. 325.

Para el ensayo de pérdida por ignición la norma ASTM C 114–11b “*Standard test methods for chemical analysis of hydraulic cement*” indica un valor máximo del 10 % y las muestras ensayadas arrojaron resultados que se encuentran en un rango que va de 1,86 a 3,15, siendo la muestra identificada como 1N la del valor menor y la muestra identificada como LC la de mayor valor. La muestra 1N al registrar este valor tan pequeño indica que contiene muy poca cantidad de materia orgánica, es decir que es la muestra menos

contaminada por agentes externos y ajenos al material en estudio. El promedio de los valores de las muestras es de 2,38, siendo la muestra del banco identificado como SX1G la más cercana a este valor con 2,32 %.

Tabla II. **Ubicación y dimensionamiento de los bancos**

ÁREAS POR DEPARTAMENTO					
Departamento	Id	Area (Km²)	Estrato aproximado (Km)	Volumen aproximado (Km³)	Muestra extraída
Quetzaltenango	QZ1	53,4	0,05	2,67	
	QZ2	40,0	0,05	2,00	
	QZ3	92,1	0,05	4,61	SX1-SX2
Totonicapán	T1	461,5	0,05	23,07	
	12	51,8	0,05	2,59	\$FA
Solola	S1	221,6	0,05	11,08	Argueta, 1N, FyGR.
	S2	30,5	0,05	1,53	
	S3	13,3	0,05	0,67	
	S4	5,1	0,05	0,25	
Chimaltenango	CH1	798,3	0,05	39,92	1 Parra, LC.1C.2T- 2T.
Guatemala	G1	1385,2	0,05	69,26	SU, Bar F,1P, Alka Seltzer, KM 55 Sanarate.

Fuente: OCHOA MARROQUÍN, Luis. Caracterización geológica y física de 8 muestras de puzolanas de origen volcánico de la región de occidente de Guatemala. p. 54.

La muestra SX2F muestra un valor alto de fineza con poco tiempo de molienda y tiene un valor aceptable en la pérdida por ignición igual a 2,09 %. Se espera que tenga una reactividad puzolánica alta y que mejore sus propiedades al ser mezclada con cemento portland, aunque ello depende también de su mineralogía.

La norma C114-11b "*Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement*" indica que la fracción soluble en agua no debe ser mayor al 10 %, pero todas las muestras presentaron resultados arriba de este valor, siendo el valor más bajo igual a 11,78 perteneciente a la muestra del banco identificado como 2T'G.

Después de haber realizado el ensayo de fineza según lo indica la norma ASTM C 204-11 "*Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus*" observaron que los rangos de fineza de las muestras, con 2 horas de molienda, están en un rango que va desde 3 036 cm²/g hasta 7 441 cm²/g. Siendo la muestra identificada como SX1G la que presenta el mayor valor, el cual corresponde a 6 368 cm²/g.

En el ensayo de pérdida por ignición da un porcentaje de 2,63 y en el ensayo de fracción soluble en agua, presenta el valor más bajo igual a 11,78 %; siendo estos valores aceptables porque están dentro de los requerimientos mínimos de las normas que rigen cada uno de los ensayos realizados a las muestras.

1.3. Resultados del índice de reactividad mecánica de dieciocho muestras de materiales volcánicos de Guatemala

El Ingeniero Civil Pablo José Bautista Gallardo evaluó mecánicamente muestras de materiales seleccionados en el oriente y occidente de Guatemala, atendiendo a las recomendaciones que están establecidas en las Normas ASTM C 593-06 (2011) *Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime* y ASTM C 618-08 *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. El objetivo fundamental fue evaluar el grado de reactividad de las muestras.

Seleccionaron dieciocho muestras, nueve del oriente y nueve muestras del occidente de Guatemala para las cuales se evaluó la reactividad mecánica. Las muestras antes mencionadas procedían de una caracterización física, para la cual posteriormente correspondió evaluar la resistencia a la compresión; elaborando muestras para siete y veintiocho días de edad, resguardando las condiciones necesarias para que el proceso de reacción fuera el más adecuado posible.

Las muestras, 18 en total, extraídas del occidente y oriente del país, consiste particularmente en tobas, cenizas volcánicas y pómez. Por motivos de ensayo las identificó en dos grupos:

- Índice de actividad reactiva (IAR): nomenclatura correspondiente a las mezclas cemento-puzolana que se realizaron.
- Índice de reactividad con cal (IRC): nomenclatura correspondiente a las mezclas cal-puzolana.

1.3.1. Flujo de mezclas IAR e IRC

Durante el proceso de elaboración de mezcla determinó el flujo de los materiales combinados con cal (IRC) y con cemento (IAR), por medio del ensayo de la mesa de flujo, obtuvieron los resultados mostrados en la tabla III y IV.

Tabla III. **Valor del flujo respecto a la cantidad de agua requerida (IAR)**

Flujo IAR			
No	Muestra	Flujo	Agua (ml)
0	Control	113,0	267,00
1	1GC	105,0	267,00
2	2T	100,0	267,00
3	2SC	99,0	267,00
4	1P	108,5	267,00
5	LC	104,0	267,00
6	ARIS	114,0	267,00
7	SFA	108,0	267,00
8	1S	103,5	267,00
9	SX1	103,0	267,00
10	1M	102,5	267,00
11	SX2	107,5	267,00
12	1N	99,5	267,00
13	1NPS	105,5	267,00
14	1SC	106,0	267,00
15	BAR FINO 2	104,0	267,00
16	1R	105,0	267,00
17	2T'	104,5	267,00
18	1C	97,0	267,00

Fuente: BAUTISTA GALLARDO, Pablo. Determinación del índice de reactividad mecánica de 18 muestras de materiales volcánicos de Guatemala. p. 73.

De acuerdo con los parámetros de las normas adoptadas, demostró a través de los resultados obtenidos el alto grado de reactividad que los materiales desarrollaron durante el proceso de reacción. Elaboró gráficas que engloban todos los resultados, evidenciando la influencia de estos materiales sobre el cemento y la cal.

Tabla IV. **Cantidad de agua requerida para cada muestra con respecto a su valor de flujo (IRC)**

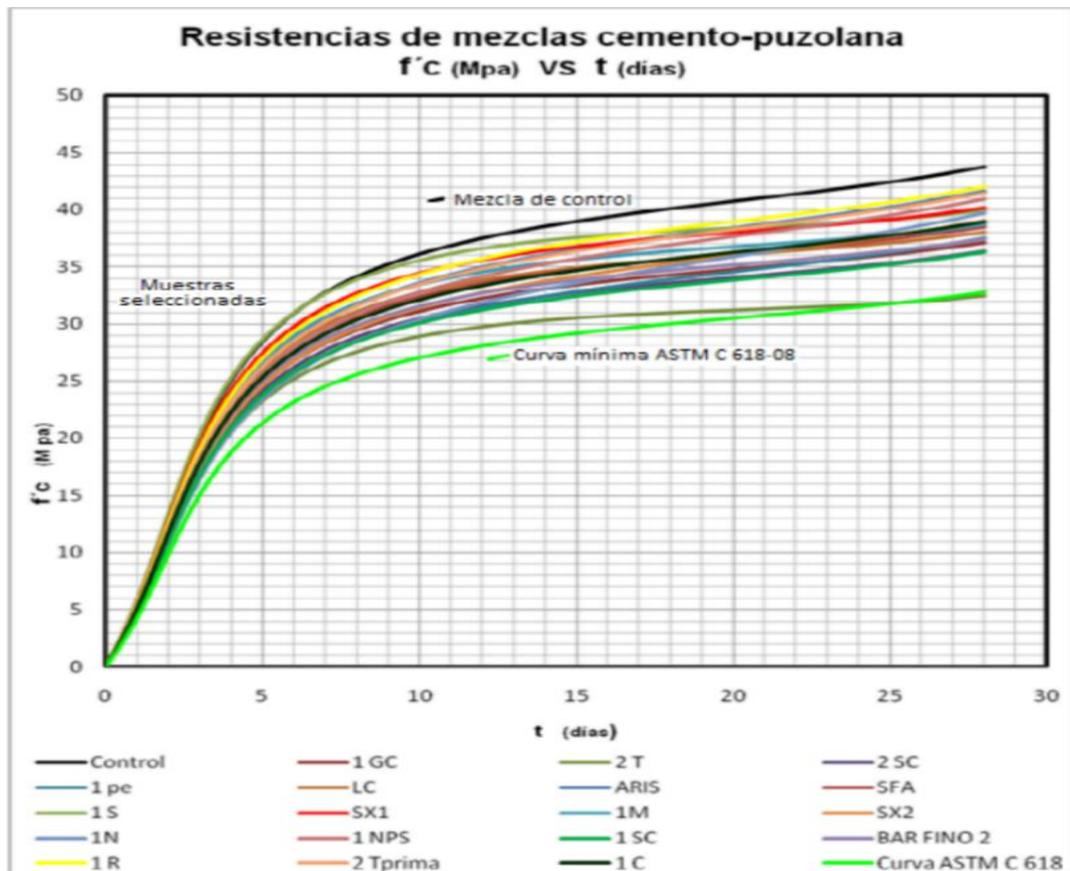
Flujo IRC			
No	Muestra	Flujo	Agua (ml)
I	1GC	74,0	365,00
II	2T	74,5	365,00
III	2SC	65,0	360,00
IV	1P	71,0	360,00
V	LC	66,5	360,00
VI	ARIS	70,0	360,00
VII	SFA	65,0	370,00
VIII	1S	70,5	360,00
IX	SX1	65,0	360,00
X	1M	68,0	365,00
XI	SX2	71,0	360,00
XII	1N	65,5	360,00
XIII	1NPS	66,5	365,00
XIV	1SC	65,0	360,00
XV	BAR FINO 2	74,5	360,00
XVI	1R	73,0	360,00
XVII	2T'	65,0	365,00
XVIII	1C	69,0	360,00

Fuente: BAUTISTA GALLARDO, Pablo. Determinación del índice de reactividad mecánica de 18 muestras de materiales volcánicos de Guatemala. p. 74.

1.3.2. Especímenes para su evaluación como IAR

Para evaluar el IAR de los materiales volcánicos, la resistencia a compresión de cada mezcla con cemento la determinó por medio de la evaluación de 3 cubos por muestra en dos edades diferentes a 7 y 28 días, obteniendo la siguiente información. Cabe destacar que a la mezcla de control le asignaron el número 0.

Figura 1. Desarrollo de la resistencia de 18 muestras con cemento



Fuente: BAUTISTA GALLARDO, Pablo. Determinación del índice de reactividad mecánica de 18 muestras de materiales volcánicos de Guatemala. p. 79.

Para cada muestra en la investigación el Ingeniero Pablo Bautista determinó el coeficiente de variación y la desviación estándar, así como el porcentaje de f'c. Dicho valor indica el porcentaje al cual llegó en su resistencia la muestra determinada, respecto a la de control, ya que dentro de los parámetros, debe ser del 75 % mínimo de la resistencia de la mezcla de control para 7 y 28 días en su evaluación como IAR según las normas ASTM

La Figura 1 engloba los resultados de todas las muestras incluyendo la de control, de sus resistencias a 7 y 28 días, observando un comportamiento similar en todas las muestras, el investigador también incluyó la curva según los parámetros indicados de la Norma ASTM C 618 - 08 "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete", requerimientos físicos

1.3.3. Especímenes para su evaluación como IRC

Para determinar el IRC de las mezclas con cemento, ensayó 3 cubos por muestra a cada edad, calculó un promedio de las resistencias de los tres cubos siendo el valor mínimo de 4,1 megapascales, según la Norma ASTM C 593. Toda la memoria de cálculo para estas mezclas puede consultarse de forma más detallada en el apéndice de la investigación del Ingeniero Bautista.

Para la mezclas con cal, determinó el coeficiente de variación y la desviación estándar, dichos valores son los que dan fiabilidad a los ensayos, ya que da una idea de la dispersión de los datos. El porcentaje de aumento es un valor con respecto al parámetro mínimo de 4,1 megapascales para 7 y 28 días, dicho porcentaje proporciona la cantidad arriba de este valor que supera cada muestra.

Igual que en la gráfica de IAR, para IRC también desarrolló gráficas individuales para analizar de forma más detallada el comportamiento de las muestras con cal y con el parámetro respectivo para este tipo de mezcla.

En la tabla V, pueden observarse los incrementos desarrollados por los dos tipos de mezclas (IAR e IRC) efectuados, tanto en megapascales como en porcentaje, para proporcionar una idea clara del comportamiento general obtenido de todas las mezclas.

Tabla V. **Tabla comparativa, resultados de resistencia para IAR e IRC**

Tabla comparativa IAR e IRC					
Tipo de mezcla	Edad	Resistencia a compresión		Análisis Estadísticos	
	Días	Promedio (Mpa)	Promedio en %	σ	Cv
IAR	7	29,22	89,25	1,68	6%
IAR	28	38,67	88,47	2,35	6%
IRC	7	6,23	33,67	0,57	9%
IRC	28	6,15	32,39	0,78	13%
* En IAR la mezcla de control no es tomada en cuenta					

Fuente: BAUTISTA GALLARDO, Pablo. Determinación del índice de reactividad mecánica de 18 muestras de materiales volcánicos de Guatemala. p. 84.

Los 18 materiales los evaluó en su comportamiento mecánico en dos tipos de mezclas con cemento (IAR) y luego con cal (IRC) a edades de 7 y 28 días, los resultados mostraron un comportamiento progresivo en el aumento de la resistencia al utilizar los materiales volcánicos, el objetivo del investigador fue demostrar mediante estos resultados, que los valores de resistencia pudieran cumplir por lo menos con los parámetros mínimos requeridos.

1.4. Índice de reactividad puzolánica de diez bancos de materiales de la franja volcánica de Guatemala para la industria de cemento

En La investigación se determinó de manera experimental, el índice de reactividad de diez muestras de bancos de materiales de la franja volcánica de Guatemala en combinación con hidróxido de calcio, para su consideración como adiciones minerales. Para tal propósito, seleccionaron las muestras en función de una exhaustiva búsqueda de información geológica. Posteriormente las muestras fueron procesadas en los laboratorios y realizaron su caracterización física, mineralógica y química.

Finalmente, el investigador determinó el índice de reacción de las muestras por procedimientos químicos y mecánicos. Los procesos de laboratorio se basaron en las recomendaciones vigentes de la Sociedad Americana para Ensayo de Materiales. La investigación a nivel macro que se desarrolló en la Universidad de San Carlos de Guatemala fue complementada con los análisis microscópicos que se desarrollaron en la Universidad Politécnica de Valencia, lo cual fue relevante en este estudio.

Los resultados obtenidos de los análisis de laboratorio, tanto a nivel macro como a escala microscópica, evidenciaron que las muestras de origen volcánico seleccionadas tienen las características recomendadas por la normativa internacional para ser consideradas como posibles adiciones minerales o para producción de otros aglomerantes, sin embargo, necesitan ser procesadas.

Por otra parte, los resultados de la evaluación de la reactividad por procedimientos mecánicos y químicos en matrices formadas por esos materiales e hidróxido de calcio, indican que todas las muestras seleccionadas tienen un índice de reactividad intermedio-alto, de acuerdo con las

clasificaciones internacionales para estos materiales. Los resultados indican que las muestras seleccionadas son fuertes candidatas para su utilización en la producción de aglomerantes.

1.4.1. Resultados de la ubicación y cuantificación de la materia prima

La investigación geológica evidenció, que en Guatemala existe un superficie mínima de material volcánico susceptible de explotarse de aproximadamente 5,400 kilómetros cuadrados. De acuerdo con la división estructural y fisiográfica de Guatemala, la mayor parte del recurso se localizó en la Zona Volcánica, precisamente donde se ubica la mayor parte de la población.

1.4.2. Resultados de la identificación de los materiales volcánicos

La información de los lugares seleccionados para la obtención de las muestras utilizadas en la investigación publicada en el año 2013, sobre la determinación y evaluación experimental del índice de reactividad puzolánica de diez bancos de materiales de la franja volcánica de Guatemala para la industria del cemento se presenta en la Tabla VI, indicando el número de muestra y su identificación, así como el lugar de extracción y la elevación del terreno. Las características del lugar y las coordenadas se encuentran en el informe FODECYT 023-2010.

Tabla VI. **Identificación de materiales volcánicos**

Muestra	lugar	Identificación	Elevación
1	Km. 100 carretera departamental 7, CA14 – Morazán.	1ARIS	356 msnm
2	Km. 95.4 carretera departamental 7, CA14 – Morazán.	1M	368 msnm
3	Km. 160 carretera CA-1	1N	2495 msnm
4	Km. 22 Carretera Departamental 6, CA-9- Palencia	1P	989 msnm
5	Km. 84 Carretera CA-9	1R	350 msnm
6	Km. 86.3 Carretera CA-1	2T	2347 msnm
7	Km. 76.8 Carretera CA-1, en el trayecto que de Patzicía conduce a Patzún.	LC	2099 msnm
8	Km. 187.3 Carretera CA-1, muy cerca de la entrada a San Francisco El Alto.	SFA	2442 msnm
9	Aproximadamente a 5 kilómetros que de la Carretera CA-1 conduce a Salcajá.	SX1	2350 msnm
10	Aproximadamente a 5 kilómetros que de la Carretera CA-1 conduce a Salcajá.	SX2	2350 msnm

Fuente: Informe FODECYT 023-2010.

1.4.3. Resultados de la caracterización física de los materiales volcánicos seleccionados

Los porcentajes de humedad de las muestras estuvieron entre 9 % y 32 %. Aunque en los datos influyó la época de toma de las muestras, el investigador comprobó que todos los materiales son muy buenos retenedores de humedad; esta característica no es determinante en cuanto a la reactividad de los materiales, pero si influye en su proceso.

Las muestras 1 ARIS, 1M, 1R y SX2 evidenciaron la mayor finura en estado natural ya que más del 90 % pasó el tamiz de $\frac{1}{4}$ ". Las muestras 1P, 2T, LC y SFA presentaron finuras menores que las anteriores en estado natural, con valores entre 80 y 90 % que pasa el tamiz de $\frac{1}{4}$ ". La muestra SX1 tuvo una finura natural de 73 % que pasa el tamiz de $\frac{1}{4}$ " y finalmente la muestra 1N presentó el menor porcentaje con 54 %.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el investigador indicó que todas las muestras tienen porcentajes mayores del 30 % que pasa en tamiz No. 30 y mayores del 2 % que pasa el tamiz No. 200; También destacó que la muestra más crítica siempre fue la 1N, esto fue evidente desde la observación en campo. Los valores obtenidos satisficieron en todos los casos, los mínimos establecidos por los requerimientos de la norma ASTM C593-06(2011).

1.4.4. Resultados de la caracterización física y química del hidróxido de calcio

Todos los materiales utilizados tuvieron los requerimientos mínimos establecidos por la normativa internacional respectiva, de acuerdo con las

determinaciones de laboratorio. Sobresale el dato de contenido de CaO en el Hidróxido de Calcio empleado, con un valor aproximado de 74 %.

1.4.5. Resultados de la determinación del índice de actividad puzolánica de las muestras, en función de su respuesta mecánica

Todas las muestras estuvieron por encima del valor mínimo especificado para siete días por la norma adoptada (4,1 MPa). El rango de valores de resistencia a compresión se situó entre 5,5 y 7,25 MPa, estos valores se sitúan en el rango más alto de reacción. Las muestras que mejores resultados presentaron para esta edad fueron SFA, 1R y 2T.

Los valores de Coeficiente de Variación se situaron en el rango de 1 a 7 %, considerándose los resultados como muy confiables, ya que el 80 % de las muestras tuvieron un coeficiente de variación menor de 5 %.

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla XX del numeral III.1.7, del informe FODECYT 023-2010, los valores de resistencia mecánica para la edad de veintiocho días en todas las muestras, se situaron entre 5,4 y 6,8 MPa, con un coeficiente de variación osciló entre 1 y 4 %. El valor mínimo para considerar reactiva la muestra según la norma internacional adoptada es de 4,1 MPa. Las muestras con mejores resultados fueron las procedentes de los bancos SFA, 1R, 2T y SX1.

Comentario

En la Universidad de San Carlos de Guatemala se han realizado diversas investigaciones sobre el material puzolánico. Se ha estudiado los yacimientos

de material piroclásticos del oriente y occidente de Guatemala, en los que encontraron material puzolánico en toda la franja volcánica de Guatemala. En la región central existe en abundancia de este material. Según los investigadores a medida que se recorre hacia el norte, este material es más escaso.

Tanto para las muestras de oriente como occidente efectuaron la caracterización física correspondiente para conocer en una forma más amplia todos los materiales encontrados. Luego realizaron la evaluación mecánica de todas las muestras, atendiendo a las recomendaciones que están establecidas en las Normas Internacionales. De acuerdo con los parámetros de las normas adoptadas, demostraron el alto grado de reactividad que los materiales desarrollaron durante el proceso de reacción.

En otra investigación determinaron, de manera experimental, el índice de reactividad de diez muestras de materiales en combinación con hidróxido de calcio. Posteriormente las muestras fueron procesadas en los laboratorios y realizaron su caracterización física, mineralógica y química. Los resultados obtenidos de los análisis de laboratorio, evidenciaron que las muestras de origen volcánico seleccionadas tienen las características recomendadas por la normativa internacional para ser consideradas como posibles adiciones minerales o para producción de otros aglomerantes.

Con los resultados de las investigaciones se muestra que el país posee grandes cantidades de material puzolánico que no se aprovecha. Las investigaciones realizadas garantizan que el material puzolánico puede ser utilizado para la fabricación de materiales para el sector constructivo.

2. SINTESIS DE RESULTADOS DE INVESTIGACIONES SOBRE BLOQUES DE TIERRA COMPACTADA, REALIZADOS EN LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS

2.1. Bloques de tierra compactada estabilizados con aglomerante natural CP

El trabajo de investigación desarrollado por el Ingeniero Civil Marvin Grover Alvarado Figueroa, consistió en la evaluación de la incidencia del aglomerante natural cal-puzolana en las características físicas y propiedades mecánicas de los bloques elaborados con tierra compactada, atendiendo los requerimientos de la normativa española UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo”; donde se indica los tipos de ensayos y el equipo necesario para la realización de los mismos.

La investigación se dividió en dos fases. Cada una de ellas conformada por una parte teórica y otra experimental. Las partes experimentales se realizaron en diversas secciones y laboratorios del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

El investigador elaboró bloques de tierra compactada sin estabilizar, estabilizados con aglomerante natural cal-puzolana y otros estabilizados con cemento tipo UGC. De acuerdo con los ensayos realizados, con base en resultados de laboratorio, verificó la incidencia, del aglomerante natural cal

puzolana, en el mejoramiento de las características físicas y propiedades mecánicas de los bloques, respecto a los no estabilizados. Asimismo, los bloques estabilizados con cemento tipo UGC, los elaboró para tener un punto de comparación con los estabilizados con aglomerante natural cal-puzolana; obteniendo resultados muy variables.

Tabla VII. **Esfuerzos de primera grieta de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana ensayados a compresión**

ESFUERZOS DE PRIMERA GRIETA DE LOS BTC ESTABILIZADOS CON AGLOMERANTE NATURAL CAL PUZOLANA				
Nomenclatura	Núm.	Carga de Primera Grieta (N)	Esfuerzo de Primera Grieta (MPa)	
			Bruto	Neto
CP5	1	6 864,62	0,15	0,20
	2	22 555,18	0,51	0,67
	3	10 787,26	0,24	0,32
CP10	1	28 635,27	0,65	0,85
	2	35 303,76	0,79	1,03
	3	36 284,42	0,81	1,05
CP15	1	37 265,08	0,84	1,10
	2	24 516,50	0,55	0,72
	3	26 477,82	0,60	0,78

Fuente: ALVARADO FIGUEROA, Marvin. Bloques de tierra compactada estabilizados con aglomerante natural CP. p. 127.

En la tabla VII y la tabla VIII, se muestran los resultados del esfuerzo de primera grieta y del esfuerzo de ruptura de los bloques estabilizados con aglomerante natural cal-puzolana. La tabla IX y X, muestran los resultados del esfuerzo de primera grieta y el esfuerzo de ruptura de los bloques estabilizados con cemento tipo UGC. Con los resultados de la investigación, se evidenció que la estabilización mediante el aglomerante natural cal puzolana mejora la resistencia de los bloques de tierra.

Tabla VIII. **Esfuerzos de ruptura de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana ensayados a compresión**

ESFUERZOS DE RUPTURA DE LOS BTC ESTABILIZADOS CON AGLOMERANTE NATURAL CAL PUZOLANA				
Nomenclatura	Núm.	Carga de ruptura (N)	Esfuerzo de ruptura (MPa)	
			Bruto	Neto
CP5	1	26 968,15	0,61	0,79
	2	28 243,00	0,64	0,84
	3	17 651,88	0,40	0,52
CP10	1	41 187,72	0,93	1,22
	2	38 834,13	0,87	1,14
	3	48 444,60	1,08	1,40
CP15	1	40 403,19	0,91	1,19
	2	31 871,45	0,72	0,93
	3	30 008,19	0,68	0,88

Fuente: ALVARADO FIGUEROA, Marvin. Bloques de tierra compactada estabilizados con aglomerante natural CP. p. 128.

Tabla IX. **Esfuerzos de primera grieta de los BTC estabilizados con cemento tipo UGC ensayados a compresión**

ESFUERZOS DE PRIMERA GRIETA DE LOS BTC ESTABILIZADOS CON CEMENTO TIPO UGC				
Nomenclatura	Núm.	Carga de Primera Grieta (N)	Esfuerzo de Primera Grieta (MPa)	
			Bruto	Neto
C5	1	63 546,76	1,4	1,9
	2	32 361,78	0,7	0,9
	3	38 638,00	0,9	1,1
C10	1	28 831,40	0,7	0,9
	2	44 521,96	1,0	1,3
	3	25 301,02	0,6	0,7
C15	1	107 872,60	2,5	3,2
	2	147 099,00	3,3	4,3
	3	116 698,54	2,7	3,6

Fuente: ALVARADO FIGUEROA, Marvin. Bloques de tierra compactada estabilizados con aglomerante natural CP. p. 131.

Tabla X. **Esfuerzos de ruptura de los BTC estabilizados con cemento tipo UGC ensayados a compresión**

ESFUERZOS DE RUPTURA DE LOS BTC ESTABILIZADOS CON CEMENTO TIPO UGC				
Nomenclatura	Núm.	Carga de ruptura (N)	Esfuerzo de ruptura (MPa)	
			Bruto	Neto
C5	1	70 607,52	1,6	2,1
	2	50 405,92	1,1	1,5
	3	58 643,47	1,3	1,7
C10	1	36 872,82	0,8	1,1
	2	67 273,28	1,5	2,0
	3	45 110,36	1,0	1,3
C15	1	120 621,18	2,8	3,6
	2	160 828,24	3,6	4,7
	3	136 802,07	3,2	4,2

Fuente: ALVARADO FIGUEROA, Marvin. Bloques de tierra compactada estabilizados con aglomerante natural CP. p. 132.

El investigador describió que en cada uno de los BTC que elaboró, en su cara inferior, se encuentran trabes tipo hembra, por lo que cada uno de los bloques no poseían la capacidad de cargar en toda su área bruta. Por lo que calculó la resistencia a compresión para el área bruta así como para el área neta de cada BTC.

Realizó un análisis estadístico a los resultados que obtuvo en laboratorio, de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana y los de cemento tipo UGC, para verificar la confiabilidad de los mismos. Para cada porcentaje de estabilización en los bloques consiguió tres resultados, cuando el coeficiente de variación fue mayor del 10 %, entonces seleccionó los dos resultados más cercanos, y realizó el mismo análisis, con ello determinó un

promedio, tomando ese valor como el resultado de la resistencia a compresión de cada BTC.

Para cada porcentaje y tipo de material utilizado en la estabilización de los BTC, obtuvo resultados muy variables. Los únicos bloques que cumplieron en la investigación, con lo requerido por la normativa internacional fueron los BTC estabilizados con cemento tipo UGC en un 5 y 15 % del mismo, con 1,6 MPa y 4,4 MPa, respectivamente.

2.2. Parámetros de diseño de mampostería elaborada con bloques de tierra compactada BTC

Uno de los objetivos del trabajo de investigación realizado por la Ingeniera Civil Génesis Argentina Cap Morales fue producir y evaluar bloques de tierra compactada para que posteriormente sean utilizados en viviendas económicas. Los bloques fueron elaborados con limo y agregados de materiales volcánicos. Esta opción de bloque permitirá una nueva alternativa constructiva, así como el aprovechamiento de los materiales existentes en las cercanías de los poblados.

Fabricó bloques de tierra compactada con los materiales guatemaltecos y determinar el comportamiento de los mismos al utilizarlos como unidades de mampostería en el levantado de muros. Además, determinó los parámetros de diseño en el laboratorio, al aplicar cargas de compresión y de corte a prismas elaborados con los bloques.

Con base en los resultados obtenidos determinó que los bloques que elaboró con puzolana, limo y aglomerante ternario, no son aptos para su utilización como elementos de mampostería, debido a su bajo rendimiento en

los ensayos. También determinó que los bloques no son adecuados para resistir las fuerzas de corte requeridas.

2.2.1. Ensayos de laboratorio a BTC

La norma UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo”, establece la Resistencia mínima a la compresión de los bloques; sin embargo, permite que los resultados sean como mínimo un 80 % de esa resistencia.

Con base en pruebas realizadas a BTC con aglomerante natural en proporción de 20 % y 25 % (tipo A y tipo B respectivamente). La investigadora determinó que los bloques tipo B se comportaban de mejor manera. Los resultados del ensayo a compresión de las unidades tipo A y B se encuentran en las tablas XI y XII respectivamente.

Tabla XI. **Resultados ensayo a compresión de unidades tipo A**

Núm.	Carga (kg)		Esfuerzo (kg/cm ²)		Esfuerzo (MPa)		Estado
	1era. grieta	Última	1era. grieta	Último	1era. grieta	Último	
1	600,0	1 600,0	1,73	4,62	0,17	0,45	Reprobado
2	540,0	1 740,0	1,56	5,02	0,15	0,49	Reprobado
3	400,0	1 880,0	1,15	5,43	0,11	0,53	Reprobado
Promedio	513,3	1 740,0	1,48	5,02	0,15	0,49	Reprobado

Fuente: CAP MORALES, Génesis Argentina. Evaluación experimental de los parámetros de diseño de mampostería elaborada con bloques de tierra compactada (BTC). p. 65.

Tabla XII. **Resultados ensayo a compresión de unidades tipo B**

Núm.	Carga (kg)		Esfuerzo (kg/cm ²)		Esfuerzo (MPa)		Estado
	1era. grieta	Última	1era. grieta	Último	1era. grieta	Último	
1	700,0	3 660,0	2,02	10,56	0,20	1,04	Aprobado
2	400,0	2 700,0	1,15	7,79	0,11	0,76	Reprobado
3	900,0	2 640,0	2,60	7,62	0,25	0,75	Reprobado
Promedio	666,7	3 000,0	1,92	8,66	0,19	0,85	Reprobado

Fuente: CAP MORALES, Génesis Argentina. Evaluación experimental de los parámetros de diseño de mampostería elaborada con bloques de tierra compactada (BTC). p. 66.

Tabla XIII. **Resultados ensayo a compresión de unidades con aglomerante ternario**

Núm.	Carga (kg)		Esfuerzo (kg/cm ²)		Esfuerzo (MPa)		Estado
	1era. Grieta	Última	1era. grieta	Último	1era. grieta	Último	
1	1 590,9	2 545,5	3,54	5,66	0,35	0,55	Reprobado
2	1 818,2	2 363,6	4,04	5,25	0,40	0,52	Reprobado
Promedio	1 705,0	2 454,5	3,79	5,45	0,37	0,54	Reprobado

Fuente: CAP MORALES, Génesis Argentina. Evaluación experimental de los parámetros de diseño de mampostería elaborada con bloques de tierra compactada (BTC). p. 71.

Debido a que los resultados de las unidades tipo B fueron más favorables la investigadora los complemento con un aglomerante compuesto por 10 % de cal puzolana (20 % cal y 80 % puzolana molida) y 5 % de cemento, teniendo así un aglomerante ternario. Los resultados de las unidades nuevas se muestran en la tabla XIII.

En el ensayo de capilaridad, tanto los bloques tipo A como los tipo B presentaron desprendimiento de material, hinchamiento y eflorescencia, haciendo que el ensayo se suspendiera antes del tiempo establecido. De igual manera, el ensayo de erosión acelerada la investigadora lo suspendió antes de tiempo debido a que los BTC superaron el límite establecido por la norma para la oquedad provocada por la acción del agua.

Comentario

En la Universidad de San Carlos de Guatemala se ha estudiado la utilización de la puzolana y cal para la estabilización de los bloques de tierra compactada, con la finalidad de disminuir la cantidad de cemento y lograr encontrar un material más económico y que tenga menor impacto ambiental durante su fabricación.

De acuerdo con los resultados de los ensayos que se realizaron, los investigadores verificaron que el aglomerante natural cal puzolana mejora las características físicas y propiedades mecánicas de los bloques. Pero no encontraron los materiales y las proporciones adecuadas, para que el valor de la resistencia a compresión de los bloques de tierra compactada cumpla los requerimientos mínimos de las normativas para su uso en la construcción de muros portantes.

A pesar de que los investigadores no consiguieron bloques de tierra compactada que satisficieran todos los requerimientos de la normativa, los datos que obtuvieron son útiles ya que con ellos se puede orientar a otras posibles rutas para la selección de nuevos materiales y el planteamiento de nuevas proporciones para la elaboración de mezclas.

3. IDENTIFICACION Y DESCRIPCION DE MAQUINARIA DISPONIBLE PARA LA ELABORACION DE AGLOMERANTES CON CAL PUZOLANA Y BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA EN UNA INDUSTRIA GUATEMALTECA

Para la producción de bloques de tierra comprimida existe maquinaria que facilita su proceso de fabricación, entre las maquinas identificadas en la industria se encuentra el Molino de Suspensión de Alta Presión, el tamiz vibrador y la máquina que se encarga de mezclar el material seleccionado y que comprime los bloques. Una descripción detallada de la maquinaria se presenta a continuación.

3.1. Molino de suspensión de alta presión

Se utiliza principalmente para moler productos en industrias, como la industria metalúrgica, construcción, industria química, mina, entre otros. La serie se puede utilizar para moler todo tipo de productos no inflamables y minerales no explosivos de los cuales la dureza y el contenido de humedad son inferiores a 9 y 6 por ciento respectivamente. Los materiales típicos son el cemento (harina cruda y Clinker de cemento), cuarzo, feldespato, calcita, yeso, piedra caliza, dolomita, grafito, fluorita, aedelforsite, fosfato, carbamida, electrolítico metal de manganeso, ferromanganeso, carbón, escoria, zirconio, esteatita, ortoclasa, mármol, barita, cerámica, entre otros.

Antes de ingresar el material en el molino que se ve en la figura 2, este debe ser dividido por la trituradora de mandíbulas al tamaño especificado y

posteriormente debe pasar al elevador que se ve en la figura 3. Este transporta el material hacia el primer tanque almacenador.

Figura 2. **Molino de suspensión de alta presión**



Fuente: Industria Guatemalteca productora de elementos para construcción.

Después el material pasa por el vibrador que se muestra en la figura 4, el que se encarga de transportar el material desde la primera bodega de almacenamiento hacia el sector triturador de la máquina. En la figura 5 se observa el vibrador y la entrada del molino que permiten el transporte del material.

Figura 3. **Elevador y deposito**



Fuente: Industria Guatemalteca productora de elementos para construcción.

Figura 4. **Vibrador**



Fuente: Industria Guatemalteca productora de elementos para construcción.

Figura 5. **Entrada al área de molienda**



Fuente: Industria Guatemalteca productora de elementos para construcción.

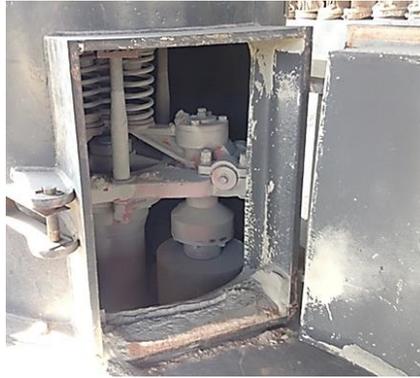
La figura 6 es la puerta de mantenimiento del área de molienda y la figura 7 muestra los rodillos del molino con los que se procesa el material.

Figura 6. **Puerta para mantenimiento**



Fuente: Industria Guatemalteca productora de elementos para construcción.

Figura 7. **Maquinaria interna del molino**



Fuente: Industria Guatemalteca productora de elementos para construcción.

Luego, el material es conducido por el canal que se observa en la figura 8, y el material molido se almacena en el silo que se ve en la figura 9, el material que aún no ha sido triturado correctamente regresa al área de rodillos para procesarse nuevamente. La separación del material molido correctamente del material no adecuado se efectúa por medio de ventiladores, que levantan y conducen el material molido al silo y que regresa el material grueso al área de molienda.

Figura 8. **Canal de paso para material procesado**



Fuente: Industria Guatemalteca productora de elementos para construcción.

Figura 9. **Silo de material molido correctamente**



Fuente: Industria Guatemalteca productora de elementos para construcción.

La máquina también tiene un área de filtrado que se observa en la figura 10, esta permite la limpieza del molino y expulsa el material de desecho que se genera por el proceso de molienda. Todos los procesos se controlan en la caja de controles mostrada en la figura 11.

Figura 10. **Filtro de partículas finas**



Fuente: Industria Guatemalteca productora de elementos para construcción.

Figura 11. **Caja de controles**



Fuente: Industria Guatemalteca productora de elementos para construcción.

3.2. Tamiz vibrador

El tamiz vibrador de materiales mostrado en la figura 12, ocupa un área de dos metros cuadrados, esta cuenta con dos motores, que se ven en la figura 13, que permiten la vibración de la cama de cernido a una velocidad de 960 vibraciones por minuto. Los materiales pasan por las mallas que se ven en la figura 14.

Figura 12. **Tamiz vibrador**



Fuente: Industria Guatemalteca productora de elementos para construcción.

Figura 13. **Motores de máquina tamizadora**



Fuente: Industria Guatemalteca productora de elementos para construcción.

Figura 14. **Mallas para procesar el material**



Fuente: Industria Guatemalteca productora de elementos para construcción.

El equipo vibra con la ayuda de cuatro resortes, cada uno se encuentra en los apoyos de la maquinaria. La medida del material se puede controlar por medio de la malla seleccionada entre 2 a 200 mm, este puede ser adaptado según la necesidad que se requiera. Cuando el material pasa por las mallas, pasa por el canal de salida que se encuentra en la parte inferior de la máquina y todo el material retenido es extraído por los canales que se encuentran en la parte superior de la maquinaria como se muestra en la figura 15.

Figura 15. **Conductos extractores de material**



Fuente: Industria Guatemalteca productora de elementos para construcción.

3.3. Máquina para elaboración de bloques de tierra comprimida

La máquina de bloques de hormigón mostrada en la figura 16, es ideal para la producción masiva económica de bloques huecos de material de alta calidad y un rendimiento excepcional en áreas abiertas o edificios. Cuenta con un procedimiento de manejo seguro y principios de diseño bien probados que garantizan un funcionamiento eficiente y los diferentes moldes son fácilmente intercambiables.

La maquinaria está compuesta por dos partes, la primera es la mezcladora que se muestra en la figura 17. El material al mezclarse se deposita en el contenedor que se encuentra a un lado de la mezcladora y se transporta al depósito de la segunda parte de la maquinaria que se muestra en la figura 18. Después el material es colocado en los moldes para producir los bloques por efecto de compresión.

Figura 16. **Maquina productora de bloques de tierra comprimida**



Fuente: Industria Guatemalteca productora de elementos para construcción.

Figura 17. **Mezclador de materiales**



Fuente: Industria Guatemalteca productora de elementos para construcción.

Figura 18. Depósito para material para la producción de bloques



Fuente: Industria Guatemalteca productora de elementos para construcción.

La máquina tiene la capacidad de generar diez bloques de tierra comprimida y cinco bloques para solera, por ciclo de funcionamiento, los moldes que utiliza se observan en la figura 19. Los procesos se controlan por medio de las palancas que se muestran en la figura 20. Con la de color rojo se controla la compresión del material en los moldes y con las de color negro se abren los ductos de ingreso del material mezclado

Figura 19. **Moldes para fabricación de bloques**



Fuente: Industria Guatemalteca productora de elementos para construcción.

Figura 20. **Palancas de control de procesos de fabricación**



Fuente: Industria Guatemalteca productora de elementos para construcción.

Comentario

En el capítulo se presenta la maquinaria principal para la fabricación de bloques de tierra compactada, pero en el momento de que una empresa decida invertir no se debe limitar a la maquinaria mostrada. Si la industria posee los medios para invertir en equipos más modernos, los puede adquirir para mejorar y acelerar el proceso de producción. Incluso podría adquirir equipos adicionales como una cámara de curado, un horno para mejorar las propiedades de los bloques, entre otros.

Con la maquinaria adquirida, un procedimiento que se debe tomar en cuenta es el constante mantenimiento de todos los equipos, de esta manera se garantizará el correcto funcionamiento de las máquinas y se evitarán interrupciones en la producción de los bloques.

También es de suma importancia capacitar correctamente a todos los operarios, sobre el funcionamiento de las máquinas. Lo anterior tiene el objetivo de evitar errores en el manejo de la maquinaria y accidentes al personal de trabajo en el proceso de producción.

Si la industria no posee los recursos económicos necesarios para la compra de los equipos modernos de producción, puede optar por la utilización de maquinaria sencilla para producción de los bloques de tierra compactada y a la utilización de una prensa manual para compactar los materiales. Al utilizar este tipo de equipos se debe considerar que son necesarios más trabajadores y mayor cantidad de equipo para poder igualar la cantidad de bloques que produce la maquinaria moderna.

4. PROPUESTA DE LINEAMIENTOS PARA EL DESARROLLO TECNOLÓGICO PARA LA PRODUCCIÓN DE BLOQUES DE TIERRA COMPACTADA ESTABILIZADOS CEMENTO, CAL Y PUZOLANA A NIVEL DE PEQUEÑA INDUSTRIA

4.1. Transferencia de tecnología

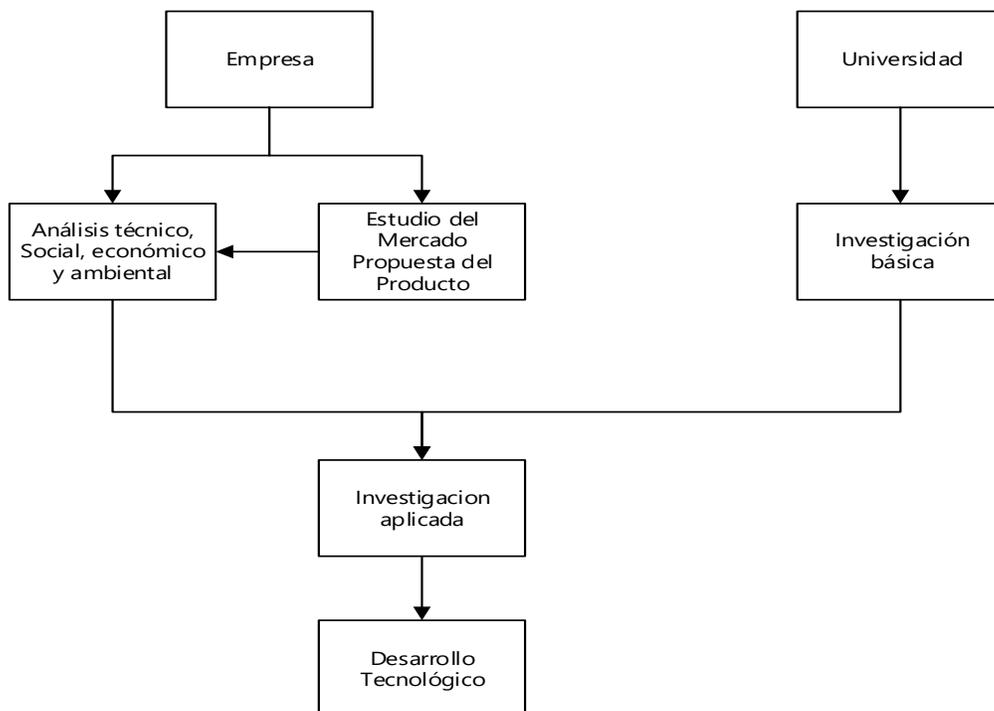
Para llevar a cabo el eficiente proceso de transferencia de tecnología a la industria, es necesario el trabajo e investigación por el sector industrial y el centro de investigaciones universitario. En la figura 21 se muestra una propuesta de cómo pueden trabajar las dos partes, por un lado la Industria debe iniciar con el estudio del mercado del producto a vender así como también realizar los análisis técnico, social, económico y ambiental del bloque de tierra compactada (BTC); a su vez la universidad inicia con la investigación básica orientada al BTC que se desea producir y comercializar por la Industria.

En la investigación básica los investigadores buscan materiales propicios para la elaboración de los bloques de tierra compactada. Al tenerlos, se caracterizan y estudian sus características físicas y propiedades mecánicas, con la finalidad de seleccionar los materiales más favorables para la fabricación de bloques de tierra compactada. Se fabrican y ensayan bloques de tierra compactada elaborados con distintos materiales y proporciones para conocer la ruta más favorable para la investigación.

La investigación aplicada procede después de la investigación básica realizada por la universidad y después de que la empresa haya obtenido

claridad o experiencia de todos los aspectos que requiere el mercado para que el bloque de tierra compactada sea rentable.

Figura 21. **Esquema general de transferencia de tecnología**



Fuente: Elaboración Propia, en base al trabajo de investigación titulado: Diseño de un modelo de transferencia Universidad-Empresa, para la I+D generado por grupos de investigación de la Universidad de Pamplona.

En la investigación aplicada se selecciona una norma nacional para tener una guía de los ensayos a realizar para garantizar la calidad del bloque, o en el caso de inexistencia de esta norma en el país se busca una norma internacional que se adecue a las condiciones presentadas y que pueda satisfacer la calidad del producto. En la tabla XIV se muestra diferentes normas internacionales que se pueden utilizar para la investigación de los bloques de tierra compactada. Los

ensayos se pueden realizar en el centro de investigación universitario o en las instalaciones de la industria interesada en la producción de BTC, esto dependerá de los equipos que estén a disposición.

Tabla XIV. **Normas sobre bloques de tierra compactada BTC**

País	Norma/Reglamento	Organismo	Notas
Brasil	NBR 8491,1986	ABNT	BTC estabilizado con cemento especifica, métodos de ensayo.
	NBR 8492.1986		
	NBR 10832. 1989		Procedimiento fabricación BTC con prensa manual/hidráulica
	NBR 10833,1989		
	NBR 10834, 1994		
	NBR 10835,1994		
NBR 10836,1994	Especificaciones y métodos de ensayo de bloques de suelo- cemento		
Colombia	NTC 5324,2004	INCOTEC	Estabilizado con cemento
EEUU	NMAC,14.7.4, 2004	CID	Reglam. Estatal de Nuevo México
España	UNE 41410:2008	AENOR	Primera norma Europea
Francia	XP P13-901, 2001	AFNOR	Norma experimental
India	IS 1725 :1982.	BIS	Especificaciones para BTC
Italia	Ley no. 378, 2004		Leyes para la conservación del patrimonio de tierra
	LR. 2/06 2 2006		
kenya	KS 02-1070: 1999.	KEBS	bloque de tierra comprimido
Nigeria	NIS 369:1997.	SON	Ladrillos de tierra estabilizada
Nueva Zelanda	NZS 4297,1998.	SNZ	Diseño de ingeniería de tierra.
	NZS 4298,1998.		Materiales y mano de obra
	NZS 4299, 1999.		Diseño de construcción variable
Regional África	ARS 670, 1996	ARSO	términos principales aplicados a BTC
	ARS 671, 1996		clasificarlos según su tipología
	ARS 672,1996		clasificarlos según su apariencia
	ARS 673, 1996		Mampostería
	ARS 674, 1996		Especificaciones para bloques de tierra comprimidos
	ARS 675, 1996		revestimiento de bloques de tierra comprimidos.
	ARS 676, 1996		morteros de tierra ordinaria
	ARS 677,1996		Especificaciones para morteros
	ARS 678, 1996		Especificaciones para mampostería de bloques
	ARS 679, 1996		Bloques expuestos a la interperie
	ARS 680, 1996		producción de bloques de tierra comprimida.
	ARS 681, 1996		fabricación de mortero de tierra
	ARS 682, 1996		Montaje de mamposteria de BTC
	ARS 683, 1996		identificación de materiales y ensayos mecánicos.
Sri Lanka	SIS 1382-1:2009	SLSI	Bloques de suelo comprimido
Tunéz	NT 21.33:1996	INNORPI	Bloques de tierra comprimida ordinarios
	NT 21.35:1996		Definición, clasificación y designación BTC

Fuente: elaboración propia, con base en el informe: ES

Al encontrar los materiales y las mezclas más eficientes para la producción de bloques de tierra compactada, así también al cumplir con los requerimientos indicados por la norma seleccionada, es necesario definir los lineamientos para la fabricación de los BTC. De esta manera habrá una eficiente transmisión de tecnología a la industria y se podrá proceder con el desarrollo tecnológico del bloque.

A continuación se enlista los lineamientos necesarios a transmitir a la industria, para la fabricación de los bloques de tierra compactada:

- Materiales por utilizar
- Preparación de los materiales
- Proporciones de las mezclas
- Norma a utilizar para ensayos de calidad
- Maquinaria necesaria para fabricación de bloques
- Tipo de curado de los bloques de tierra compactada
- Costo del bloque de tierra compactada

Con los lineamientos transmitidos, la industria puede proceder al desarrollo de la tecnología. Para el proceso de fabricación es necesario la constante supervisión para asegurar la calidad de los bloques de tierra compactada producidos.

Con el desarrollo exitoso de la tecnología corresponde a la empresa proceder con el plan de lanzamiento del producto, en el cual detalla cuáles son las características del producto, que normas lo respaldan, su precio, el público al que irá dirigido, los lugares de venta de los BTC, el nombre adecuado del

producto, el tipo de publicidad, los canales por los que se promocionará y la proyección de las ventas futuras.

4.2. Ejemplo de investigación aplicada

Para ejemplificar los siete lineamientos a transmitir a la industria se utilizará la investigación "Bloques de tierra compactada estabilizados con aglomerante ternario ccp" (pendiente de publicación), realizada por los Ingenieros Alvarado y Quiñonez, relacionada con la estabilización de bloques de tierra compactada, con cemento hidráulico tipo ARI, hidróxido de calcio y puzolana natural, los cuales conformaron el estabilizante ternario.

4.2.1. Materiales a utilizar

Los materiales que se utilizaron para la experimentación se detallan a continuación.

4.2.1.1. Cemento tipo ARI

Cemento de alta resistencia inicial ARI es un cemento hidráulico ya que fragua, endurece y desarrolla resistencia por reacción química con el agua, tanto en el aire como bajo el agua. Para obras especiales de concreto simple, reforzado y preesforzado de endurecimiento rápido y altas resistencias iniciales. Para la fabricación liviana y de elementos estructurales y cuando se requiere desencofrado y desmoldado rápido.

4.2.1.2. Cal hidratada

La cal hidratada (hidróxido de calcio) es un polvo seco, incoloro y cristalino fabricado mediante el tratamiento de óxido de calcio (cal viva) con agua, en un proceso de "apagado". También conocida como cal apagada, cal o cal muerta, la cal hidratada se usa en la producción de morteros, yesos, cementos, pinturas, productos de caucho duro, petroquímicos y en el curtido de pieles.

4.2.1.3. Puzolana

Se utiliza parte como agregado, en el material base para la fabricación de BTC y otra, como aglomerante natural cal puzolana para la estabilización de los mismos. La puzolana se obtuvo en un banco de material colindante a la carretera al Atlántico de Guatemala.

4.2.1.4. Arcilla

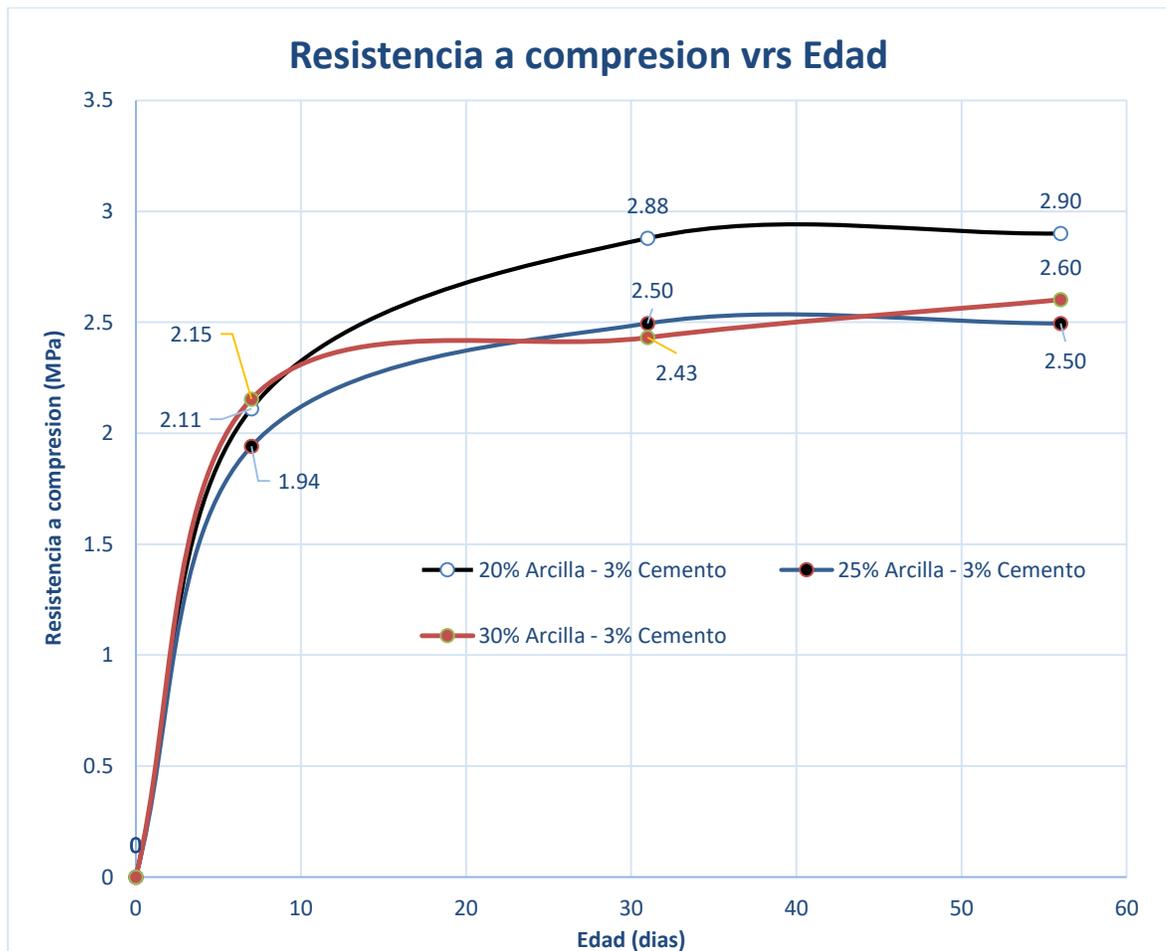
La arcilla utilizada para la fabricación de los bloques de tierra comprimida se obtuvo en un banco de materiales ubicado en el Municipio de Sanarate del departamento del Progreso, Guatemala. Por medio de diversos viajes y exploraciones al banco de materiales se identificó volúmenes considerables de material arcilloso disponible para la fabricación de BTC.

Para estudiar el comportamiento de la arcilla, los investigadores elaboraron bloques de tierra comprimida constituidos con variaciones de 20 %, 25 % y 30 % de arcilla; 3 % de cemento ARI y el porcentaje restante de agregados en un 82 % de gruesos y 18 % de finos, todos los datos mencionados se agrupan en la tabla XV. También realizaron una cuarta mezcla sin ningún porcentaje de cemento utilizando el 25 % de arcilla el

comportamiento de esta mezcla se observa en la figura 23, la última mezcla fue la de control.

La figura 22, evidencia la necesidad de estabilizar los elementos aglomerados con arcilla, ya que pierden cohesión con el pasar del tiempo y no hay aumento significativo en la resistencia a compresión de los elementos.

Figura 22. Resistencia a compresión de muestras 1, 2 y 3



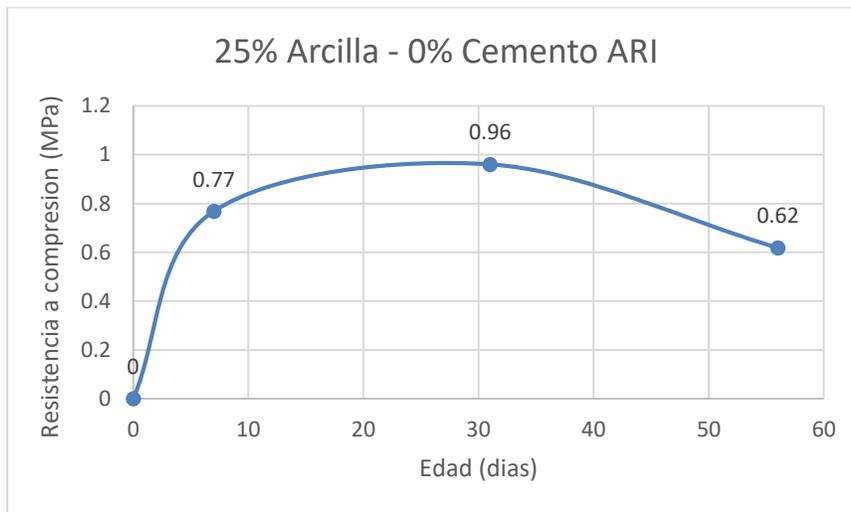
Fuente: Ingenieros Alvarado y Quiñonez (pendiente de publicación).

Tabla XV. **Resistencia a compresión (MPa)**

#	Cemento ARI	Arcilla	días			
			0	7	31	56
1	3 %	20 %	0	2,11	2,88	2,90
2	3 %	25 %	0	1,94	2,50	2,50
3	3 %	30 %	0	2,15	2,43	2,60
4	0 %	25 %	0	0,77	0,96	0,62

Fuente: Ingenieros Alvarado y Quiñonez (pendiente de publicación).

Figura 23. **Resistencia a compresión muestra 4**



Fuente: Ingenieros Alvarado y Quiñonez (pendiente de publicación).

4.2.2. Preparación de materiales

La arcilla, extraída del banco de materiales en rocas de diversos tamaños, debe ser triturada en molino, es decir que necesita procesarse para obtener una granulometría fina y uniforme. Los agregados conformados de selecto deben

pasar por el molino y el tamiz vibrador para obtener agregados finos y agregados gruesos. La cal y el cemento no necesitan preparación.

4.2.3. Proporciones de las mezclas

Las mezclas que utilizaron los investigadores, se dividieron en dos grupos denominados A y B. Estos estuvieron conformados aproximadamente con 10 % y 15 % de arcilla como aglomerante, respectivamente. Para cada grupo los bloques de tierra comprimida fueron estabilizadas de dos formas; la primera con aglomerante ternario CCP (cemento tipo ARI y cal puzolana) y la segunda únicamente con cemento tipo ARI.

La cantidad de materiales estabilizantes se calculó con base en la cantidad de arcilla contenida, utilizando 25 %, 50 %, 75 % y 100 % de la cantidad del aglomerante, para realizar las mezclas. Los datos del grupo B se encuentran en la tabla XVI a la tabla XIX, Los resultados más favorables los presentó la mezcla número 4 y 8 del grupo B.

Tabla XVI. **Mezclas 1 y 5 del grupo B**

Materiales	Mezcla 1		Mezcla 5	
	Libras	%	Libras	%
Agregados	175,00	81,93	175,00	83,44
Arcilla	30,88	14,46	30,88	14,72
Cemento	3,86	1,81	3,86	1,84
Cal	1,16	0,54	0	0
Puzolana	2,70	1,27	0	0
TOTAL	213,60	100,00	209,74	100,00

Fuente: Ingenieros Alvarado y Quiñonez (pendiente de publicación).

Tabla XVII. **Mezclas 2 y 6 del grupo B**

Materiales	Mezcla 2		Mezcla 6	
	Libras	%	Libras	%
Agregados	175,00	79,07	175,00	81,93
Arcilla	30,88	13,95	30,88	14,46
Cemento	7,72	3,49	7,72	3,61
Cal	2,32	1,05	0	0
Puzolana	5,40	2,44	0	0
TOTAL	221,32	100,00	213,60	100,00

Fuente: Ingenieros Alvarado y Quiñonez (pendiente de publicación).

Las mezclas estabilizadas con estabilizante ternario CCP las elaboraron con cemento tipo ARI en un 50 % y el restante de cal-puzolana, sobre la cantidad de los porcentajes de arcilla descritos en el párrafo anterior. También definieron una división de la cantidad de la mezcla cal puzolana en un aproximado de 70 % de puzolana y 30 % de cal para todas las mezclas de ambos grupos.

Tabla XVIII. **Mezclas número 3 y 7 del grupo B**

Materiales	Mezcla 3		Mezcla 7	
	Libras	%	Libras	%
Agregados	175,00	76,41	175,00	80,47
Arcilla	30,88	13,48	30,88	14,20
Cemento	11,58	5,06	11,58	5,33
Cal	3,47	1,52	0	0
Puzolana	8,11	3,54	0	0
TOTAL	229,04	100,00	217,46	100,00

Fuente: Ingenieros Alvarado y Quiñonez (pendiente de publicación).

Tabla XIX. **Mezclas 4 y 8 del grupo B**

Materiales	Mezcla 4		Mezcla 8	
	Libras	%	Libras	%
Agregados	175,00	73,91	175,00	79,07
Arcilla	30,88	13,04	30,88	13,95
Cemento	15,44	6,52	15,44	6,98
Cal	4,63	1,96	0	0
Puzolana	10,81	4,57	0	0
TOTAL	236,76	100,00	221,32	100,00

Fuente: Ingenieros Alvarado y Quiñonez (pendiente de publicación).

4.2.4. Norma a utilizar para ensayos de calidad

Normativa española UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo”; donde se indican los tipos de ensayos y el equipo necesario para la realización de los mismos.

4.2.4.1. Resistencia a compresión de BTC

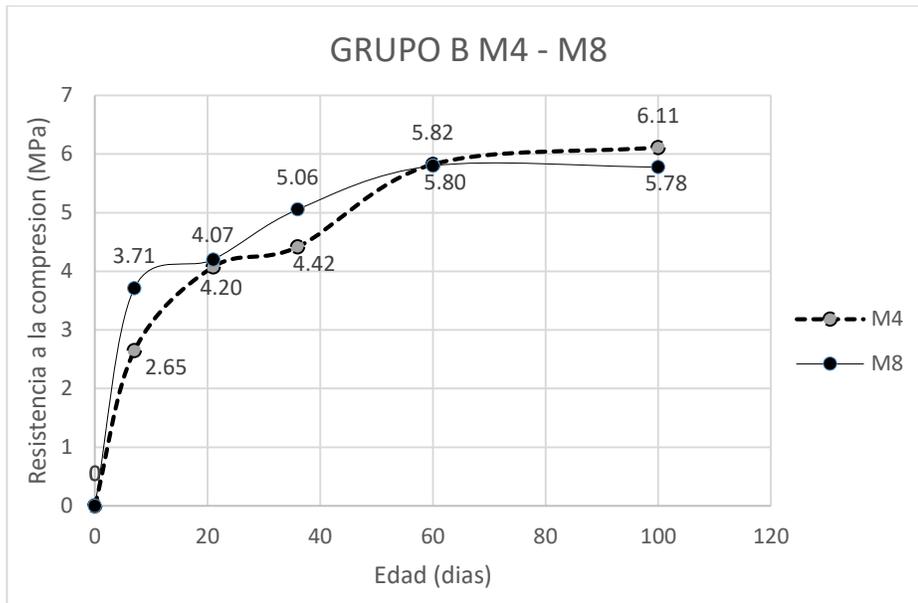
En la tabla XX se observan los resultados que obtuvieron de los ensayos a compresión de los bloques de tierra compactada elaborados con aglomerante natural arcilla y estabilizados con cal puzolana y cemento tipo ARI, para distintas proporciones de mezcla. Los mejores resultados los obtuvieron de la mezcla 4 estabilizado con estabilizante ternario CCP y la mezcla 8 estabilizada con cemento tipo ARI.

Tabla XX. **Resistencia a la compresión respecto al área bruta, grupo B**

GRUPO B - ESFUERZO A COMPRESIÓN (MPa)					
Mezcla	7 días	21 días	36 días	60 días	100 días
1	1,56	2,09	2,03	2,15	2,14
5	1,34	1,66	1,73	2,05	2,02
2	2,03	3,07	2,92	4,22	3,65
6	2,58	3,29	3,42	3,55	3,46
3	2,37	3,84	3,41	5,09	4,67
7	3,05	3,85	4,35	4,74	4,72
4	2,65	4,07	4,42	5,82	6,11
8	3,71	4,20	5,06	5,80	5,78

Fuente: Ingenieros Alvarado y Quiñonez (pendiente de publicación).

Figura 24. **Resistencia a compresión de mezclas 4 y 8**



Fuente: Ingenieros Alvarado y Quiñonez (pendiente de publicación).

La figura 24, evidencia que la utilización de estabilizante ternario CCP aumenta la resistencia de los bloques de tierra comprimida, aunque produce un aumento de pequeña magnitud respecto al incremento de resistencia que obtiene la mezcla estabilizada únicamente con cemento tipo ARI.

Según las especificaciones de la norma española UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo”, las mezclas 4 y 8 del grupo B, cumplen con un valor mayor al de la clasificación de BTC 5, que corresponde a 5 Mpa.

4.2.4.2. Humectación secado

A continuación se presentan las condiciones de rechazo que descartan la posibilidad de utilización de los BTC en la construcción.

Tabla XXI. **Condiciones de rechazo a ciclos de humectación secado**

NOMENCLATURA	CONDICIONES DE RECHAZO
A	Grietas
B	Hinchamiento local
C	Picado local en 5 o más zonas
D	Perdida de capa de suelo
E	Penetración de agua en más del 70 % del ancho del BTC (8,75 cm)
F	Perdida de fragmentos mayores a 50 mm
G	Eflorescencias superficiales

Fuente: norma española UNE 41410:2008.

En el ensayo de humectación/secado, conforme los requerimientos de la Norma española UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo”, se enumeran en la tabla XXI, las condiciones de rechazo que no debían presentar los BTC. En la tabla XXII y XXIII se muestran los resultados para la muestra 4 y 8 respectivamente.

Tabla XXII. Resultados mezcla 4

Mezcla	CONDICIONES DE RECHAZO	1	2	3	4	5
4	A	NO	NO	NO	NO	NO
	B	NO	NO	NO	NO	NO
	C	NO	NO	NO	NO	NO
	D	NO	NO	NO	NO	NO
	E	NO	NO	NO	NO	NO
	F	NO	NO	NO	NO	NO
	G	SI	SI	SI	SI	SI

Fuente: Ingenieros Alvarado y Quiñonez (pendiente de publicación).

Tabla XXIII. Resultados mezcla 8

Mezcla	CONDICIONES DE RECHAZO	1	2	3	4	5
8	A	NO	NO	NO	NO	NO
	B	NO	NO	NO	NO	NO
	C	NO	NO	NO	NO	NO
	D	NO	NO	NO	NO	NO
	E	NO	NO	NO	NO	NO
	F	NO	NO	NO	NO	NO
	G	SI	SI	SI	SI	SI

Fuente: Ingenieros Alvarado y Quiñonez (pendiente de publicación).

Los BTC de las mezclas 4 y 8 del grupo B presentaron un comportamiento similar. La única condición de rechazo que presentaron los bloques fueron la aparición de eflorescencias superficiales desde el primer ciclo de ensayo.

4.2.4.3. Ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET)

Tanto los BTC de la mezcla 4 estabilizados con estabilizante ternario CCP; como los estabilizados con cemento tipo ARI de la mezcla 8, cumplieron con la profundidad de la huella requerido por la norma (menor o igual a 10 mm), esto se observa en la tabla XXIV. Los primeros, presentaron oquedades variables dentro del rango establecido por las normas y los segundos no presentaron daños. En la figura 25 se observa la aplicación del ensayo a uno de los bloques de tierra comprimida.

Tabla XXIV. **Profundidad de huella en bloques del grupo B**

GRUPO B	
Mezcla	Profundidad de huella (mm)
1	0,95
5	1,15
2	0,8
6	0,6
3	0,9
7	0
4	0,4
8	0

Fuente: Ingenieros Alvarado y Quiñonez (pendiente de publicación).

Observaciones: Las unidades elaboradas con las mezclas 1, 2, 5, y 6 presentaron un leve descascaramiento en las caras ensayadas.

Figura 25. **Aplicación de ensayo de erosión acelerada**



Fuente: Ingenieros Alvarado y Quiñonez (pendiente de publicación).

4.2.4.4. Ensayo de absorción de agua por capilaridad

A continuación se presentan los resultados del ensayo de absorción por capilaridad aplicado a muestras del grupo B.

Tabla XXV. **Coefficiente de absorción muestras 4 y 8 del grupo B**

Muestra Grupo B	Coefficiente 10^6 ($g/m^2*s^{0.5}$)
M4	106,66
M8	100,74

Fuente: Ingenieros Alvarado y Quiñonez (pendiente de publicación).

En los resultados obtenidos de los valores de coeficiente de capilaridad para los BTC estabilizados con cal puzolana y cemento tipo ARI, y los estabilizados únicamente con cemento tipo ARI que están en la tabla XXV. Se

puede apreciar que la estabilización con aglomerante ternario aumenta la aparición de poros en comparación al estabilizado solo por cemento tipo ARI, cabe a destacar que es en una proporción reducida.

Figura 26. **Inmersión de bloque en agua**



Fuente: Ingenieros Alvarado y Quiñonez (pendiente de publicación).

Cuanto mayor sea el valor del coeficiente de capilaridad de un material, mayor cantidad de poros posee y, por ende, mayor cantidad de agua absorberá. En la figura 26, se observa una fotografía en la cual se muestra el ensayo de absorción a un bloque y, en la figura 27, se muestran los bloques después de culminar el ensayo.

Figura 27. **Bloques después del ensayo**



Fuente: Ingenieros Alvarado y Quiñonez (pendiente de publicación).

4.2.5. Maquinaria necesaria para fabricación de bloques

Para la fabricación de bloques de tierra compactada (BTC) es necesario la maquinaria descrita en el capítulo número tres. El molino industrial para la trituración de la arcilla y agregados, el tamiz vibrador para obtener la granulometría adecuada de los agregados para las mezclas y la máquina de elaboración de bloques de tierra compactada para poder fabricar los bloques.

4.2.6. Procedimiento de curado de los bloques de tierra compactada

Los bloques de tierra compactada fabricados para que lleguen a una resistencia a compresión adecuada para el uso constructivo se deben mantener húmedos para asegurar la hidratación del cemento garantizando el desarrollo propio de la resistencia a compresión de los bloques, por un periodo mínimo de 3 días a una temperatura ambiente.

4.2.7. Costo del Bloque de tierra comprimida

El investigador calcula el costo de los bloques de tierra compactada, en base a los materiales utilizados, maquinaria requerida, mano de obra y tiempos de fabricación. Con el costo del producto el empresario define cual es el valor más apropiado para el mercado.

4.3. Desarrollo tecnológico

En el ejemplo se observa cómo se inicia con la búsqueda e investigación de los materiales adecuados para la aplicación. Luego, se explica cómo preparar los materiales para elaborar las mezclas y se detallan las proporciones

de las mezclas con las que se experimentó. De las ocho mezclas los investigadores seleccionan la mezcla número 4 estabilizada con aglomerante ternario y la mezcla número 8 estabilizada con cemento tipo ARI, debido a que estas presentaron mejor resistencia a la compresión.

En la búsqueda de la normativa para guiarse en los ensayos de calidad los investigadores seleccionan la norma española, la cual especifica los requerimientos mínimos para que los bloques de tierra compactada sean adecuados para su utilización. Con la norma definida realizan los ensayos de humectación secado, del cual las dos muestras ensayadas presentaron eflorescencias superficiales, este es un problema pendiente de resolver. Después realizan los ensayos de erosión acelerada Swinburne y el ensayo de absorción por capilaridad, según los investigadores los resultados de ambas muestras presentaron valores favorables para su utilización.

Una vez que los investigadores definen la mezcla ideal para la fabricación de bloques, se identifica la maquinaria necesaria para la producción requerida por el mercado. En este momento, se debe evaluar el personal necesario y los recursos que tiene la empresa para la compra de equipo.

Con la producción de los bloques los investigadores definen el tratamiento de curado necesario, que se debe dar a los bloques para que alcancen la resistencia a compresión. Cumpliendo con los lineamientos anteriores los investigadores definen el costo de la unidad producida y el sector industrial investiga el valor adecuado para el mercado con la finalidad de que el producto sea rentable.

Para lograr una transferencia exitosa los investigadores deben acompañar en todo el proceso de producción a la industria, de esta manera se podrá transmitir los conocimientos a los operarios y al supervisor de producción a la ruta más eficiente para el desarrollo tecnológico del BTC. La información que se otorga debe ser clara y sistemática para que no hallan dificultades en el aprendizaje del proceso de producción de bloques de tierra compactada.

CONCLUSIONES

1. Las propuestas de desarrollo tecnológico para la producción de bloques deben de partir de la combinación de la capacidad de producción de la industria, del conocimiento generado en las universidades y de las características del mercado al que se comercializará. Con la finalidad de decidir la ruta ideal para la producción de bloques, en la cual la investigación, la industria y el mercado se integren.
2. Los resultados de las investigaciones sobre las puzolanas y bloques de tierra compactada, realizados en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, indican que Guatemala posee un volumen elevado de material puzolánico de calidad, que se puede utilizar para la experimentación y desarrollo tecnológico de bloques de tierra comprimida.
3. Para que la industria sea capaz de producir y comercializar bloques, es necesario hacer un análisis profundo del personal y la maquinaria necesaria para cubrir la demanda del mercado, cumpliendo con las especificaciones y requerimientos impuestos en la norma seleccionada como respaldo de la calidad del producto final.
4. El correcto desarrollo tecnológico de producción de bloques BTC en la industria, es posible utilizando un modelo de transferencia tecnológica. Se inicia con la creación de un vínculo entre la universidad y la industria; de esta manera, se obtienen los recursos económicos para el material y

la maquinaria para realizar ensayos de calidad, y el conocimiento académico para guiar la investigación de los bloques a un producto final.

RECOMENDACIONES

1. Seguir los lineamientos propuestos en la investigación para realizar una transferencia de tecnología a la industria, ya que puede facilitar la transmisión de conocimiento de una forma sistemática en base a los modelos de transferencia tecnológica usados internacionalmente.
2. Cuando se realicen los análisis económicos, técnicos, sociales y ambientales se debe buscar al profesional especializado en cada área, así se obtendrán resultados certeros.
3. La metodología que se presenta en esta investigación es aplicable para el desarrollo tecnológico de bloques de tierra compactada BTC, pero los lineamientos se pueden utilizar como base y referencia para la transferencia tecnológica para otros productos de la construcción.
4. La realización de exposiciones entre universidades y empresas, en los cuales se presenten los elementos constructivos estudiados en los centros de investigación, con la finalidad de generar interés y vínculos entre los mismos.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALVARADO FIGUEROA, Marvin Alvarado. *Bloques de tierra compactada estabilizados con aglomerante natural CP*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2015. 242 p.
2. BAUTISTA GALLARDO, Pablo José. *Determinación del índice de reactividad mecánica de 18 muestras de materiales volcánicos de Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 184 p.
3. BOLÍVAR LEÓN, Rafael; GARCÍA MOGOLLÓN, Javier Mauricio; GUALDRÓN GUERRERO, Carlos Andrés. *Diseño de un modelo de transferencia Universidad-Empresa, para la I+D generado por grupos de investigación de la Universidad de Pamplona*, 2013. 14 p.
4. CAÑAS, Ignacio.; CID FALCETO, Jaime; MAZARRÓN, Fernando. *Las normativas de construcción con tierra en el mundo*. España: Universidad Politécnica de Madrid, 2010. 11 p.
5. CAP MORALES, Génesis Argentina. *Evaluación experimental de los parámetros de diseño de mampostería elaborada con bloques de tierra compactada (BTC)*. Trabajo de graduación de Ing. Civil.

Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería,
2016. 134 p.

6. OCHOA MARROQUÍN, Luis Alfredo. *Caracterización geológica y física de 8 muestras de puzolanas de origen volcánico de la región de occidente de Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 166 p.
7. QUIÑÓNEZ DE LA CRUZ, Francisco Javier. *Determinación y evaluación experimental del índice de reactividad puzolánica de diez bancos de materiales de la franja volcánica de Guatemala para la industria del cemento*. Guatemala, 2013. 105 p.
8. QUIÑÓNEZ DE LA CRUZ, Francisco Javier. *Estado del arte de puzolanas naturales volcánicas como adiciones activas en la producción de cementos*. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro de Investigaciones de Ingeniería, 2010. 95 p.
9. ROSALES RIVAS, Víctor Rafael. *Geología y caracterización física de puzolanas de la zona oriental de Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 205 p.

ANEXO

Anexo 1. Modelo y esquema de la transferencia tecnológica

Los modelos explican la relación que existen entre las instituciones participantes en la transferencia tecnológica, donde las más recurrentes instituciones son las universidades y las empresas, ya que las primeras son las principales generadoras de conocimiento y las segundas permiten la masificación del conocimiento a través de la comercialización propia de la naturaleza de las empresas.

Triangulo de Sábato

Se basa en la idea de que uno de los motores del desarrollo radica en los vínculos entre el gobierno, la estructura productiva y las instituciones. El triángulo de Sábato es un modelo de política científico-tecnológica que postula para que realmente exista un sistema científico-tecnológico es necesario que el Estado (como diseñador y ejecutor de la política). La infraestructura científico-tecnológica (como sector de oferta de tecnología) y el sector productivo (como demandante de tecnología), estén relacionados fuertemente de manera permanente. Estas son las interrelaciones del triángulo.

De esta manera, la figura presenta un modelo orientador de las estrategias de desarrollo. Está representado mediante un triángulo de interacciones entre los vértices correspondientes al gobierno, a la estructura productiva y a la infraestructura científico-técnica. Las interrelaciones entre los vértices permiten

Continuación anexo 1.

crear un flujo de demandas y ofertas que conduce a la generación y utilización de conocimientos estratégicos y socialmente útiles

Figura. Interrelaciones del modelo del Triángulo de Sábato



Fuente: BOLÍVAR LEÓN, Rafael; GARCÍA MOGOLLÓN, Javier Mauricio; GUALDRÓN GUERRERO, Carlos Andrés. *Diseño de un modelo de transferencia Universidad-Empresa, para la I+D* generado por grupos de investigación de la Universidad de Pamplona. p. 110.

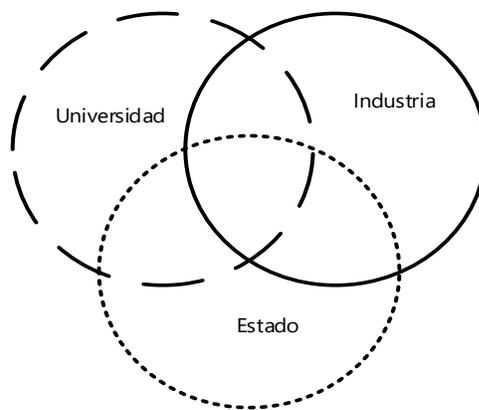
Modelo de la triple hélice

Este modelo permite una vinculación entre disciplinas y conocimientos, donde la universidad tiene un papel estratégico y es la base para generar las relaciones con la empresa. El desarrollo de estas relaciones se han discutido ampliamente en diferentes tipos de investigaciones que pretenden tratar de desarrollar las acciones correspondientes entre gobierno, empresa, universidad.

Continuación anexo 1.

El modelo propuesto por Etzkowitz y Leydesdorff (2000), propone una gradual disminución de las diferencias entre disciplinas y entre distintos tipos de conocimientos, así como entre las diferentes instancias relacionadas con la vinculación entre la universidad, la empresa y el gobierno, que permite el análisis desde la óptica particular de cada caso, por pares o bien en una forma integral.

Figura. Modelo triple hélice



Fuente: elaboración propia.

Uno de los objetivos de la Triple Hélice es la búsqueda de un modelo que refleje la complejidad del concepto de vinculación, tomando en cuenta el entorno en el cual se fundamentan las relaciones entre los agentes de la vinculación.

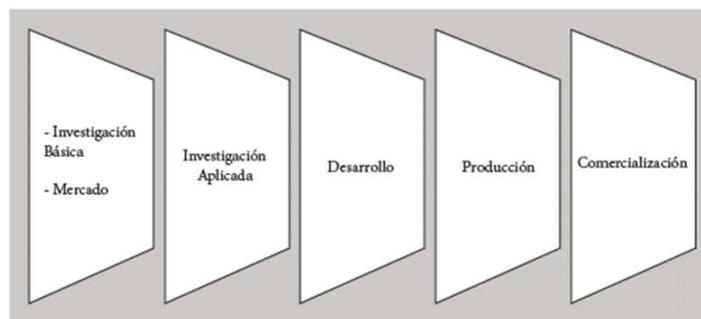
Continuación anexo 1.

Modelo lineal

Este se plantea como un modelo de innovación que se caracteriza por definir la transferencia, partiendo de las necesidades del mercado, acompañada de la investigación básica, para luego llevarla a la investigación aplicada e iniciar el proceso de transferencia de los resultados de investigación.

La investigación básica a menudo no suministra inmediatamente una información útil. Su propósito, más bien, es desarrollar un modelo que identifica todas las variables relevantes en un medio ambiente particular e hipotetiza acerca de su relación. Luego, empleando los hallazgos de la investigación básica, es posible desarrollar un producto. Y el estudio de mercado consiste en una iniciativa empresarial con el fin de tener una protección de la viabilidad comercial de una actividad.

Figura. Modelo lineal



Fuente: BOLÍVAR LEÓN, Rafael; GARCÍA MOGOLLÓN, Javier Mauricio; GUALDRÓN GUERRERO, Carlos Andrés. *Diseño de un modelo de transferencia Universidad-Empresa, para la I+D* generado por grupos de investigación de la Universidad de Pamplona. p. 110.

Continuación anexo 1.

Lo próximo es probar el producto, la competencia de la investigación aplicada, a menudo llamada demostración. En efecto, la investigación aplicada es una prueba o ensayo que incluye una evaluación sistemática.

Fuente: COLLAZOS GARCÍA, Hernán. *Modulo técnicas de investigación*. p. 8.

