



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

**MORTEROS PARA REVESTIMIENTO CON ADICIÓN DE POLVO DE  
NEUMÁTICOS RECICLADOS**

**Julianne Victoria Corzo Pérez**

Asesorado por el Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila

Guatemala, abril de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MORTEROS PARA REVESTIMIENTO CON ADICIÓN DE POLVO DE  
NEUMÁTICOS RECICLADOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**JULIANNE VICTORIA CORZO PÉREZ**

ASESORADO POR EL ING. CIVIL MARIO RODOLFO CORZO ÁVILA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA CIVIL**

GUATEMALA, ABRIL DE 2023

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	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

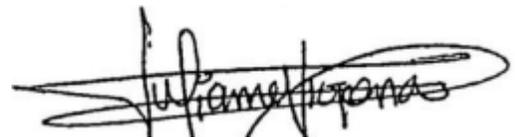
DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADORA	Inga. María del Mar Girón Cordón
EXAMINADOR	Ing. Nicolás de Jesús Guzmán Sáenz
EXAMINADOR	Ing. Luis Eduardo Portillo España
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **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:

### **MORTEROS PARA REVESTIMIENTO CON ADICIÓN DE POLVO DE NEUMÁTICOS RECICLADOS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería civil, con fecha 29 de octubre de 2020.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Julianne Victoria Corzo Pérez', written in a cursive style with a large flourish at the end.

**Julianne Victoria Corzo Pérez**



Guatemala 12 de febrero de 2023

Ingeniero

**Hugo Leonel Montenegro Franco**

Jefe del Área de Materiales de Construcción y Obras Civiles

Escuela de Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería

Universidad San Carlos de Guatemala

Presente

Estimado Ingeniero:

Cumpliendo con lo resuelto con la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, se procedió a la asesoría y revisión del trabajo de graduación: **“MORTEROS PARA REVESTIMIENTO CON ADICIÓN DE POLVO DE NEUMÁTICOS RECICLADOS”**, presentado por la estudiante Julianne Victoria Corzo Pérez, quien se identifica con registro académico 201612140 y con el CUI 2988709080101.

Considero que el trabajo de graduación se ha desarrollado satisfactoriamente y cumple con los objetivos que motivaron a la selección de dicho tema, por lo que hago de su conocimiento que apruebo el trabajo realizado.

Sin otro particular, atentamente.

  
**Mario Rodolfo Corzo A.**  
**INGENIERO CIVIL**  
**Colegiado No. 2089**

**Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila**

Escuela de Ingeniería Civil  
Colegiado No. 2089



ESCUELA DE  
**INGENIERÍA CIVIL**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Guatemala, 7 de marzo de 2,023

Ingeniero  
Armando Fuentes Roca  
Director Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Fuentes, Le informo que he revisado el trabajo de graduación “MORTEROS PARA REVESTIMIENTO CON ADICIÓN DE POLVO DE NEUMÁTICOS RECICLADOS”, desarrollado por la estudiante de Ingeniería Civil, Julianne Victoria Corzo Pérez, quién contó con la asesoría de el Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila.

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 ENSEÑAD A TODOS



Ing. Civil Hugo Leonel Montenegro Franco  
**Jefe de área de materiales y construcciones civiles.**





LNG.DIRECTOR.088.EIC.2023

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y la aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **MORTEROS PARA REVESTIMIENTO CON ADICIÓN DE POLVO DE NEUMÁTICOS RECICLADOS**, presentado por: **Julianne Victoria Corzo Pérez**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



Ing. Armando Fuentes Roca  
Director  
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala, abril de 2023



Decanato  
Facultad de Ingeniería  
24189101- 24189102  
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.367.2023

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: **MORTEROS PARA REVESTIMIENTO CON ADICIÓN DE POLVO DE NEUMÁTICOS RECICLADOS**, presentado por: **Julianne Victoria Corzo Pérez**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada ★

Decana

Guatemala, abril de 2023

AACE/gaoc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por ser la razón de mi existencia, el motivo para seguir adelante en mi vida y permitirme alcanzar mis metas.
<b>Mi padre</b>	Víctor Corzo, por inspirarme a ser quien soy, por apoyarme en todo momento con la carrera y ser mi guía y buen consejero.
<b>Mi madre</b>	Julieta Pérez de Corzo, por darme su amor, apoyo incondicional e inspirarme con sus buenos consejos y palabras de aliento.
<b>Mis hermanos</b>	Alejandra, Manuel y Fernando Corzo, por apoyarme para alcanzar mis metas.
<b>Mi familia</b>	Mis abuelas, tíos y primos, por sus muestras de apoyo.
<b>Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila</b>	Por brindarme apoyo tanto en mi formación profesional como en mi vida, por ser un gran amigo y compartir conocimiento.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser mi hogar de estudios universitarios.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por abrirme las puertas al mundo de la construcción y formarme académicamente
<b>Mis padres</b>	Víctor Corzo y Julieta Pérez de Corzo, por apoyarme con mis estudios y permitirme realizar mis metas.
<b>Mi abuelita</b>	Consuelo de Pérez, por su apoyo y cariño especial.
<b>Andrés Meléndez</b>	Por ser parte fundamental en mi vida, universitaria y personal, y apoyarme en todo momento.
<b>Mis amigos de la Facultad de Ingeniería</b>	Por brindarme su apoyo, amistad y permitirme tener una buena experiencia universitaria.
<b>Mis amigos de la Sección de Estructuras CII</b>	Telma Cermeño, Félix Chocojay, don Raúl Ortiz y a todos los que me apoyaron para culminar este trabajo.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	XI
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XXIII
GLOSARIO .....	XXV
RESUMEN.....	XXIX
OBJETIVOS.....	XXXI
INTRODUCCIÓN .....	XXXIII
1. ANTECEDENTES .....	1
1.1. Impacto ambiental por neumáticos desechados.....	1
1.1.1. Desecho de neumáticos en Guatemala.....	1
1.1.2. Niveles de contaminación atmosférica debido a la quemado de neumáticos al aire libre .....	2
1.1.3. Daños en la salud debido al desecho y almacenamiento de neumáticos .....	3
1.2. Origen de los neumáticos: .....	3
1.2.1. Evolución de los neumáticos en el siglo XIX:.....	4
1.2.2. Evolución de los neumáticos durante el siglo XX: ....	5
1.3. El agua como agente destructivo en la construcción:.....	6
1.3.1. El biodeterioro de los materiales de construcción causado por la humedad .....	6
1.3.2. Tipos de humedad: .....	7
1.3.2.1. Humedad por condensación: .....	7
1.3.2.2. Humedad por capilaridad:.....	7
1.3.2.3. Humedad por filtración.....	8
1.4. Origen de los morteros en la construcción .....	9

1.4.1.	Primera aparición de los morteros en la Biblia .....	9
1.4.2.	Morteros egipcios compuestos de yeso: .....	9
1.4.3.	Morteros grecorromanos .....	10
1.4.4.	Morteros en la edad media.....	10
1.4.5.	Morteros en la actualidad: .....	11
1.4.5.1.	Clasificación de los morteros de acuerdo con su reacción química.....	11
1.4.5.2.	Clasificación de los morteros de acuerdo con sus componentes: .....	12
1.4.5.3.	Clasificación del mortero de acuerdo con su función estructural: .....	12
1.5.	Origen de los impermeabilizantes en la construcción .....	13
1.5.1.	Impermeabilización prehispánica: .....	13
1.5.2.	Impermeabilización en el siglo XX.....	14
1.5.3.	Impermeabilización en la actualidad .....	15
1.5.3.1.	Impermeabilización rígida:.....	16
1.5.3.2.	Impermeabilización flexible .....	17
1.5.3.3.	Productos que se emplean en la impermeabilización.....	17
1.5.3.3.1.	Pinturas .....	17
1.5.3.3.2.	Bases imprimadoras .....	17
1.5.3.3.3.	Pastas asfálticas y elastómeros.....	18
1.5.3.3.4.	Bentonita .....	18
1.5.3.3.5.	Membranas de refuerzo	18
1.5.3.3.6.	Morteros impermeabilizantes .....	19
1.5.4.	Diferencia de calidad en los morteros impermeabilizantes a nivel internacional.....	19

1.6.	El caucho de neumático reciclado como impermeabilizante en la construcción.....	21
1.7.	Deterioro de los materiales de construcción debido al cambio climático .....	22
1.7.1.	Contaminantes en el aire .....	22
1.7.2.	Deterioro de los materiales por la calidad del agua.....	23
2.	CAUCHO GRANULADO DE NEUMÁTICOS RECICLADOS .....	25
2.1.	Definición de neumático .....	25
2.2.	Tipos de neumáticos .....	26
2.3.	Composición de los neumáticos .....	28
2.3.1.	Características básicas del neumático .....	29
2.3.1.1.	Cauchos o elastómeros .....	31
2.3.1.1.1.	Caucho natural y sintético .....	31
2.3.1.2.	Negro de carbono .....	34
2.3.1.3.	Acero y textiles .....	34
2.3.1.4.	Óxido de zinc.....	35
2.3.1.5.	Azufre .....	35
2.3.1.6.	Aditivos .....	35
2.4.	Importación de neumáticos en Guatemala .....	35
2.4.1.	Generalidades del mercado de neumáticos en Guatemala .....	36
2.4.2.	Tamaño de mercado de neumáticos en Guatemala .....	37
2.5.	Desecho de neumáticos en Guatemala.....	38
2.5.1.	Disposición de neumáticos desechados en Guatemala .....	38

2.5.1.1.	Desecho de neumáticos en basureros .....	38
2.5.1.2.	Incineración de neumáticos desechados .....	39
2.5.1.3.	Reencauchado de neumáticos .....	40
2.5.1.4.	Combustible alternativo derivado de neumáticos desechados.....	40
2.6.	Reciclaje de neumáticos en Guatemala .....	41
2.6.1.	Reutilización .....	42
2.6.2.	Reciclaje secundario o mecánico .....	43
2.6.3.	Reciclaje terciario o químico.....	44
2.6.4.	Valorización energética .....	44
2.7.	Polvo o granulado de caucho de neumático reciclado como materia prima .....	45
2.7.1.	Propiedades mecánicas del polvo o granulado de caucho de neumático reciclado .....	46
2.7.2.	Usos del granulado de caucho de neumático reciclado en la construcción guatemalteca.....	47
2.7.2.1.	Concreto con adición de caucho granulado .....	48
2.7.2.2.	Paneles aislantes de sonido.....	48
3.	PROPIEDADES DEL AGREGADO FINO PARA MORTEROS Y LAS NORMAS QUE DEBE CUMPLIR.....	49
3.1.	Propiedades del agregado fino .....	49
3.1.1.	Clasificación según su procedencia .....	49
3.1.2.	Propiedades físicas .....	50
3.1.2.1.	Forma.....	50
3.1.2.2.	Granulometría .....	50

	3.1.2.3.	Textura .....	51
	3.1.2.4.	Superficie específica.....	51
	3.1.2.5.	Porosidad.....	51
	3.1.2.6.	Densidad o peso específico.....	52
	3.1.2.7.	Peso volumétrico .....	52
	3.1.2.8.	Color .....	52
	3.1.2.9.	Abultamiento de la arena .....	52
	3.1.3.	Propiedades mecánicas .....	52
	3.1.3.1.	Resistencia .....	53
	3.1.3.2.	Tenacidad .....	53
	3.1.3.3.	Adherencia.....	53
	3.1.3.4.	Dureza .....	53
	3.1.3.5.	Sustancias perjudiciales .....	53
	3.2.	Normas y ensayos aplicados al agregado fino .....	54
4.	PROPIEDADES DE LOS MORTEROS Y LAS NORMAS QUE DEBE CUMPLIR .....		57
	4.1.	Propiedades en estado plástico.....	57
	4.1.1.	Manejabilidad.....	57
	4.1.2.	Retención de agua.....	58
	4.1.3.	Contenido de aire .....	58
	4.1.4.	Velocidad de endurecimiento.....	58
	4.2.	Propiedades en estado endurecido .....	59
	4.2.1.	Adherencia.....	59
	4.2.2.	Retracción.....	59
	4.2.3.	Resistencia .....	60
	4.2.3.1.	Resistencia a compresión.....	60
	4.2.3.2.	Resistencia a tensión.....	60
	4.2.3.3.	Resistencia a corte .....	61

4.2.4.	Durabilidad .....	62
4.2.5.	Eflorescencia .....	62
4.2.6.	Apariencia .....	62
4.2.7.	Permeabilidad .....	62
4.3.	Normas que deben cumplir los morteros de revestimiento .....	63
5.	DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	67
5.1.	Obtención de la materia prima .....	67
5.1.1.	Método de trituración de llantas utilizado .....	68
5.1.2.	Procedimiento .....	68
5.2.	Ensayos de laboratorio realizados al polvo de llanta o caucho granulado como agregado fino.....	70
5.2.1.	Análisis granulométrico por tamices de los agregados fino y grueso según NTG 41010 h1 (ASTM C136-14).....	70
5.2.1.1.	Análisis granulométrico realizado a la arena de río.....	70
5.2.1.2.	Análisis granulométrico realizado al caucho granulado.....	71
5.3.	Ensayos realizados al mortero de revestimiento con adición de polvo de neumático o caucho granulado.....	73
5.3.1.	Selección de proporciones para la elaboración de morteros de revestimiento con polvo de neumático.....	73
5.3.1.1.	Primera fase de selección de proporciones.....	73
5.3.1.2.	Segunda fase de selección de proporciones.....	73

5.3.1.3.	Tercera fase de selección de proporciones.....	75
5.3.2.	Elaboración de morteros de revestimiento .....	76
5.3.2.1.	Procedimiento.....	76
5.3.3.	Resistencia a la compresión en morteros de revestimiento con polvo de neumáticos, usando testigos cúbicos de 50 mm (2 pulg) de lado .....	78
5.3.3.1.	Datos obtenidos del ensayo a compresión .....	79
5.3.3.2.	Gráfica esfuerzo vs deformación para los elementos sometidos a compresión .....	91
5.3.4.	Resistencia al corte en morteros de revestimiento con polvo de neumáticos, usando testigos cúbicos de 50 mm (2 pulg) de lado.....	103
5.3.4.1.	Datos obtenidos en el ensayo a corte.....	104
5.3.4.2.	Gráfica esfuerzo cortante vs deformación .....	108
5.3.5.	Resistencia a la tracción o adherencia en morteros con caucho granulado medio y grueso.....	111
5.3.5.1.	Datos obtenidos en ensayo de adherencia.....	116
5.3.5.2.	Factor de relación entre el área de la muestra del mortero y el área de la platina. ....	120
5.3.5.3.	Determinación del esfuerzo de adherencia.....	121

5.3.6.	Ensayo de impermeabilización en morteros, según método S.R.....	123
5.3.6.1.	Determinación de la evapotranspiración potencial diaria (mm/día).....	123
5.3.6.2.	Determinación del porcentaje de evapotranspiración real con base en la envolvente térmica .....	124
5.3.6.3.	Determinación de la permeabilidad de los morteros.....	125
5.3.6.4.	Ensayo de impermeabilización en morteros fase 1 .....	126
5.3.6.5.	Ensayo de impermeabilización en morteros fase 2 .....	129
5.3.6.6.	Ensayo de impermeabilización en morteros fase 3 .....	132
5.3.6.7.	Ensayo de impermeabilización en morteros fase 4 .....	135
5.3.6.7.1.	Determinación del pH del agua contenida en el tanque de ensayo....	141
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	143
6.1.	Determinación de la granulometría a utilizar en el agregado fino y el caucho granulado. ....	143
6.2.	Ensayo de morteros sometidos a compresión .....	145
6.2.1.	Determinación de $f_m$ y zona de Resiliencia para los morteros sometidos a compresión.....	145

6.2.2.	f'm vs edades en morteros sometidos a compresión y determinación de módulo de Poisson.....	160
6.2.3.	Determinación del valor phi $\Phi$ para morteros a compresión .....	168
6.2.4.	Relación del peso unitario con el esfuerzo a compresión y sus edades correspondientes.....	169
6.3.	Ensayo de morteros a corte.....	175
6.3.1.	Determinación de f't para morteros 5 y 6 sometidos a corte .....	176
6.3.2.	Determinación de F't en morteros a los 28 días ...	179
6.3.3.	Obtención de phi $\Phi$ para morteros sometidos a fuerzas cortantes .....	182
6.4.	Ensayo de adherencia .....	184
6.4.1.	Comparación de esfuerzo de adherencia entre morteros 5 y 6 lanzados y untados .....	184
6.4.2.	Tipos de fallas presentadas durante el ensayo de adherencia.....	185
6.4.3.	Círculos de Mohr para determinar el esfuerzo de diseño de adherencia .....	189
6.4.4.	Determinación de la adherencia para morteros 5 y 6 a los 7, 14 y 28 días.....	192
6.5.	Ensayo de impermeabilización: .....	195
6.5.1.	Comparación del porcentaje de absorción y permeabilidad en ensayo de impermeabilización de morteros a menor escala. ....	195
6.5.2.	Comparación del porcentaje de absorción y permeabilidad para mortero 6 – ensayo tubo vs tanque.....	197

6.6.	Comparación de los esfuerzos a compresión, corte y adherencia en morteros 5 y 6.....	198
6.6.1.	Comparación entre morteros 5 y 6.....	199
6.6.2.	Comparación entre esfuerzos para mortero 5 y 6 .....	200
	CONCLUSIONES.....	203
	RECOMENDACIONES .....	207
	REFERENCIAS.....	209
	APÉNDICES.....	217
	ANEXOS.....	225

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Manchado de membranas en 3 sitios cercanos a la quema y la zona de referencia .....	2
2.	El neumático de Dunlop .....	4
3.	Evolución del neumático.....	5
4.	Tipos de humedad presentes en la construcción .....	8
5.	Jabón de coche, maya o negro .....	14
6.	Impermeabilización de losa con chapopote.....	15
7.	Estructura del neumático.....	25
8.	Neumático reencauchado.....	28
9.	Estructura de un neumático convencional.....	29
10.	Gráfica composición de neumático convencional vs neumático de camión.....	31
11.	Fórmula estructural del caucho natural .....	33
12.	Fórmula estructural del caucho sintético SBR y BR .....	34
13.	Gráfica de porcentaje de ventas de neumáticos a Guatemala por país, del año 2014 a 2021.....	37
14.	Esquema de clasificación de reciclaje de neumáticos.....	42
15.	“EcoMuro” realizado con 40,000 neumáticos desechados .....	47
16.	Ensayo de análisis granulométrico para agregado fino .....	55
17.	Esquema del ensayo de resistencia a corte en morteros de la Unidad de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería .....	61
18.	Planta trituradora “Hule de Guate, S.A” .....	67
19.	Máquina trituradora para obtener trozos de caucho.....	69

20.	Molinos granuladores para obtener el caucho granulado de 2 a 3 mm ..	69
21.	Curva granulométrica de la arena de río en análisis para morteros con caucho granulado .....	71
22.	Curva granulométrica del caucho granulado en análisis para agregar en los morteros .....	72
23.	Caucho fino, medio y grueso .....	75
24.	Recipiente de volumen conocido .....	76
25.	Mezcla de los materiales secos (caucho, cemento y arena).....	77
26.	Mezcla de mortero de revestimiento .....	78
27.	Elaboración de los cubos de morteros con polvo de neumático .....	79
28.	Sistema de ensayo a compresión empleado en la Sección de Estructuras, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.....	80
29.	Gráfica esfuerzo vs deformación para mortero 1 a compresión - 7 días .....	91
30.	Gráfica esfuerzo vs deformación para mortero 1 a compresión - 14 días .....	92
31.	Gráfica esfuerzo vs deformación para mortero 1 a compresión - 28 días .....	92
32.	Gráfica esfuerzo vs deformación para mortero 2 a compresión - 7 días .....	93
33.	Gráfica esfuerzo vs deformación para mortero 2 a compresión - 14 días .....	93
34.	Gráfica esfuerzo vs deformación para mortero 2 a compresión - 28 días .....	94
35.	Gráfica esfuerzo vs deformación para mortero 3 a compresión - 7 días .....	94
36.	Gráfica esfuerzo vs deformación para mortero 3 a compresión - 14 días .....	95

37.	Gráfica esfuerzo vs deformación para mortero 3 a compresión - 28 días.....	95
38.	Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 4 a compresión - 7 días .....	96
39.	Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 4 a compresión - 14 días .....	96
40.	Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 4 a compresión - 28 días .....	97
41.	Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 5 a compresión - 7 días .....	97
42.	Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 5 a compresión - 14 días .....	98
43.	Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 5 a compresión - 28 días .....	98
44.	Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 6 a compresión - 7 días .....	99
45.	Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 6 a compresión - 14 días .....	99
46.	Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 6 a compresión - 28 días ....	100
47.	Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 7 a compresión - 7 días .....	100
48.	Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 7 a compresión - 14 días ....	101
49.	Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 7 a compresión - 28 días ....	101
50.	Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 8 a compresión - 7 días .....	102
51.	Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 8 a compresión - 14 días ....	102
52.	Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 8 a compresión - 28 días ....	103
53.	Sistema de ensayo a corte empleado en la Sección de Estructuras, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC .....	104
54.	Gráfica esfuerzo cortante vs deformación mortero 5 - 7 días.....	108
55.	Gráfica esfuerzo cortante vs deformación mortero 5 - 14 días.....	109
56.	Gráfica esfuerzo cortante vs deformación mortero 5 - 21 días.....	109
57.	Gráfica esfuerzo cortante vs deformación mortero 6 - 7 dias.....	110
58.	Gráfica esfuerzo cortante vs deformación mortero 6 - 14 días.....	110
59.	Gráfica esfuerzo cortante vs deformación mortero 6 - 21 días.....	111
60.	Marco de metal, polea y malla de protección .....	112
61.	Dinamómetro, mica y cable de acero .....	112
62.	Contrapeso de concreto y mica.....	113
63.	Placas metálicas con argolla .....	113

64.	Limpieza y humectación de la superficie.....	114
65.	Preparación de los morteros 5 y 6 .....	114
66.	Aplicación de mortero lanzada y untada .....	115
67.	Identificación de las muestras de ensayo .....	115
68.	Falla tipo A en muestra L6-2.....	117
69.	Falla tipo B en muestra U6-1 .....	118
70.	Falla tipo C en muestra U5-1 .....	118
71.	Falla tipo D en muestra L5-2.....	119
72.	Falla tipo E en muestra U5-2 .....	119
73.	Gráfica esfuerzo de adherencia en morteros 5 y 6 .....	122
74.	Elaboración de los blocks revestidos de mortero .....	126
75.	Ensayo de impermeabilización en blocks revestidos de morteros 1, 2, 3 y 4 .....	127
76.	Gráfica porcentaje de absorción y permeabilidad para morteros 1, 2, 3 y 4 .....	129
77.	Prismas para ensayo de impermeabilización en morteros 5, 6, 7 y 8 ...	130
78.	Porcentaje de absorción y permeabilidad en morteros 5, 6, 7 y 8 .....	131
79.	Agrietamiento en el revestimiento y fugas en la unión de los prismas de ensayo utilizados en la fase 2 .....	132
80.	Tubos de ensayo de impermeabilización fase 3 .....	133
81.	Gráfica porcentaje de absorción y permeabilidad en morteros 5, 6, 7 y 8 fase 3 .....	135
82.	Elaboración del tanque revestido de mortero 6 para ensayo de impermeabilización .....	136
83.	Ensayo de impermeabilización fase 4.....	136
84.	Gráfica porcentaje de absorción y permeabilidad en tanque de ensayo de impermeabilización, fase 4.....	140
85.	Ensayo para determinar el pH de la muestra de agua para el ensayo 4 de impermeabilización, fase 4.....	141

86.	Determinación del pH de la muestra de agua para el ensayo 4 de impermeabilización, fase 4.....	142
87.	Límite de la granulometría del agregado fino para utilizar en los morteros de ensayo.....	143
88.	Determinación de las 3 granulometrías presentadas en el caucho granulado .....	145
89.	f'm y zona de Resiliencia para mortero 1 - 7 días .....	146
90.	f'm y zona de Resiliencia para mortero 1 – 14 días.....	147
91.	f'm y zona de Resiliencia para mortero 1 – 28 días.....	147
92.	f'm y zona de Resiliencia para mortero 2 – 7 días.....	148
93.	f'm y zona de Resiliencia para mortero 2 – 14 días.....	148
94.	f'm y zona de Resiliencia para mortero 2 – 28 días.....	149
95.	f'm y zona de Resiliencia para mortero 3 – 7 días.....	149
96.	f'm y zona de Resiliencia para mortero 3 – 14 días.....	150
97.	f'm y zona de Resiliencia para mortero 3 – 28 días.....	150
98.	f'm y zona de Resiliencia para mortero 4 – 7 días.....	151
99.	f'm y zona de Resiliencia para mortero 4 – 14 días.....	152
100.	f'm y zona de Resiliencia para mortero 4 – 28 días.....	152
101.	f'm y zona de Resiliencia para mortero 5 – 7 días.....	153
102.	f'm y zona de Resiliencia para mortero 5 – 14 días.....	153
103.	f'm y zona de Resiliencia para mortero 5 – 28 días.....	154
104.	f'm y zona de Resiliencia para mortero 6 – 7 días.....	154
105.	f'm y zona de Resiliencia para mortero 6 – 14 días.....	155
106.	f'm y zona de Resiliencia para mortero 6 – 28 días.....	155
107.	f'm y zona de Resiliencia para mortero 7 – 7 días.....	156
108.	f'm y zona de Resiliencia para mortero 7 – 14 días.....	157
109.	f'm y zona de Resiliencia para mortero 7 – 28 días.....	157
110.	f'm y zona de Resiliencia para mortero 8 – 7 días.....	158
111.	f'm y zona de Resiliencia para mortero 8 – 14 días.....	159

112.	f'm y zona de Resiliencia para mortero 8 – 28 días .....	159
113.	f'm vs edades y módulo de Poisson para mortero 1 .....	160
114.	f'm vs edades y módulo de Poisson para mortero 2 .....	161
115.	f'm vs edades y módulo de Poisson para mortero 3 .....	161
116.	f'm vs edades y módulo de Poisson para mortero 4 .....	162
117.	f'm vs edades y módulo de Poisson para mortero 5 .....	162
118.	f'm vs edades y módulo de Poisson para mortero 6 .....	163
119.	f'm vs edades y módulo de Poisson para mortero 7 .....	163
120.	f'm vs edades y módulo de Poisson para mortero 8 .....	164
121.	Gráfica comparativa de f'm vs edades entre morteros sometidos a compresión .....	165
122.	Comparación de F'm entre morteros con caucho granulado .....	166
123.	Comparación del módulo de Poisson entre morteros sometidos a compresión .....	167
124.	Valor $\Phi$ para morteros con caucho granulado sometidos a carga axial.....	169
125.	f'm vs P.U vs edad para mortero 1.....	171
126.	f'm vs P.U vs edad para mortero 2.....	171
127.	f'm vs P.U vs edad para mortero 3.....	172
128.	f'm vs P.U vs edad para mortero 4.....	172
129.	f'm vs P.U vs edad para mortero 5.....	173
130.	f'm vs P.U vs edad para mortero 6.....	173
131.	f'm vs P.U vs edad para mortero 7.....	174
132.	f'm vs P.U vs edad para mortero 8.....	174
133.	f't para mortero 5 – 7 días .....	176
134.	f't para mortero 5 – 14 días.....	177
135.	f't para mortero 5 – 21 días .....	177
136.	f't para mortero 6 – 7 días .....	178
137.	f't para mortero 6 – 14 días.....	178

138.	f't para mortero 6 – 21 días .....	179
139.	Comparación de f't vs edades entre morteros 5 y 6 .....	182
140.	Phi vs edad para morteros sometidos a esfuerzos cortantes .....	183
141.	Gráfica comparativa de resultados de adherencia entre morteros 5 y 6 .....	185
142.	Tipos de fallas presentadas durante el ensayo de adherencia.....	186
143.	Fallas presentadas en mortero U5 .....	187
144.	Fallas presentadas en mortero L5.....	187
145.	Fallas presentadas en mortero U6 .....	188
146.	Fallas presentadas en mortero L6.....	188
147.	Envolvente de Mohr para Mortero U5 .....	190
148.	Envolvente de Mohr para Mortero L5 .....	190
149.	Envolvente de Mohr para mortero U6 .....	191
150.	Envolvente de Mohr para mortero L6 .....	191
151.	Gráfica adherencia vs edad mortero U5.....	193
152.	Gráfica adherencia vs edad mortero L5 .....	193
153.	Gráfica adherencia vs edad mortero U6.....	194
154.	Gráfica adherencia vs edad mortero L6 .....	194
155.	Gráfica en porcentaje de absorción vs permeabilidad para morteros con caucho granulado .....	196
156.	Gráfica comparativa en porcentaje de absorción y permeabilidad mortero 6 fase 3 y 4 .....	198
157.	Gráfica comparativa de F'm, F't y Adh para morteros 5 y 6 .....	200
158.	Esfuerzos F'm – F't – Adh para mortero 5.....	201
159.	Esfuerzos F'm – F't – Adh para mortero 6.....	202

## TABLAS

I.	Tipos de mortero de acuerdo con los materiales que lo componen .....	12
----	--	----

II.	Clasificación de morteros de acuerdo con su función estructural .....	13
III.	Comparación de la resistencia a la compresión y adherencia a los 28 días de un mortero impermeable guatemalteco, español y costarricense .....	20
IV.	Comparación entre neumáticos de invierno y de verano .....	26
V.	Ventajas y desventajas de los neumáticos según su perfil .....	27
VI.	Componentes de neumático convencional y neumático de camión .....	30
VII.	Porcentaje de importaciones por país desde el año 2014 a 2021 .....	36
VIII.	Límites granulométricos para agregado fino según NTG 41007 (ASTM C33/C33-08) .....	54
IX.	Fluidez recomendada del mortero .....	58
X.	Requisitos y especificaciones de los morteros de revestimiento .....	63
XI.	Requisitos para la especificación por proporciones .....	64
XII.	Requisitos para la especificación por propiedades .....	65
XIII.	Resultados análisis granulométrico arena de río .....	70
XIV.	Resultados análisis granulométrico al caucho granulado .....	72
XV.	Porcentajes de caucho grueso, medio y fino .....	74
XVI.	Proporciones utilizadas para ensayos de mortero de revestimiento con polvo de neumático .....	75
XVII.	Especificaciones del cilindro hidráulico utilizado en el ensayo a compresión .....	79
XVIII.	Identificación de los cubos de ensayo a los 7, 14 y 28 días .....	82
XIX.	Datos esfuerzo – deformación para elementos de ensayo a compresión a los 7 días .....	83
XX.	Datos esfuerzo – deformación para elementos de ensayo a compresión a los 14 días .....	86
XXI.	Datos esfuerzo – deformación para elementos de ensayo a compresión a los 28 días .....	88

XXII.	Identificación de los cubos de ensayo para el mortero 5 a los 7, 14 y 21 días .....	106
XXIII.	Identificación de los cubos de ensayo para el mortero 6 a los 7, 14 y 28 días .....	107
XXIV.	Datos obtenidos durante el ensayo de adherencia .....	116
XXV.	Descripción de los tipos de fallas .....	117
XXVI.	Factor de relación área mortero-platina .....	120
XXVII.	Determinación del esfuerzo de adherencia en mortero 5.....	121
XXVIII.	Determinación del esfuerzo de adherencia en mortero 6.....	121
XXIX.	Datos obtenidos para la resistencia térmica de los materiales.....	125
XXX.	Datos obtenidos en ensayo de impermeabilización fase 1 para determinar evapotranspiración real.....	127
XXXI.	Duración del ensayo de impermeabilización fase 1 .....	128
XXXII.	Dimensiones de las muestras de ensayo fase 1 .....	128
XXXIII.	Porcentaje de absorción y permeabilidad en morteros 1, 2, 3 y 4.....	128
XXXIV.	Datos obtenidos en ensayo de impermeabilización fase 2 para determinar la evapotranspiración.....	131
XXXV.	Duración del ensayo de impermeabilización fase 2 .....	131
XXXVI.	Porcentaje de absorción y permeabilidad en morteros 5, 6, 7 y 8.....	131
XXXVII.	Datos obtenidos en ensayo de impermeabilización fase 3 para determinar la evapotranspiración .....	133
XXXVIII.	Duración del ensayo de impermeabilización fase 3 .....	134
XXXIX.	Dimensiones de las muestras de ensayo fase 3 .....	134
XL.	Porcentaje de absorción y permeabilidad en morteros 5, 6, 7 y 8 fase 3 .....	134
XLI.	Duración de los ensayos de impermeabilización en la fase 4.....	137
XLII.	Temperaturas promedio durante los ensayos de impermeabilización fase 4 .....	137

XLIII.	Temperaturas promedio durante el ensayo 4 de la fase 4 de impermeabilización .....	138
XLIV.	Determinación de EtR y pérdida por evapotranspiración para el ensayo 4 de impermeabilización fase 4 .....	138
XLV.	Determinación de EtR y pérdida por evapotranspiración para los ensayos 1, 2, 3 y 5 de impermeabilización fase 4 .....	139
XLVI.	Dimensiones del tanque de ensayo y volumen de agua (cm <sup>3</sup> ) .....	139
XLVII.	Porcentaje de absorción y permeabilidad del mortero 6, fase 4 .....	140
XLVIII.	Comparación de f'm vs edades entre morteros sometidos a compresión .....	164
XLIX.	Valor F'm para morteros con caucho granulado .....	165
L.	Módulo de Poisson "ν" según método de tangente en morteros a compresión .....	166
LI.	Factor de reducción Φ para morteros sometidos a compresión .....	168
LII.	Peso unitario de los elementos .....	170
LIII.	Observaciones de las gráficas f'm vs P.U vs edad .....	175
LIV.	Determinación del porcentaje para 21 días del ensayo a corte en morteros con base en la resistencia a compresión para mortero 5 por medio de interpolación lineal .....	180
LV.	Valores f't para mortero 5 .....	180
LVI.	Determinación del porcentaje para 21 días del ensayo a corte en morteros con base en la resistencia a compresión para mortero 6 por medio de interpolación lineal .....	181
LVII.	Valores f't para mortero 6 .....	181
LVIII.	Valor phi para morteros con caucho granulado sometidos a fuerzas cortantes .....	183
LIX.	Comparación de resultados de adherencia entre morteros 5 y 6 (aplicación lanzada y untada) .....	184
LX.	Esfuerzo de diseño de adherencia para morteros 5 y 6.....	189

LXI.	Adherencia para morteros a 7, 14 y 28 días .....	192
LXII.	Comparación del porcentaje de absorción y permeabilidad para los morteros ensayados a impermeabilización a menor escala .....	195
LXIII.	Comparación absorción y permeabilidad en mortero 6 – ensayo tubo vs tanque.....	197
LXIV.	Comparación de esfuerzos a compresión, corte y adherencia entre los morteros 5 y 6 .....	199



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>A<sub>cil</sub></b>	Área del cilindro de ensayo en pulgadas cuadradas
<b>cm</b>	Centímetro
<b>cm<sup>2</sup></b>	Centímetro cuadrado
<b>cm<sup>3</sup></b>	Centímetro cúbico
<b>λ</b>	Coefficiente de conductividad térmica del material
<b>pH</b>	Coefficiente que indica el grado de acidez o alcalinidad del agua.
<b>ε</b>	Deformación unitaria en cm/cm
<b>F'm</b>	Esfuerzo de diseño de compresión, en kg/cm <sup>2</sup>
<b>F't</b>	Esfuerzo de diseño de corte, en kg/cm <sup>2</sup>
<b>ET<sub>o</sub></b>	Evapotranspiración potencial diaria en mm/día
<b>ET<sub>R</sub></b>	Evapotranspiración real en mm/día
<b>f<sub>n</sub></b>	Factor de relación entre el área de la muestra del mortero y el área de la platina.
<b>F<sub>cil</sub></b>	Fuerza del cilindro de ensayo en PSI
<b>°</b>	Grados
<b>°C</b>	Grados centígrados
<b>g</b>	Gramos
<b>K</b>	Kelvin
<b>Kg</b>	Kilogramo
<b>Kg/cm<sup>2</sup></b>	Kilogramo sobre centímetro cuadrado que presenta una fuerza sobre área.
<b>Kg/m<sup>3</sup></b>	Kilogramo sobre metro cúbico que presenta densidad

<b>Km</b>	Kilómetro
<b>lb</b>	Libras
<b>Psi</b>	Libras por pulgada cuadrada que presenta la presión
<b>L</b>	Litro
<b>X<sub>n</sub></b>	Longitud obtenida en la carga aplicada en cm
<b>±</b>	Más menos para representar incerteza
<b>m</b>	Metro
<b>µm</b>	Micrómetro
<b>ml</b>	Mililitro
<b>mm</b>	Milímetro
<b>min</b>	Minutos
<b>N/mm<sup>2</sup></b>	Newton sobre milímetro cuadrado que presenta una fuerza sobre área.
<b>Pie<sup>3</sup></b>	Pie cúbico
<b>%</b>	Porcentaje
<b>“</b>	Pulgada
<b>in<sup>2</sup></b>	Pulgada cuadrada
<b>R<sub>s</sub></b>	Radiación solar incidente
<b>f'm</b>	Resistencia a compresión del mortero para una deformación unitaria de 0.02, en kg/cm <sup>2</sup> .
<b>f't</b>	Resistencia a corte del mortero para una deformación unitaria de 0.02, en kg/cm <sup>2</sup> .
<b>R<sub>adh</sub></b>	Resistencia de adherencia del mortero en kg/cm <sup>2</sup>
<b>Adh</b>	Resistencia de diseño de adherencia, en kg/cm <sup>2</sup>
<b>A<sub>tr</sub></b>	Sección transversal del elemento en centímetros cuadrados.
<b>∑</b>	Sumatoria
<b>T<sub>med</sub></b>	Temperatura media en °C
<b>W</b>	Watt

## GLOSARIO

<b>Absorción</b>	Incremento en masa del agregado debido a la penetración de agua en los poros de las partículas.
<b>ACI</b>	<i>American Concrete Institute.</i>
<b>ACI 318-14</b>	Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural y comentarios complementarios por <i>American Concrete Institute.</i>
<b>Adherencia</b>	Resistencia que se opone a la separación en la superficie de contacto de dos materiales.
<b>Aglomerante</b>	Material que al hidratarse tiene la propiedad de unir materiales entre sí mediante un proceso de fraguado.
<b>ASTM</b>	<i>American Society for Testing and Materials.</i>
<b>Block</b>	Mampuesto prefabricado de cemento, arena y agregados, elaborados en diferentes resistencias.
<b>Cemento</b>	Polvo fino y suave que se utiliza como conglomerante debido a que se endurece después de estar en contacto con el agua.
<b>CII</b>	Centro de Investigaciones de Ingeniería.

<b>COGUANOR</b>	Comisión Guatemalteca de Normas.
<b>Cohesión</b>	Resistencia a la separación de los átomos o moléculas de un material.
<b>CONADES</b>	Comisión Nacional de Desechos Sólidos.
<b>Deformación</b>	Cambio de forma lineal de un elemento debido a una fuerza externa que actúa sobre este.
<b>Elastómero</b>	Compuesto que está conformado por extensas cadenas de monómeros, lo cual le permite un comportamiento elástico.
<b>Ensayo</b>	Procedimiento al que se somete una muestra para evaluar alguna característica o propiedad.
<b>Esfuerzo</b>	Fuerza por unidad de área.
<b>Fraguado</b>	Proceso de endurecimiento y pérdida de plasticidad del mortero de cemento.
<b>ICCG</b>	Instituto del Cemento y del Concreto de Guatemala.
<b>Mampostería</b>	Sistema constructivo formado por materiales simplemente acomodados.
<b>Moho</b>	Hongo microscópico que se encuentra al aire libre y crece en lugares con mucha humedad que puede

provocar enfermedades a las personas que estén en contacto con él.

<b>Mortero</b>	Es una mezcla de cemento, arena y aditivos para pegar, revestir y emparejar elementos de construcción.
<b>NTG</b>	Norma Técnica Guatemalteca.
<b>Permeabilidad</b>	Capacidad que tiene un material para permitir el paso de un fluido sin alterar su estructura interna.
<b>Tamiz</b>	Método físico para separar partículas en diferentes tamaños.
<b>Yeso</b>	Mineral compuesto por sulfato de calcio hidratado y a la vez una roca sedimentaria de origen químico que se ha utilizado desde tiempos antiguos en la construcción.
<b>Zona elástica</b>	Zona en la curva esfuerzo vs deformación donde el elemento no tiene deformaciones permanentes y puede recuperar su zona inicial.
<b>Zona plástica</b>	Zona en la curva esfuerzo vs deformación donde el elemento tiene deformaciones permanentes y no recupera su forma inicial.



## RESUMEN

La humedad siempre ha sido uno de los principales agentes destructivos en las construcciones, casi todas las obras civiles se encuentran expuestas a la humedad, causada por condiciones ambientales, la propia humedad del suelo, y obras que tienen como propósito el almacenamiento de agua. Este factor provoca degradación en los materiales, corrosión en los elementos metálicos, enmohecimiento, entre otros. Se realizó una investigación del impacto que provoca una mala impermeabilización y cómo afecta la vida útil del material, sus propiedades y características físicas, químicas, mecánicas; y las enfermedades que produce en las personas.

Debido a que la contaminación ambiental es inminente, se consideró la implementación de polvo de caucho o caucho granulado, extraído de neumáticos desechados, en morteros de revestimiento para mampostería. Se evaluó si la selección de un material altamente utilizado en la actualidad, que tiene un proceso de reciclaje bastante complejo, al ser utilizado como aditivo en morteros incrementa la impermeabilidad de estos, sin afectar sus propiedades físico - químicas y mecánicas. Para ello, se sometieron morteros con diferentes porcentajes de caucho granulado a los ensayos especificados en las normas nacionales y se determinó qué proporción presenta los mejores resultados de resistencia a la compresión, corte, adherencia y una baja permeabilidad.

Se evaluó la granulometría del caucho para determinar que los granos medianos comprendidos en el tamiz #16 y #30 proporcionan al mortero de revestimiento, buena resistencia a la compresión, corte y adherencia, y

disminuyen la permeabilidad de este, utilizando la misma proporción de arena y caucho.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Evaluar las características físicas y propiedades mecánicas de morteros de revestimiento con adición de caucho granulado obtenido de neumáticos reciclados.

### **Específicos**

1. Determinar la granulometría del caucho para evaluar el comportamiento de los diferentes tamaños de grano.
2. Definir diferentes proporciones de cemento, arena, caucho y cal para la elaboración de morteros y evaluar el comportamiento de cada uno.
3. Calcular la resistencia a esfuerzos de compresión, corte y adherencia a los diferentes morteros, implementando las normas nacionales.
4. Obtener la permeabilidad de los morteros por medio de la implementación de ensayos en mampostería revestida interiormente con cada proporción de mortero.
5. Comparar las propiedades mecánicas de los morteros de ensayo para definir cuál mortero presenta las mejores condiciones.

6. Analizar si la implementación de caucho en los morteros disminuye la permeabilidad de estos sin perjudicar la salud de las personas que tengan contacto.

## INTRODUCCIÓN

En la construcción, el agua es uno de los principales agentes destructivos debido al rápido daño que genera en el interior de los materiales y en la salud de las personas que se encuentran en contacto. La contaminación ambiental que incrementa día con día afecta la vida útil de los materiales de construcción que se encuentran expuestos. Por ello, es necesario buscar soluciones efectivas que protejan a los materiales de construcción de la humedad y las condiciones ambientales que la provocan.

Con el presente trabajo de graduación se pretende evaluar el comportamiento de los morteros de revestimiento al utilizar como parte del agregado fino, caucho granulado obtenido de neumáticos desechados, con el enfoque principal de aumentar la impermeabilización del mortero sin necesidad de utilizar aditivos que pueden resultar costosos y químicamente perjudiciales.

Esta evaluación se realiza por medio de la implementación de un método de ensayo en elementos de almacenamiento de agua elaborados con mampostería y revestidos interiormente con los morteros en estudio. También se evalúa la granulometría del caucho para poder definir qué tamaño de grano presenta los mejores resultados en los morteros a evaluar, y, se pretende obtener la resistencia a cargas axiales, cortantes y la resistencia de adherencia en los morteros, por medio de los ensayos especificados en las Normas Técnicas Guatemaltecas NTG, y cómo varían los resultados respecto a la granulometría del caucho.

La finalidad de este trabajo es proponer la implementación del caucho granulado en la elaboración de morteros de revestimiento para disminuir la permeabilidad en estos y proteger la integridad de los materiales de construcción.

# **1. ANTECEDENTES**

## **1.1. Impacto ambiental por neumáticos desechados**

Cuando se habla de contaminación por neumáticos se refiere al impacto ambiental que estos provocan al cumplir su vida útil, pues debido a sus dimensiones y su composición, el proceso en el manejo de desechos de la disposición final se complica, dejando como alternativas la combustión de estos o su almacenamiento al aire libre, ambos procesos totalmente perjudiciales tanto para el planeta como para los seres vivos, pues “al quemar un neumático con insuficiente cantidad de oxígeno atmosférico, se rompe la estructura molecular del caucho desprendiendo partículas de carbono muy finas, con un diámetro aerodinámico inferior a 10 micrones” (Lujan, 2001).

### **1.1.1. Desecho de neumáticos en Guatemala**

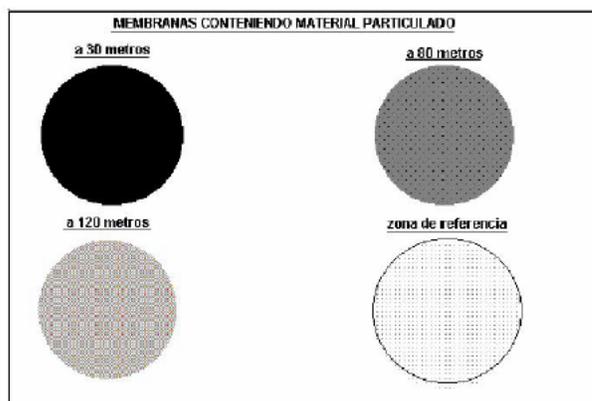
De acuerdo con Proverde “se estima que en Guatemala se generan más de 100,000 toneladas de desechos de llanta anualmente, llantas tipo motocicleta, automóviles, camiones, tractores, etc” (Proverde, 2017 citado por Cruz, 2018, p. 7). Lo que ha provocado una búsqueda de la reutilización de los neumáticos aun habiendo cumplido su vida útil, esto debido a que los componentes de los neumáticos le proporcionan durabilidad. Debido a que están compuestos por hule de alta calidad y materiales textiles que soportan los golpes, el aire y el calor, la extracción de materia prima es una buena alternativa de reutilización. Aun así, mientras sigan aumentando el parque vehicular, el desecho de neumáticos parece interminable.

### 1.1.2. Niveles de contaminación atmosférica debido a la quema de neumáticos al aire libre

En la provincia de Tucumán, República Argentina, debido a la quema masiva de neumáticos en la vía pública, se realizó una investigación sobre los niveles de contaminación atmosférica debido a la presencia de sustancias peligrosas en los alrededores de las fogatas (Luján, 2001).

Al realizar el análisis de los resultados obtenidos, se observó que la concentración de algunos contaminantes superaba en varios centenares de veces la concentración de referencia que se tomó como aire normal, en tanto que se pudo comprobar que el radio de impacto ambiental evidenciable generado por esos episodios abarcaba más de 150 metros cubriendo alrededor de cuatro hectáreas. (Luján, 2001, p. 91)

Figura 1. **Manchado de membranas en 3 sitios cercanos a la quema y la zona de referencia**



Fuente: Lujan (2001). *Contaminación ambiental y posibles daños a la salud causados por la quema de neumáticos en la vía pública*. Consultado el 18 de agosto de 2020. Recuperado de <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/lil-313672>.

### **1.1.3. Daños en la salud debido al desecho y almacenamiento de neumáticos**

El estudio en la provincia argentina sobre la quema de neumáticos consideró que, debido a la alta concentración de hollín, alquitranes y anhídrido sulfuroso, que se encuentran a 30 y a 50 metros de la zona de referencia, una persona no debería permanecer más de una hora expuesta a estos niveles de contaminación, pues eso equivaldría a la contaminación del aire normal de la ciudad correspondiente a 100 días (Luján, 2001).

Los neumáticos, debido a los componentes químicos y sintéticos adheridos que posee, es uno de los desechos más dañinos para la salud de las personas, y debido a su masiva fabricación es un problema ambiental de primer orden en todo el mundo (García y Reyes, 2016).

Por otra parte, el almacenamiento al aire libre de los neumáticos puede llegar a convertirse en criaderos de insectos, roedores y mosquitos, que son la mayor preocupación en Guatemala, debido a la transmisión de enfermedades que estos generan.

## **1.2. Origen de los neumáticos**

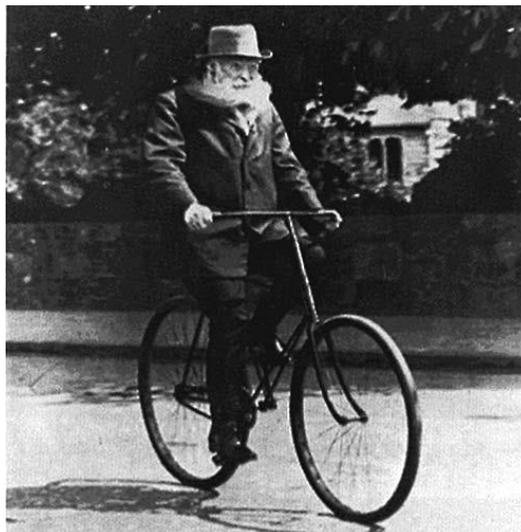
“Aunque el origen de la rueda se remonta en la Antigua Mesopotamia aproximada mente en el año 3500 a.C.” (Ventura, 2017, párr. 2). La idea de los neumáticos aparece por primera vez en el siglo XIX.

### 1.2.1. Evolución de los neumáticos en el siglo XIX

La concepción de la idea sobre los neumáticos se remonta en el siglo XIX, en el año 1888 John Boyd Dunlop propuso montar unos tubos de caucho inflados sobre las ruedas de madera de un triciclo para cubrirlos con lona posteriormente, esto sería el modelo primitivo de neumáticos con cámara de aire (La Casa del Neumático, 2018).

Los hermanos Michelin patentan, 3 años más tarde, neumáticos desmontables sobre la base de una bicicleta, se esperaba demostrar su eficacia en una carrera en coche entre Paris y Clermont-Ferrand, y, aunque no ganaron la carrera, los neumáticos generaron tal expectación que en poco tiempo se convirtieron en líderes en el continente europeo.

Figura 2. El neumático de Dunlop



Fuente: Santafixie Stories (2017) *¿Sabías quién inventó las ruedas de bici con aire?* Consultado el 20 de marzo de 2021. Recuperado de <https://www.santafixie.com/blog/sabias-quien-invento-las-ruedas-bici-aire/> Consulta: marzo de 2021.

### 1.2.2. Evolución de los neumáticos durante el siglo XX

Goodyear fue la primera empresa que patentó los primeros neumáticos sin cámara en 1903. En 1916 Goodyear se convierte en la empresa de neumáticos más grande del mundo, pues unos años antes Goodyear y Firestone desarrollaron unos neumáticos con talón con costados rectos, que fue adoptado por la mayoría de los fabricantes de Estados Unidos y Asia.

Se puede decir que el siglo XX fue el año más importante respecto a la evolución de los neumáticos. Para mediados del siglo Michelin presenta neumáticos con capas radiales, Bridgestone crea las primeras ruedas de estructura radial en 1964 y para la década de los 80, Bridgestone presenta los primeros neumáticos antipinchazos.

La invención de los neumáticos se les acredita a varios, se puede decir que cada uno de los inventores y empresarios juega un papel sumamente importante en la historia del neumático, pues hoy en día mediante avances en la fabricación, los neumáticos se han vuelto más seguros y eficaces sin descuidar el objetivo general del neumático, el confort en el manejo del vehículo.

Figura 3. Evolución del neumático



Fuente: Aranguren (2017). *El neumático y su interesante historia*. Consultado el 20 de marzo de 2021. Recuperado de <https://www.motoryracing.com/coches/noticias/el-neumatico-y-su-interesante-historia/>.

### **1.3. El agua como agente destructivo en la construcción**

En la construcción, el agua es uno de los principales agentes destructivos, debido a que la humedad en las obras civiles provoca degradaciones, corrosión en elementos metálicos, enmohecimiento, entre otros. Por ejemplo, los techos y paredes de las edificaciones al ser afectados por la humedad pueden generar agentes que perjudiquen la salud del ser humano, como el moho, y las obras civiles destinadas para almacenar agua, pueden presentar filtraciones e infiltraciones debido al desgaste de sus paredes. Por ello la impermeabilización es necesaria en toda obra de concreto o mampostería reforzada para proteger sus características físicas, químicas y mecánicas.

#### **1.3.1. El biodeterioro de los materiales de construcción causado por la humedad**

El biodeterioro se define como “el cambio no deseado en las propiedades de un material ocasionado por la actividad vital de organismo y/o microorganismos” (Londoño, Vela y Avendaño, 2007, p. 344). Este deterioro se puede presentar en los materiales de construcción debido a la presencia de humedad, temperaturas extremas, luz, el ph, entre otros, produciendo así daños físicos en el material.

En las construcciones, la exposición a la humedad se hace presente en los elementos que están en contacto con el suelo, como las cimentaciones, y en los techos y fachadas debido a la lluvia. Si la presencia de humedad en los materiales no se controla de manera adecuada, produce sustrato inorgánico que al tener contacto con sustratos orgánicos generan microsistemas de organismos autótrofos y heterótrofos que generan daños en las edificaciones que varían desde pequeñas manchas hasta desprendimiento del material y pérdida de

capacidad de carga en los elementos estructurales, esto debido a que el biodeterioro de los materiales resulta del secuestro de calcio y otros iones que expone al ataque ambiental al material.

### **1.3.2. Tipos de humedad**

Los materiales de construcción pueden estar expuestos a la humedad del suelo, humedad de la lluvia, deshielo o filtraciones debido a una tubería rota, de manera simplificada, se tienen tres tipos de humedad que afectan los materiales de construcción: La humedad por condensación, humedad por capilaridad y humedad por filtración (Maldonado y Campaña, 2020).

#### **1.3.2.1. Humedad por condensación**

La humedad por condensación se origina en el cambio de estado a fase líquida, de parte del vapor de agua contenido en el aire que se encuentra o se genera en los edificios, sobre las superficies interiores de los paramentos (Azqueta, 2002). Este tipo de humedad se da cuando la temperatura dentro de la casa supera a la temperatura exterior, se caracteriza debido a la sudoración de los cristales de puertas y ventanas, también de la aparición de moho sobre paredes y techos.

#### **1.3.2.2. Humedad por capilaridad**

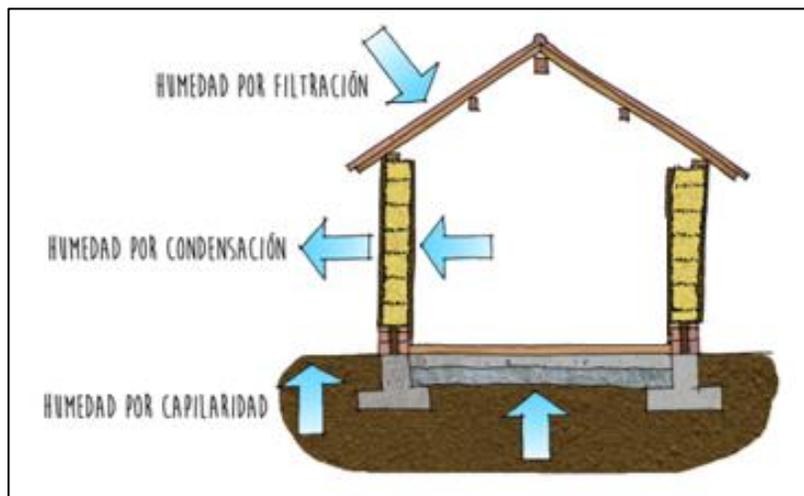
Este tipo de humedad se genera debido a la acumulación de agua en el subsuelo y suele aparecer en épocas de lluvia, razón por la cuál es una de las más difíciles de controlar; los materiales en contacto con el suelo absorben el agua acumulada, debido a la capilaridad existente por los poros en el material. Una vez la cimentación absorbe el agua esta asciende por las columnas y

soleras, dañando gravemente a la edificación. Se caracteriza con manchas de moho que no superan los 2 metros de altura medida desde el contacto con el suelo, por ello suele aparecer únicamente en sótanos y plantas bajas.

### 1.3.2.3. Humedad por filtración

La humedad por filtración ocurre cuando agua penetra desde el exterior apareciendo en paredes o techos debido a una mala impermeabilización o la existencia de zonas sin impermeabilizar en la construcción; también puede ocurrir debido a fallas en las tuberías, esta se identifica y se diferencia de la humedad por condensación debido a que aparece en un punto específico y puede aparecer en cualquier temporada, a diferencia de la humedad por condensación que suele aparecer en épocas frías.

Figura 4. Tipos de humedad presentes en la construcción



Fuente: Fresno (2015). *Gestión del vapor de agua en muros de paja*. Consultado el 20 de marzo de 2021. Recuperado de <https://arquitectutecnica.com/2015/02/23/gestion-del-vapor-de-agua-en-muros-de-paja/>. Consulta: marzo, 2021.

De manera general, los problemas de humedad se identifican de manera sencilla debido a las manchas y decoloraciones, fisuras y grietas, y un olor desagradable, causando problemas en la salud como alergias o problemas respiratorios.

#### **1.4. Origen de los morteros en la construcción**

Los morteros son uno de los elementos constructivos más importantes actualmente, debido a la variedad de aplicaciones que este posee, como revestimiento, mortero de pega, para fachaleta, entre otros; es por eso que el uso de este se remonta desde el Antiguo Testamento.

##### **1.4.1. Primera aparición de los morteros en la Biblia**

Algunos artículos mencionan el origen de los morteros desde los tiempos bíblicos, en Deuteronomio se menciona el mortero de cal. El primer empleo conocido del mortero sólo de cal en la Máscara de Jericó, una calavera cubierta con un emplasto de cal pulido que data del año 7000 a.C. Al realizar excavaciones en Jericó, la más antigua ciudad neolítica, se encontraron casas construidas con ladrillo y suelos hechos de mortero de cal. En el análisis del mortero encontrado se encontraron granos de cereales y otros restos orgánicos.

##### **1.4.2. Morteros egipcios compuestos de yeso**

Los egipcios también implementaron el mortero en la pirámide de Keops alrededor de los 2600 años a.C., estos morteros indicaban un predominio del yeso, pues de acuerdo con Álvarez José, se puede afirmar que “en Egipto existía amplio conocimiento y aplicación del yeso, y fue aquí donde se utilizó el yeso puro como mortero” (Álvarez, J., Pérez, A., García, 1995, p. 54).

### **1.4.3. Morteros grecorromanos**

“Sabemos que los romanos heredaron la tecnología de la construcción griega” (Álvarez, Pérez, García, 1995, p. 54). La aparición del mortero de cal en Grecia se remonta a finales del siglo II, en las construcciones anteriores se utilizaba un mortero simple de tierra y arcilla.

Los romanos, en base a los estudios realizados en el acueducto de Cesárea, aplicaron en algunas construcciones el sistema de aplicación del mortero en multicapa, cada una de ellas tenía un propósito especial: una ligera capa grisácea que contenía cenizas para funcionar como lámina ligante, continuamente se tenía una capa blanca compuesta de mármol para prevenir la contracción, después una capa rojiza puzolánica que aseguraba el endurecimiento en agua, la impermeabilidad y consistencia.

Los romanos implementaron la técnica griega de añadir al mortero diversas sustancias para favorecer sus características, por ejemplo, lava ligera como agregado. Se puede concluir que el mortero romano fue un gran avance y mejora en los procesos de fabricación de morteros.

### **1.4.4. Morteros en la edad media**

Uno de los periodos de los que se tiene poco avance en el uso de los morteros es en el periodo medieval, a causa de las grandes invasiones debido a la caída del imperio romano no hubo gran evolución técnica, por ello los constructores de la edad media continuaron utilizando morteros con las mismas características de los morteros romanos.

#### **1.4.5. Morteros en la actualidad**

El uso del mortero ha avanzado grandemente desde el siglo XVIII. Es a Smeaton, encargado de la construcción del faro de Eddystone, a quién se le acredita el descubrimiento de los ligantes hidráulicos. Es en 1811 que James Frost patenta el cemento hidráulico Portland, el cuál debe su nombre debido a la similitud de su color con la de una roca caliza del mismo nombre. Para 1850 la variedad de cementos producidos aumenta, agregando cal y arcilla en un molino húmedo y calcinando esta mezcla a temperaturas entre 1300 ° y 1500 °C.

La cal se convierte en cal viva debido a las altas temperaturas y se une químicamente con arcilla formando lo que el día de hoy se conoce como Clinker de cemento Portland, después se añadió una pequeña cantidad de yeso para prolongar el tiempo de fraguado. La importancia de este avance en el cemento provoca que en la actualidad se tenga variedad de morteros, tanto en calidad, composición y uso. Empezando desde morteros de cal en los tiempos bíblicos, hasta morteros conformados con cemento, cal, arena, cal, agua, impermeables, anclajes químicos y mecánicos hasta colorantes para poder utilizarlos en fachadas. Estos morteros deben cumplir con la norma ASTM C270.

##### **1.4.5.1. Clasificación de los morteros de acuerdo con su reacción química**

Debido al avance tecnológico, se pueden dividir los morteros en 2 grupos generales: Los aéreos, que reaccionan bajo la influencia del aire fraguando debido a la carbonatación; y los hidráulicos que reaccionan químicamente al tener contacto con el agua (Sanchez, 2001).

### 1.4.5.2. Clasificación de los morteros de acuerdo con sus componentes

De acuerdo con los materiales que compongan el mortero, se pueden encontrar los siguientes tipos:

Tabla I. **Tipos de mortero de acuerdo con los materiales que lo componen**

<b>Mortero</b>	<b>Materiales que lo componen</b>	<b>Propiedades</b>
Mortero con cal	Cal y cemento portland	El cemento contribuye alta resistencia a la compresión y la cal aumenta la remanencia de agua, reduciendo el agrietamiento.
Mortero con cemento	Cemento hidráulico con contenido de aire	Mejora las propiedades de resistencia a la flexión en uniones.
Mortero de cemento de mampostería	Cemento portland, piedra caliza y otros materiales.	Cuenta con oclusión de aire y aditivos que repelen el agua, además, gracias a la piedra caliza, no se requiere adición de cal.

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del libro de Corzo (2014). *Notas mamposterías de una sabandija*. pp. 6-7.

### 1.4.5.3. Clasificación del mortero de acuerdo con su función estructural

Los morteros, cumplen una función estructural en los diferentes elementos diseñados con mampostería:

Tabla II. **Clasificación de morteros de acuerdo con su función estructural**

<b>Mortero</b>	<b>Propiedades estructurales</b>
Mortero de pega	Debe poseer una buena resistencia por los esfuerzos de corte, adherencia y compresión a los que estará influenciado el conjunto de elementos como un sistema.
Mortero de relleno	Su función es llenar los vacíos de los elementos en mampostería debe tener una buena resistencia.
Mortero de recubrimiento	Su función principal no es estructural sino crear una superficie plana y posterior a ello aplicar la pintura en un muro y es importante su alta plasticidad.

Fuente: Corzo (2021). *Actual fundamento, cálculo y diseño de mampostería reforzada*.

## **1.5. Origen de los impermeabilizantes en la construcción**

La impermeabilización se presenta cuando la cantidad de fluido que atraviesa un determinado material es despreciable. (Simba, 2007) Como se sabe, actualmente es de suma importancia la impermeabilización en las construcciones del país, especialmente en la ciudad de Guatemala (debido a la temporada de lluvia que dura aproximadamente 6 meses), pero la realidad es que desde la época prehispánica se ha buscado proteger las construcciones contra la humedad.

### **1.5.1. Impermeabilización prehispánica**

La forma en que los ancestros aplicaron la impermeabilización en la construcción fue por medio de la observación que ellos “se dieron cuenta que el plumaje y la piel de los animales salían secos después de sumergirse en aguas” (El Ferretero, 2018, párr. 1), esto debido a los aceites y grasas naturales que los animales tenían, de aquí surgió una de las primeras técnicas de

impermeabilización, en Guatemala conocido como jabón de coche, jabón maya o negro, es una mezcla entre grasa de cerdo y ceniza, que se utiliza normalmente para limpieza; el uso de este para impermeabilización era sencillo, se diluía en agua y se aplicaba sobre el área a impermeabilizar y debido a los aceites que repelían el agua, funcionó efectivamente, el problema era que con el paso del tiempo y la exposición solar, se degradaba generando grietas, dejando de cumplir su función.

Figura 5. **Jabón de coche, maya o negro**



Fuente: Aroche (2021). *Usos del jabón de coche en Guatemala*. Consultado el 20 de marzo de 2021. Recuperado de <https://aprende.guatemala.com/cultura-guatemalteca/general/usos-jabon-de-coche-guatemala/>.

### **1.5.2. Impermeabilización en el siglo XX**

Durante los años 20, el crecimiento de la industria petrolera trajo consigo el descubrimiento de nuevos materiales petrolizados como petróleo refinado, gasolina refinada, Diesel refinado y aceites de diferentes densidades (Geocities,

2009). Esto ayudó a encontrar otra forma de impermeabilizar, creando una mezcla de petróleo crudo y amoníaco, conocido como chapopote, que se aplicaba a las losas generando una capa de hule que, al enfriarse, se convertía en un hule flexible que funcionaba como membrana protectora e impermeable, sin embargo, con el tiempo los constructores descubrieron que esta lámina después de cierto tiempo se deterioraba, provocando goteras y humedad.

Figura 6. **Impermeabilización de losa con chapopote**



Fuente: Darya (2018). *Impermeabilizar con chapopote*. Consultado el 20 de marzo de 2021.  
Recuperdo de <http://ejemplosmaterialesconstruccion.blogspot.com/2018/01/impermeabilizar-con-chapopote.html>.

### **1.5.3. Impermeabilización en la actualidad**

Los impermeabilizantes, tenían como función principal impedir el paso del agua en las estructuras, pero actualmente se busca que tengan otras

características, por ejemplo, que posean cierta ductilidad, elasticidad y plasticidad, Se busca también que puedan resistir temperaturas altas y que sean resistentes a agentes ambientales destructivos, pues esta sería la forma en que se marcaría la diferencia entre la impermeabilización actual con la impermeabilización del siglo XX. Otra característica que se ha buscado en los métodos de impermeabilización actuales es la optimización en su aplicación y en su precio (Burgos y Bonilla, 1986).

Una buena impermeabilización se consigue considerando que la impermeabilización es un elemento íntimamente unido al conjunto de la obra (Safranez, 1973), es por esto que los métodos de impermeabilización han ido en crecimiento en el último siglo, los cuales se pueden agrupar, de acuerdo a los materiales utilizados, en 2 grupos: impermeabilización rígida e impermeabilización flexible.

#### **1.5.3.1. Impermeabilización rígida**

Se le llama así debido al uso de cemento + aditivos (Simba, 2007). Su aplicación es relativamente sencilla, se busca que la consistencia de este cemento plástico sea como el de una pasta espesa, que se pueda aplicar a espátula; Pero, se debe tener un buen control de calidad del mismo porque debe poseer una buena resistencia a la intemperie debido a que este tipo de impermeabilización suele quedar expuesta a los agentes atmosféricos (Burgos y Bonilla, 1986).

La composición de este conglomerante debe llevar un aditivo que le dará la característica de impermeabilizante, la elección del impermeabilizante dependerá del tipo de material o elemento constructivo que se desee impermeabilizar.

### **1.5.3.2. Impermeabilización flexible**

Este tipo de impermeabilización incluye acrílicos, elastómeros, membranas, e impermeabilizantes asfálticos. También se le puede llamar impermeabilización con materiales prefabricados, pues no es necesario mezclar el impermeabilizante con un conglomerante para que cumpla su función.

### **1.5.3.3. Productos que se emplean en la impermeabilización**

Existen impermeabilizantes que tienen de base una emulsión acrílica flexible que se adhiere con facilidad al concreto, baldosas, fibrocemento, tejas y otros materiales para terrazas.

#### **1.5.3.3.1. Pinturas**

Las pinturas impermeabilizantes a base de látex y resinas son una solución de fácil aplicación que se ofrecen en el mercado, desde pinturas impermeabilizantes, termorefectantes, bloqueadores y repelentes de agua para las diferentes necesidades de protección contra el agua y el calor.

#### **1.5.3.3.2. Bases imprimadoras**

Las bases imprimadoras se pueden dividir como bases solventes que poseen un color negro y funcionan como tapa poros en las superficies por impermeabilizar, deben tener una viscosidad muy baja y secado rápido; y bases en emulsión acuosa que se caracterizan por su color café oscuro y que, a diferencia de las bases solventes, penetra de mejor manera en el concreto húmedo.

#### **1.5.3.3.3. Pastas asfálticas y elastómeros**

“Se emplean en capas continuas para recubrir la superficie a impermeabilizar y para fijar las armaduras o láminas que forman parte de la membrana impermeabilizante” (Safranez, 1973, p. 68).

Los impermeabilizantes elastómeros aparte de ser durables son decorativos, pero debe tenerse control sobre su forma de aplicación para tener buenos resultados. Debido a que el uso de estos aplica, en su mayoría, para asfaltos se debe cuidar que no se aplique directamente sobre asfalto caliente, sino sobre la subbase de grava para formar una buena película elástica que evite la filtración de agua (Burgos y Bonilla, 1986).

#### **1.5.3.3.4. Bentonita**

Es una arcilla coloidal que debido a la finura de sus granos tiene la propiedad de absorber el agua, o sea, al tener contacto con el agua se expande cerrando la mayoría de sus poros impidiendo el paso del agua (Contreras, 2016). Se utiliza en cimentaciones para el sostenimiento de tierras o en perforaciones de pozos.

#### **1.5.3.3.5. Membranas de refuerzo**

Se aplican entre dos capas de revestimiento impermeable, que tiene como finalidad dar resistencia mecánica, por medio de armaduras de textura cerradas denominadas fieltros y de textura abierta formada a base de hilos denominada tejido, se usa especialmente en losas debido al retraso que produce en el avance de las grietas superficiales hacia la losa.

#### **1.5.3.3.6. Morteros impermeabilizantes**

Es el método de impermeabilización más utilizado en Guatemala respecto a cubiertas en viviendas. Este tipo de morteros a base de cemento y agregado fino funcionan como revestimiento, también existen aditivos especiales para impermeabilización de morteros compuestos de una emulsión acuosa de alcalinos.

#### **1.5.4. Diferencia de calidad en los morteros impermeabilizantes a nivel internacional**

Los aditivos impermeabilizantes en Guatemala deben cumplir con la norma ISO 11014-1, y la norma NTG 41044 (Aditivos para concreto lanzado. Especificaciones) debido a que la mayoría de los productos impermeabilizantes en América son comercializados por una sola industria. La calidad del impermeabilizante depende propiamente del uso que se le dará. Se comercializan impermeabilizantes acrílicos y aislantes térmicos, que tienen una durabilidad de 3 a 5 años, a diferencia de las membranas prefabricadas que tienen una durabilidad de 10 años.

Si se habla de morteros impermeabilizantes guatemaltecos, el más utilizado es el de base acrílica para revestimientos impermeables y semiflexibles; estos se aplican en túneles, canales, albercas, cisternas, fachadas y básicamente cualquier elemento. (Ver anexo 1).

En España existe gran variedad de morteros impermeabilizantes, estos deben cumplir los requisitos mínimos establecidos por la norma EN 1504-9, estos morteros tienen campos de aplicación bastante extensos y parecidos a los

morteros americanos, su objetivo es la impermeabilización y protección de estructuras de hormigón, revoques y recrecidos cementosos. (Ver anexo 2).

En Costa Rica se patentó un mortero impermeabilizante eco-amigable que tiene las mismas aplicaciones que el mortero de Guatemala y el de España. Este mortero cumple con las normas ISO 9001, ISO 14001 y OHSAS 18001 y tiene como característica el control de humedad por capilaridad. (Ver anexo 3).

Si se compara el mortero impermeabilizante más utilizado en Guatemala, el mortero español, y el mortero costarricense es fácil deducir que la calidad del mortero español es mayor, debido a que cumple con todos los requisitos mínimos establecidos por la norma y la información de cada ensayo se incluye en su ficha técnica, a diferencia del mortero guatemalteco que incluye únicamente información sobre su composición química y datos generales del producto. Cabe aclarar que la diferencia de calidad entre los morteros no es significativa y la descripción general del mortero es sumamente parecida.

Tabla III. **Comparación de la resistencia a la compresión y adherencia a los 28 días de un mortero impermeable guatemalteco, español y costarricense**

<b>Mortero</b>	<b>Resistencia a la compresión a los 28 días</b>	<b>Adherencia a los 28 días</b>
Guatemalteco (SikaTop Seal 107)	35 N/mm <sup>2</sup>	1.0 N/mm <sup>2</sup>
Español (Mapelastic)	68 N/mm <sup>2</sup>	1.0 N/mm <sup>2</sup>
Costarricense (Kermill MI560)	24 N/mm <sup>2</sup>	1.77 N/mm <sup>2</sup>

Fuente: elaboración propia.

## **1.6. El caucho de neumático reciclado como impermeabilizante en la construcción**

La humedad siempre ha sido un problema en las construcciones, casi todas las obras civiles se encuentran expuestas a la humedad, causada por lluvia, la propia humedad del suelo y obras que tienen como propósito el almacenamiento de agua, por lo que todas deberían ser impermeabilizadas ya sea interiormente, exteriormente o ambos.

Existen varios métodos de impermeabilización, por medio de pinturas o aditivos para el concreto los cuáles tienen alto costo y su tiempo de vida útil no pasa los 12 años. La mayoría de estos impermeabilizantes están elaborados de acrílicos y resinas sintéticas por sus propiedades hidrofóbicas, pero otro material que posee la misma propiedad de impermeabilidad es el caucho, que es el principal componente de los neumáticos.

Desde el punto de vista ambiental, los neumáticos son difíciles de reciclar debido a su forma y dimensiones, aun así, existen recicladoras que procesan los neumáticos hasta obtener un polvo de diferente granulometría, libre de agentes químicos contaminantes, este polvo es utilizado como método de impermeabilización en canchas sintéticas, así como en pavimentación.

Por ello, evaluar las características físicas y propiedades mecánicas de un mortero de revestimiento con adición de polvo de neumático reciclado brindaría información para saber si el mortero obtenido es un mortero impermeable y más elástico, aplicable a obras de concreto armado y mampostería reforzada expuestas a humedad, aparte de ser más económico debido a que no habría necesidad de utilizar resinas o pinturas impermeabilizantes, todo esto buscando bajar la contaminación ambiental dándole otro uso a los neumáticos.

## **1.7. Deterioro de los materiales de construcción debido al cambio climático**

La razón por la que los materiales que empleamos en la construcción han ido evolucionando con el tiempo no es solamente por los avances tecnológicos, también se ha buscado que los materiales sean más duraderos y resistentes a los agentes ambientales, especialmente los materiales expuestos a la intemperie o los que se encuentran en las cimentaciones, pues con el problema del cambio climático y su accionar en la aceleración de la degradación de los materiales, se busca mantener la calidad de los mismos.

### **1.7.1. Contaminantes en el aire**

Debido al rápido crecimiento industrial y urbano, la calidad del aire ha ido empeorando, y es el medio que más influye en el deterioro de los materiales de construcción, pues entre los contaminantes atmosféricos presentes en el aire se encuentran los compuestos de azufre, el ozono troposférico, el dióxido de carbono, los compuestos nitrogenados los iones cloruros y los PM (Hernández, 2018).

De todos los materiales de construcción, el cemento es el más susceptible de sufrir agresiones al tener contacto con estos químicos contaminantes, generando fenómenos de expansión en el mismo que reducen su resistencia, si se considera que las fachadas y los techos siempre estarán expuestos al aire, estos elementos se convierten en reservorios de contaminantes atmosféricos, es por ello que en muchas edificaciones sin tratamiento en sus fachadas y techos tienen costras negras que son producto de la acumulación de cristales de sulfatos de calcio atrapados en los poros del concreto, el revestimiento y la mampostería.

### **1.7.2. Deterioro de los materiales por la calidad del agua**

El agua puede ser la razón por la que una edificación colapse, puesto que la mayoría de las edificaciones están hechas de materiales conglomerantes hidráulicos, como por ejemplo el cemento en el concreto o en los morteros, la calidad del agua para la mezcla debe ser suficientemente apta para consumo humano.

Por otro lado, si las edificaciones no están impermeabilizadas por cualquier método, el envejecimiento y deterioro de las mismas avanza rápidamente, esto debido a la contaminación del agua, las lluvias pueden contener altas cantidades de óxido de azufre y de nitrógeno, generando ennegrecimiento y amarilleamiento de las fachadas, grietas, infiltraciones de agua, proliferación de hongos y microbios, entre otros, en estructuras metálicas y edificaciones de concreto reforzado el problema se agrava debido a la corrosión que puede debilitar el acero llevándolo a su colapso.

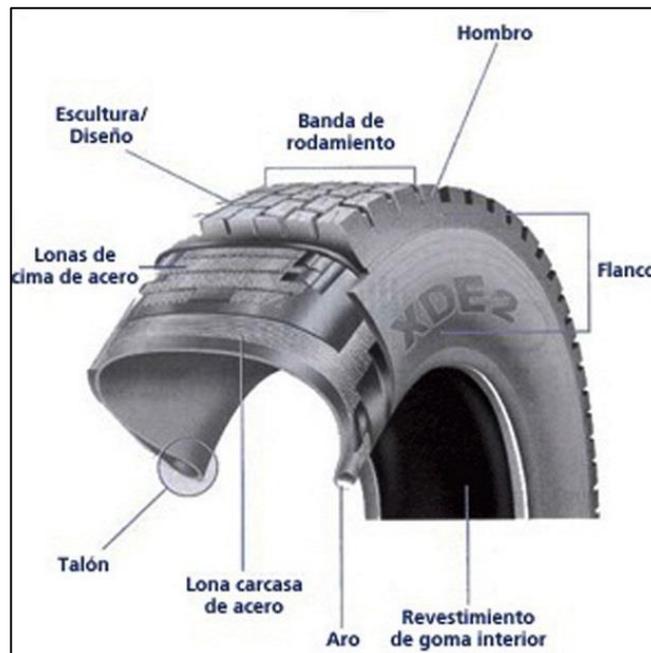


## 2. CAUCHO GRANULADO DE NEUMÁTICOS RECICLADOS

### 2.1. Definición de neumático

La palabra neumático se origina del griego pneuma, cuyo significado es aire. “Pieza de caucho con cámara de aire o sin ella, que se monta sobre la llanta de una rueda” (La Real Academia Española, 2001, párr. 1), es por ello que el neumático no debe confundirse con llanta, puesto que esta es la pieza metálica circular encargada de sostener el neumático.

Figura 7. Estructura del neumático



Fuente: Góngora (2013). *Llantas radiales*. Consultado el 2 de abril de 2021. Recuperado de <https://www.superfrenos.com.mx/llantas-radiales-1/>.

## 2.2. Tipos de neumáticos

La clasificación de neumáticos en la actualidad es bastante extensa, no solamente debido a que la variedad de vehículos también lo es; sino que, gracias al avance tecnológico, existen neumáticos diseñados para diferentes temporadas, usos, eco-amigables, entre otros.

- Neumáticos según la estación del año
  - Verano
  - Invierno

Tabla IV. **Comparación entre neumáticos de invierno y de verano**

<b>Características</b>	<b>Neumáticos de invierno</b>	<b>Neumáticos de verano</b>
Precio	8-10 % más caros	Más baratos
Desgaste en invierno	Menor desgaste	Mayor desgaste
Desgaste en verano	Desgaste normal	Menor desgaste
Ruido	Igual	Igual
Consumo	Mayor consumo	Menor consumo
Conducción en seco	Tacto de conducción menos precisa	Tacto de conducción más precisa
Conducción sobre mojado/charcos	Tacto de conducción óptima	Tacto de conducción menos precisa
Conducción en hielo o nieve	Tacto de conducción más precisa y segura	Tacto de conducción pésima y poco segura
Frenada en seco	Efectividad normal	Efectividad óptima
Frenada sobre mojado	Efectividad óptima	Efectividad discutible

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Sánchez (2022). *Tipos de neumático para tu coche.*

- Neumáticos según su perfil
  - Perfil alto

- Perfil bajo

Tabla V. **Ventajas y desventajas de los neumáticos según su perfil**

Neumáticos de perfil bajo		Neumáticos de perfil alto	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Mejora la precisión de la dirección en curva	Perjudican el confort del vehículo	La suspensión general es más suave por tanto son menos sensibles a los baches	Tienen un desgaste rápido debido a que se deforman más y generan más calor comparado con los de perfil bajo
Mayor agarre en seco y una mejor frenada	Perjudican la aceleración del coche	Son más ligeros por tanto da más confort de marcha	Menor resistencia a la rodadura
Menor ruido que los de perfil	Son más caros respecto a los de perfil alto o normal	Su precio es cómodo para cualquier conductor convencional	A altas velocidades pierden una buena conducción

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Sánchez (2022). *Tipos de neumático para tu coche.*

- Neumáticos según su dibujo: los patrones de los neumáticos tienen diferentes propósitos, los neumáticos con dibujos simétricos, por ejemplo, garantizan una buena adherencia y estabilidad, conducción uniforme y baja resistencia de rodamiento; estos son los más comunes en carros compactos.
- Neumáticos según su interior: posiblemente, la clasificación más importante de los neumáticos se da de acuerdo con su construcción interior, de esto depende la durabilidad de los mismos.
- Neumáticos reencauchados: este tipo de neumático aprovecha la carcasa de neumáticos utilizados, sustituyendo únicamente la banda de rodadura

por medio de un proceso llamado vulcanización, permitiendo que el neumático pueda recorrer muchos kilómetros en un lapso de tiempo corto.

Figura 8. **Neumático reencauchado**

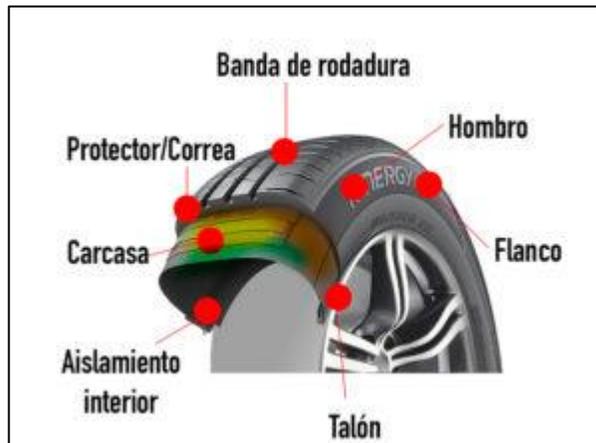


Fuente: Pruebaderuta.com (2016). *Tipos de llantas (neumáticos) según su estructura*. Consultado el 2 de abril de 2021. Recuperado de <https://www.pruebaderuta.com/tipos-de-llantas-neumaticos-segun-su-estructura.php>.

### **2.3. Composición de los neumáticos**

Los neumáticos están constituidos mayormente por caucho, pero poseen diversos materiales que les dan características de adherencia, durabilidad, estabilidad, entre otros.; por ello, es importante conocer las partes que los constituyen.

Figura 9. **Estructura de un neumático convencional**



Fuente: NEUMATICOS KM 0 (28 de noviembre de 2017). *¿Qué partes componen la estructura de un Neumático?* Consultado el 2 de abril de 2021. Recuperado de <https://www.neumaticoskm0.com/estructura-de-un-neumatico/>.

### 2.3.1. **Características básicas del neumático**

Los componentes básicos de los neumáticos son:

- Cauchos naturales y sintéticos
- Textiles y acero (Refuerzos de la estructura física toroidal del neumático, como fibras de nylon, poliéster o Kevlar) (Pizarro, 2013).
- Aditivos químicos: algunos elementos y compuestos químicos que componen los neumáticos son: carbono, hidrógeno, azufre, cloro, hierro, óxido de zinc, dióxido de silicio, cromo, níquel, plomo, cadmio y talio; siendo el carbono, hidrógeno, azufre y óxido de zinc los más importantes.

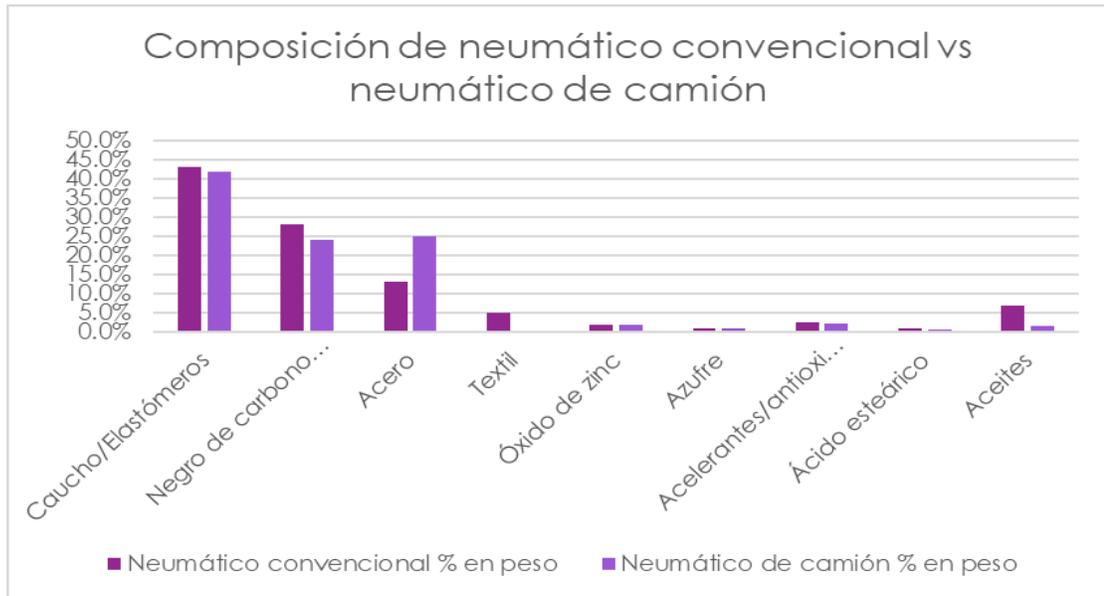
La tabla VI presenta la comparación porcentual de estos componentes en un neumático convencional y un neumático de camión. La figura 11 presenta gráficamente estos datos, donde se evidencia que el componente principal del neumático es el caucho y que el neumático de camión tiene un porcentaje de acero mucho mayor que el neumático convencional, esto debido a que se busca que los neumáticos de camión sean más duraderos y rígidos.

**Tabla VI. Componentes de neumático convencional y neumático de camión**

<b>Componente</b>	<b>Neumático convencional % en peso</b>	<b>Neumático de camión % en peso</b>
Caucho/Elastómeros	43.0 %	42.0 %
Negro de carbono y sílice	28.0 %	24.0 %
Acero	13.0 %	25.0 %
Textil	5.0 %	-
Óxido de zinc	2.0 %	2.0 %
Azufre	1.0 %	1.0 %
Acelerantes/antioxidantes	2.5 %	2.2 %
Ácido esteárico	1.0 %	0.7 %
Aceites	7.0 %	1.6 %

Fuente: Pérez y Saiz (2018). *Reciclado de neumáticos: transformación de un residuo en un recurso*. Consultado el 3 de abril de 2022. Recuperado de <https://docplayer.es/81373023-Reciclado-de-neumaticos-transformacion-de-un-residuo-en-un-recurso.html>.

Figura 10. **Gráfica composición de neumático convencional vs neumático de camión**



Fuente: elaboración propia.

### 2.3.1.1. Cauchos o elastómeros

Este material es el principal constituyente del neumático, presentando el 42 % en peso. Los elastómeros son materiales poliméricos de moléculas pequeñas llamadas isopreno, presentan gran capacidad elástica, estirándose fácilmente entre 500 a 1000 veces su tamaño original conservando su tenacidad.

#### 2.3.1.1.1. Caucho natural y sintético

Fue en Brasil donde ocurrió el primer hallazgo del caucho en los árboles *Hevea Brasiliensis*, del valle amazónico; este caucho se encuentra en forma de polímeros en agua de aspecto lechoso llamada látex.

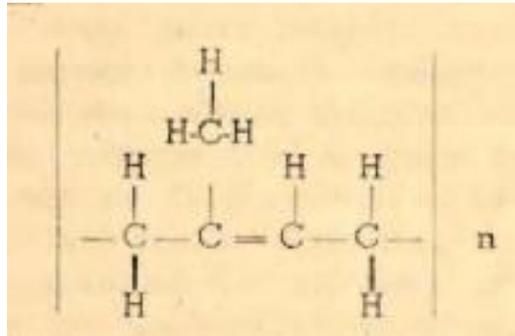
“...Antiguamente, la demanda del caucho fue muy poca, pero aumentó rápidamente con el progreso de la industria de llantas para bicicletas y para automóviles” (Bekkedahl, 1946, p. 55). Es debido a este rápido aumento que se buscó sintetizar este producto de la naturaleza, por ello en 1826 Faraday, un químico británico, analizó el caucho natural descubriendo que contenía carbono e hidrógeno. Determinando su fórmula química  $(C_5H_8)_n$  comenzaron a tratar de sintetizar el caucho natural con un líquido llamado isopreno, que no fue exitoso.

Aun así, en 1930, Alemania, Rusia y los Estados Unidos elaboraron cauchos sintéticos con diferente composición química al caucho natural; la compañía DuPont de Estados Unidos, fabricó un caucho sintético llamado Neoprene que posee la misma fórmula química que el isopreno, con la diferencia que tiene un átomo de cloro (Bekkedahl, 1946).

El caucho natural se caracteriza por tener una configuración química muy regular y el tipo utilizado normalmente en la formulación de los neumáticos corresponde a la cadena de cis-1,4-poliisopreno (la variante trans presenta mayor rigidez y un menor comportamiento elastomérico), el cual presenta un grado de polimerización comprendido entre 2,000 y 4,500., y un peso molecular del orden de 200,000 g/mol. (Pizarro, 2013, p. 3)

Debido al bloqueo sobre productores asiáticos de caucho por la segunda guerra mundial, Estados Unidos tuvo un auge en la producción de un caucho similar en propiedades al que se obtenía del *Hevea Brasiliensis*, y, aunque actualmente hay más de 1800 especies que sintetizan caucho natural, son pocas las capaces de producir un caucho natural de alto peso molecular.

Figura 11. **Fórmula estructural del caucho natural**

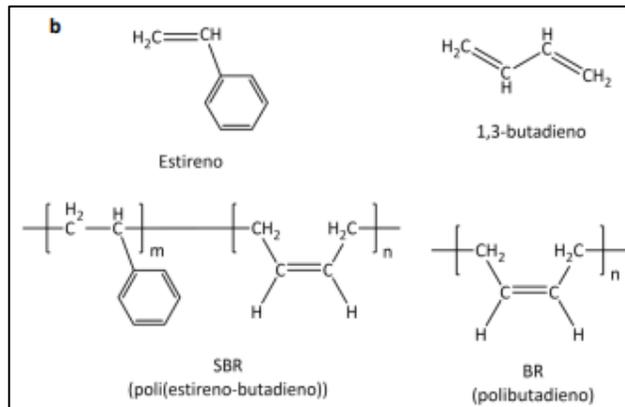


Fuente: Bekkedahl (1946). *Caucho natural y caucho sintético*. Consultado el 3 de abril de 2022.  
Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/42599/32262-119418-1-PB.pdf?sequence=1>.

Entre los cauchos sintéticos que más se utilizan en los neumáticos se encuentran: Caucho estireno-butadieno (SBR), que es un copolímero en bloques o aleatorio; y el caucho butadieno o poli-butadieno (BR), un homopolímero del monómero 1,3-butadieno (Pizarro, 2013).

Se busca que la mezcla de estos dos cauchos produzca un material más elástico, con buena densidad, resistencia a la abrasión, a los cambios de temperatura, entre otros.

Figura 12. **Fórmula estructural del caucho sintético SBR y BR**



Fuente: Pizarro (2013). *Valorización de caucho procedente de neumáticos fuera de uso*. Consultado el 3 de abril de 2022. Recuperado de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/144148>.

### 2.3.1.2. Negro de carbono

También conocido como negro de humo es un material inorgánico y coloidal que se produce mediante la combustión parcial de gas natural, gas, y otros productos de petróleo. Su uso se da principalmente en la producción de neumáticos y también en el reencauchado de los mismos. Su fabricación es en forma de combustión que produce un choque entre la flama con una superficie fría, dejando un residuo negro, el cual se recolecta como negro de carbono.

### 2.3.1.3. Acero y textiles

Estos dos elementos de los neumáticos se incluyen en forma de fibras que proveen una mayor resistencia y rigidez, funcionando de forma de un esqueleto estructural para el neumático.

#### **2.3.1.4. Óxido de zinc**

La función principal de este químico en los neumáticos es protegerlos de la oxidación, aparte de funcionar como un acelerador para la vulcanización del caucho.

#### **2.3.1.5. Azufre**

Se utiliza de manera insoluble como un agente vulcanizante de caucho generando una adhesión más sólida del mismo, evitando que el caucho se rompa.

#### **2.3.1.6. Aditivos**

Se utilizan aditivos varios como plastificantes, vulcanizadores, acelerantes, retardantes, entre otros, que funcionan para integrar el neumático y proporcionar durabilidad, resistencia, viscosidad, entre otros (Estrada, 2016).

La figura 14 presenta el proceso de fabricación de un neumático convencional y los pasos en los que se agrega cada componente.

### **2.4. Importación de neumáticos en Guatemala**

A continuación, se hace una descripción generalizada de la importación de neumáticos en Guatemala.

### 2.4.1. Generalidades del mercado de neumáticos en Guatemala

Guatemala no cuenta con empresas que produzcan neumáticos por consiguiente el mercado de llantas es 100 % importación, para el año 2021 China se encuentra como el mayor proveedor liderando las ventas con un 66 % del mercado total; Japón, Costa Rica, Tailandia, Estados Unidos, México, Brasil, Taiwán y Corea del Sur completan el mercado de neumáticos en Guatemala.

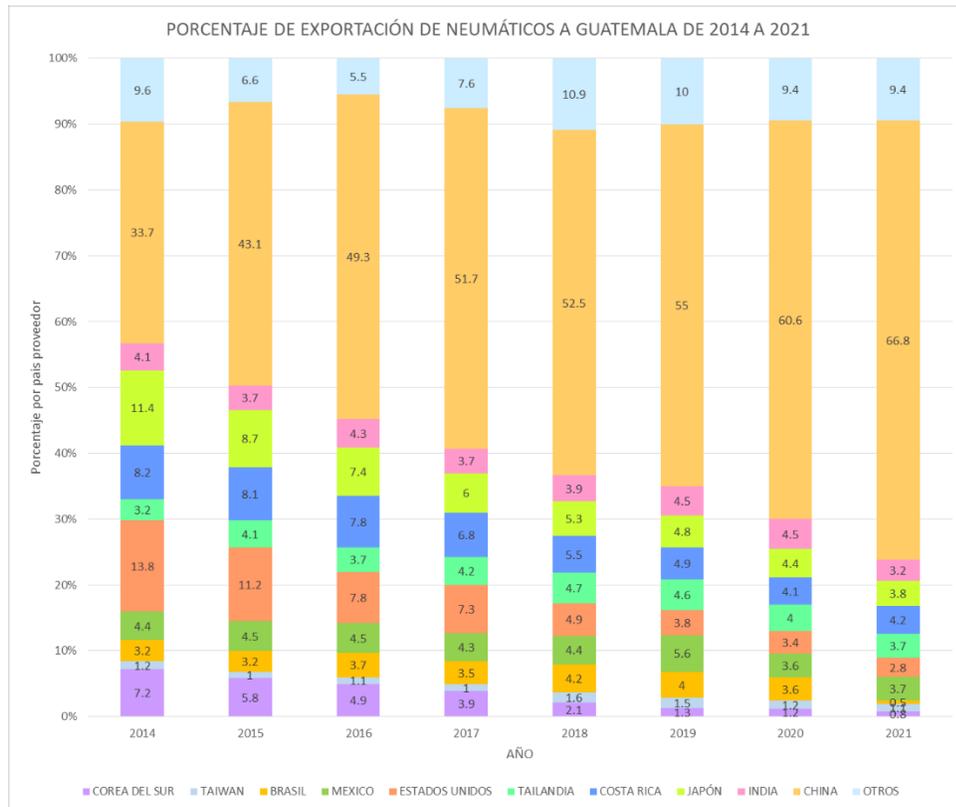
El mercado de neumáticos se vio altamente afectado con la pandemia provocada por el COVID-19, entre el año 2020 al año 2021 se tuvo una caída en el valor de importación de neumáticos donde Estados Unidos resultó ser el proveedor más afectado, seguido por Japón y Costa Rica.

Tabla VII. **Porcentaje de importaciones por país desde el año 2014 a 2021**

Año	Corea del Sur	Taiwan	Brasil	México	Estados Unidos	Tailandia	Costa Rica	Japón	India	China	Otros
2014	7.2	1.2	3.2	4.4	13.8	3.2	8.2	11.4	4.1	33.7	9.6
2015	5.8	1	3.2	4.5	11.2	4.1	8.1	8.7	3.7	43.1	6.6
2016	4.9	1.1	3.7	4.5	7.8	3.7	7.8	7.4	4.3	49.3	5.5
2017	3.9	1	3.5	4.3	7.3	4.2	6.8	6	3.7	51.7	7.6
2018	2.1	1.6	4.2	4.4	4.9	4.7	5.5	5.3	3.9	52.5	10.9
2019	1.3	1.5	4	5.6	3.8	4.6	4.9	4.8	4.5	55	10
2020	1.2	1.2	3.6	3.6	3.4	4	4.1	4.4	4.5	60.6	9.4
2021	0.8	1.1	0.5	3.7	2.8	3.7	4.2	3.8	3.2	66.8	9.4

Fuente: Mérida (2021). *Estudio de industria de Guatemala: neumáticos inteligencia de mercados Guatemala, junio 2021.*

Figura 13. **Gráfica de porcentaje de ventas de neumáticos a Guatemala por país, del año 2014 a 2021**



Fuente: elaboración propia.

### 2.4.2. Tamaño de mercado de neumáticos en Guatemala

Como se mencionó anteriormente, debido a la pandemia por COVID-19 el valor de neumático decreció considerablemente entre el año 2020 y 2021, aun así, de acuerdo con el análisis realizado por el Ministerio de Economía de Guatemala, del año 2014 al 2020 el mercado de neumáticos creció un 2 % pasando de 4.5 millones de unidades vendidas a 5.1 (considerando llantas nuevas y usadas). Si se realiza una comparación entre el año 2019 al 2020 se

puede ver un decrecimiento en los porcentajes, teniendo -1 % del total de neumáticos, presentando crecimiento únicamente en neumáticos para bicicletas, motocicletas y neumáticos usados reencauchados.

## **2.5. Desecho de neumáticos en Guatemala**

No fue hasta el año 2017 que se presentó ante la Comisión de Ambiente, Ecología y Recursos Naturales de Guatemala, una iniciativa que dispone aprobar una ley reguladora del manejo, recolección, tratamiento y disposición final de llantas usadas, esto debido a que, para el año mencionado, el parque vehicular de Guatemala era aproximadamente de 3 millones de vehículos, lo que generaba un gasto anual de 6 millones de neumáticos; para el año 2021, de acuerdo al mercado de neumáticos (5.1 millones) se considera un desecho aproximado de 10 millones de neumáticos, y si bien los neumáticos desechados no presentan ni el 1 % de los residuos sólidos del país, debido a su gran tamaño, geometría y que no son degradables, se complica su desecho total.

### **2.5.1. Disposición de neumáticos desechados en Guatemala**

Los neumáticos no son biodegradables, sus formas de desecho en Guatemala se reducen a su desecho en basureros o vertederos, incineración, reencauchado o como combustible alterno.

#### **2.5.1.1. Desecho de neumáticos en basureros**

En países como Suecia, Austria y Alemania es rechazada la práctica de desechar neumáticos enteros en rellenos sanitarios, esto porque la compactación de estos no es fácil, y por su forma hueca, pueden atrapar aire o gases (Iniciativa de ley 5360, 2017). En el país, el caso es diferente ya que no está regulada la

forma de desechar los neumáticos, por consiguiente, los basureros son los principales destinatarios de todo tipo de llanta usada. Si bien algunos basureros municipales no aceptan los neumáticos por el riesgo de incendio y proliferación de mosquitos, existen basureros en todo el país donde éstos se reciben y se acumulan apiladas a la intemperie.

#### **2.5.1.2. Incineración de neumáticos desechados**

No todos los basureros municipales aceptan el desecho de neumáticos, muchos optan por acumular neumáticos en terrenos baldíos, talleres y patios, colocándolos de forma apilada que lo único que genera es la acumulación de agua en época de lluvia generando focos de enfermedades debido a la proliferación de mosquitos, ratones, y plagas que transmiten enfermedades a la población; es por esto que la gente opta por la quema de estos, siendo la peor opción para el desecho de estos, pues los neumáticos son fabricados a partir de caucho vulcanizado, se sabe que el caucho es un polímero del isopreno o metil butadieno; su combustión emite gran cantidad de sustancias de naturaleza carboalquitranosas. Al ser respirado el aire contaminado con estas sustancias, las partículas son transportadas a lo largo del aparato respiratorio llegando a los alveolos del pulmón generando graves enfermedades.

El daño debido a la incineración de neumáticos no es únicamente a los seres humanos, entre los impactos ambientales más comunes derivados por estos hechos son:

- Compuestos de la lixiviación de los neumáticos y la contaminación del suelo y a las aguas subterráneas y superficiales.
- Lluvia ácida y el efecto invernadero.

- La quema incontrolada de neumáticos al aire libre libera aceites pirolíticos y otros compuestos en el suelo y en las aguas subterráneas, así como grandes columnas de humo negro y otros contaminantes en el aire.
- El agua que se utiliza para extinguir los incendios de neumáticos usados se contamina con compuestos de neumáticos al entrar en contacto con estos (Babativa y Holguín, 2017).

### **2.5.1.3. Reencauchado de neumáticos**

El reencauchado de neumáticos es un proceso muy común en Guatemala, el cual consiste en retirar la banda de rodadura de llantas que se encuentran lisas, pero aún tienen buena condición en su estructura, de esta manera tendrán una segunda vida, se realiza mayormente en llantas para buses y camiones debido a su tamaño, es una opción muy buscada porque es más económico que comprar llantas nuevas.

Si se realiza un buen reencauchado se asegura buena calidad del neumático, seguridad y buen desempeño, pero en Guatemala existe un gran mercado de reencauchado artesanal para vehículos pesados, que, si bien son de bajo costo, no garantizan seguridad para el usuario ni un buen desempeño del neumático.

### **2.5.1.4. Combustible alternativo derivado de neumáticos desechados**

Existe la forma de utilizar neumáticos desechados como combustible alternativo en las diferentes industrias de energía, cementeras, entre otros, esto debido a su alto valor calorífico, que sustituiría al carbón o madera y otros combustibles convencionales.

El proceso para realizar este aprovechamiento energético se conoce como pirolisis, la cual se basa en la descomposición térmica de la materia orgánica o compuestos basados en carbono, esto con temperaturas óptimas entre 250 °C a 350 °C (Mancheno, *et al.*, 2017).

## **2.6. Reciclaje de neumáticos en Guatemala**

En Guatemala se desechan grandes cantidades de neumáticos anualmente, la Comisión Nacional de Desechos Sólidos CONADES realizó un estudio de la distribución de los neumáticos desechados donde se obtuvo que:

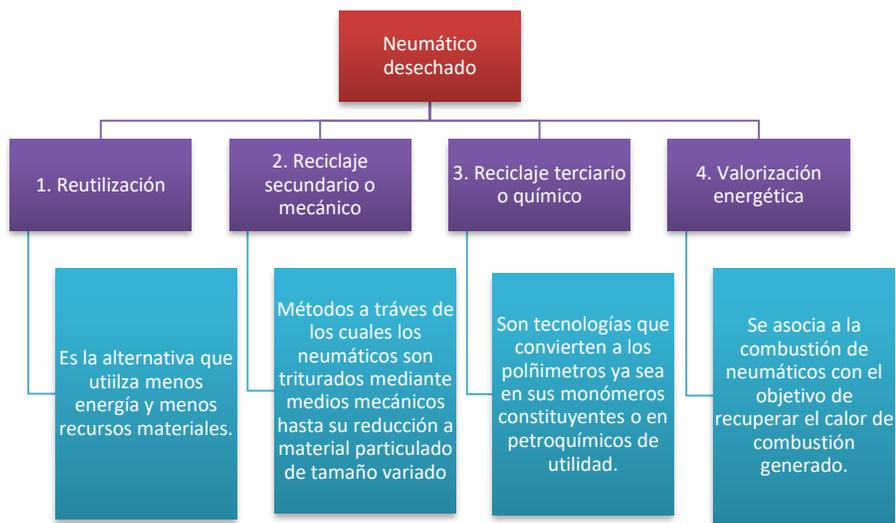
- 70 % de los neumáticos desechados llega a vertederos, la mayoría no autorizados.
- 15 % son reencauchados por importadoras de llantas o de manera artesanal.
- 12 % son reciclados.
- 3 % de los neumáticos desechados se consideran desconocidos.

El capítulo V *Tratamiento de llantas de desecho o fuera de uso*, de la iniciativa 5360 propone que el tratamiento de las llantas de desecho se debería efectuar por alguno de los siguientes procesos:

- Generación de energía calórica en la industria
- Producción de pacas de llantas utilizadas en proyectos de obras civiles
- Agregados para el pavimento asfáltico
- Producción de caucho en polvo
- Cualquier otro proceso específico debidamente aprobado por la Dirección de Gestión Ambiental y Recursos Naturales del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.

Todos estos procesos pueden darse debido a que los neumáticos son productos de diseño complejo, que al convertirse en residuo se pueden reciclar como se encuentran originalmente, o extraer sus componentes y valorizarlos. De acuerdo con Pizarro “podemos clasificar los métodos de reciclaje de acuerdo a su complejidad y/o profundidad de proceso” (Pizarro, 2013, p. 4), como se presenta en la figura 14.

Figura 14. **Esquema de clasificación de reciclaje de neumáticos**



Fuente: Pizarro (2013). *Valorización de caucho procedente de neumáticos fuera de uso*.

Consultado el 10 de abril de 2022. Recuperado de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/144148>.

### 2.6.1. Reutilización

La reutilización de los neumáticos desechados puede ser utilizando el neumático entero o rescatando el mayor componente del neumático, el caucho.

- Reutilización de neumáticos enteros: el reencauchado de llantas es el método más común de reciclaje en el país, pero también en Guatemala se producen muebles artesanales como sillones, mesas, casas para mascotas, entre otros. Además, se propone en la tesis de pregrado Evaluación de opciones para la reutilización de llantas de Guatemala, de la Inga. Química Luz María Guevara Abauta, considera como opción válida para Guatemala los arrecifes artificiales de llantas.
- Reutilización del caucho de neumático desechado: la reutilización del caucho de neumáticos desechados debe pasar por un sencillo proceso de trituración, descartando las partes metálicas. Con la materia obtenida se producen suelas de calzado, barreras acústicas y balas de neumáticos, como algunos ejemplos.

### **2.6.2. Reciclaje secundario o mecánico**

Los neumáticos desechados deben pasar por un proceso de tratamiento el cual consta de los siguientes pasos:

- Los neumáticos enteros se introducen en una trituradora que se compone de un conjunto formado por uno o dos rotores o ejes de cuchillas que giran en sentido contrario para cortar el neumático para obtener trozos de neumático de entre 20 y 400 mm.
- Al salir de la etapa de trituración entran a la etapa de granulación, donde el caucho se separa de las fibras textiles y de acero, en esta etapa se busca obtener un granulado o polvo de caucho variando de 10 mm hasta 0.8 mm. Los procesos más empleados para obtenerlos son 2:

- Por medio de molinos mecánicos a temperatura ambiente, donde se utilizan dos rodillos con ranuras afiladas para romper el caucho, y dependiendo del tamaño de partícula buscado se repite varias veces el proceso.
- Por medio de molienda criogénica, es decir que se utiliza nitrógeno líquido buscando temperaturas cercanas a los  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  para fragilizar el caucho, pues de esta manera pierde su elasticidad y se facilita su desintegración, finalmente pasan por un molino de impacto para obtener elementos finos. Este método no suele utilizarse en Guatemala.
- Separación de acero y fibra textil: esta separación se lleva a cabo durante la granulometría. El acero se retira con separadores magnéticos; la fibra textil puede separarse por medio de una cinta transportadora con vibraciones perpendiculares, o por mesas vibratorias que pueden utilizar dispositivos fluidodinámicos basados en corrientes de aire o ciclones.

### **2.6.3. Reciclaje terciario o químico**

En este proceso los polímeros se regresan a sus monómeros constituyentes, para obtener productos útiles como combustibles. Los procesos de pirolisis, gasificación, hidrogenación, craqueo catalítico, por vapor y reducción en altos hornos entran en esta categoría.

### **2.6.4. Valorización energética**

Se le llama de esta manera a la combustión de neumáticos desechados buscando recuperar el calor de la combustión generada, este proceso tiene

varias desventajas, como generación de depósitos de cenizas y de gases tóxicos (los cuales requieren tratamientos adicionales para su correcta gestión), producción de hollín que genera temperaturas de llamas más elevadas y la necesidad de incineradoras apropiadas.

## **2.7. Polvo o granulado de caucho de neumático reciclado como materia prima**

La iniciativa de ley 5360 propone aplicar los 4 métodos de reciclaje, mencionados en la sección 2.5 de este trabajo, de manera obligatoria. El reciclaje secundario o mecánico es el método más utilizado actualmente en el país, pues utilizando el granulado o polvo de llanta como materia prima, se produce gran cantidad de productos, mencionando algunos:

- Relleno de césped artificial
- Alfombras para parques infantiles
- Capas elásticas en superficies deportivas
- Barreras de seguridad en carreteras
- Topes para parqueos
- Incorporación en mezclas de asfalto

Todo esto debido a las diferentes granulometrías que se pueden obtener durante el proceso de transformación. De acuerdo con el artículo *Reciclado de Neumáticos: Transformación de un residuo en un recurso*, se considera como polvo de llanta a aquel menor a 0.8 mm y granulado de llanta a aquel entre 0.8 y 20 mm.

### **2.7.1. Propiedades mecánicas del polvo o granulado de caucho de neumático reciclado**

El granulado de caucho es un recurso con alta demanda debido a su bajo costo e impacto ambiental debido a ser un material reciclado, pero también presenta excelentes propiedades mecánicas que lo hacen un mejor material frente a otros materiales convencionales, entre estas se encuentran:

- Elasticidad
- Absorción de vibraciones
- Agarre
- Resistencia a la abrasión
- Termo-estabilidad
- Viscoelasticidad que mejora las propiedades de:
  - Tensión
  - Alargamiento a rotura
  - Resistencia al desgarro
  - Resistencia a la fisuración y al agrietamiento
- Elevada durabilidad
- Resistencia a diferentes condiciones climáticas como:
  - Rayos UV
  - Cambios de temperatura y humedad
- Absorción de impactos
- Atenuación de ruido
- Aislante eléctrico (Pérez y Saiz, 2018).

### 2.7.2. Usos del granulado de caucho de neumático reciclado en la construcción guatemalteca

En Guatemala es variado el reuso en la construcción del neumático desechado entero, el ejemplo más grande es el muro de contención ecológico diseñado por Yovanni Guevara en Chiquimula, utilizando 40,000 neumáticos desechados; sin embargo, el uso del granulado de caucho en la construcción solamente ha sido estudiado más no aplicado en proyectos reales.

Figura 15. **“EcoMuro” realizado con 40,000 neumáticos desechados**



Fuente: Cabrera (2017). *Construyen el muro ecológico más grande de Guatemala*. Consultado el 17 de marzo de 2022. Recuperado de <https://www.guatemala.com/noticias/sociedad/construyen-el-muro-ecologico-mas-grande-de-guatemala.html>.

### **2.7.2.1. Concreto con adición de caucho granulado**

El adicionar caucho granulado o polvo de llanta al concreto para evaluar sus propiedades físicas y mecánicas ha sido tema de investigación para estudiantes de Ingeniería civil, química, ambiental y estudiantes de arquitectura. El objetivo principal de investigación ha sido evaluar la flexión del concreto y como responde al ser sometido a compresión, otras investigaciones se inclinan a la porosidad y permeabilidad del mismo.

De acuerdo con José González, el sustituir un 2 % de agregado fino por caucho de 3 mm en la mezcla de concreto genera un concreto permeable óptimo, flexible, y con buena trabajabilidad, pero su resistencia a la compresión se ve altamente disminuida (Quiñonez, 2017). Estas conclusiones concuerdan con los resultados obtenidos en la investigación realizada por la Universidad de Atacama, Chile, donde se menciona que “Para obtener un concreto resistente a la compresión se sugiere utilizar fibra de acero y fibra de caucho obtenida de neumáticos fuera de uso en cantidades inferiores a 50 y 10.5 kg/m<sup>3</sup>” (Nazer, Honores, Chulak y Pavez, 2019, p. 723).

### **2.7.2.2. Paneles aislantes de sonido**

Guillermo Guzmán de la facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala presentó en su trabajo de graduación la investigación sobre paneles aislantes de sonido elaborados concreto y adición de polvo de llanta. (Guzmán, 2017) utilizando un 5 % de adición de caucho respecto a la suma de agregados gruesos y finos obtuvo disminución de ruido en todos los escenarios estudiados, aparte de obtener paneles más ligeros, pero con suficiente rigidez, aunque también se comprueba que existe una reducción en la resistencia a la compresión al añadir caucho granulado.

### **3. PROPIEDADES DEL AGREGADO FINO PARA MORTEROS Y LAS NORMAS QUE DEBE CUMPLIR**

Al agregado fino se le acreditan muchas de las propiedades que puede adquirir el mortero por esta razón se deben conocer las características físicas y propiedades mecánicas del material a utilizar para la elaboración de la mezcla. Debido a que el polvo de llanta se utilizará como un porcentaje de agregado fino en el mortero a evaluar, se consideran aplicables las pruebas con base en las normas dictadas por la American Society for Testing and Materials (ASTM) o su equivalente para Guatemala, las Normas Técnicas Guatemaltecas (NTG).

#### **3.1. Propiedades del agregado fino**

El papel que desempeña el agregado fino en el mortero es muy importante, y de este dependerá en gran maerna la resistencia del mortero, así como sus propiedades físicas y cualidades estéticas, por ello una buena selección del agregado fino influyen en la calidad final del mortero a obtener.

##### **3.1.1. Clasificación según su procedencia**

Los agregados se pueden clasificar de acuerdo con su procedencia, la cual puede ser de fuentes naturales o fabricados a partir de productos industriales.

- Agregados naturales: proveniente de la explotación de fuentes naturales, como cauces de ríos, glaciares o canteras de diversas rocas y piedras naturales.

- Agregados artificiales: se obtienen a partir de productos y procesos industriales, como las escorias de alto horno, Clinker, arcillas expandidas, entre otros (Sánchez, 2001).

### **3.1.2. Propiedades físicas**

Las propiedades físicas del agregado fino sirven para clasificar el mismo de acuerdo con su forma, granulometría y/o textura. La granulometría y forma del agregado influye en la consistencia de la mezcla, así como el porcentaje de vacíos.

#### **3.1.2.1. Forma**

Dependiendo de la procedencia del agregado, este tendrá diferentes formas geométricas que varían desde una forma redondeada debido al desgaste del agua, a formas cúbicas o poliédricas dependiendo del método de trituración empleado o del tipo de roca del cual se derivan, las cuales pueden ser ígneas, sedimentarias o metamórficas.

#### **3.1.2.2. Granulometría**

Es la distribución de los tamaños de las partículas que conforman al agregado, esta propiedad es sumamente importante que exista una buena mezcla de mortero, el agregado debe estar bien proporcionado en tamaño y en forma adecuada.

### **3.1.2.3. Textura**

Los agregados pueden tener diferente textura superficial dependiendo de su origen, esta característica está ligada a la dureza, tamaño, forma y estructura de la roca madre. Las texturas que se pueden presentar en los agregados son:

- Vítrea (fractura concoidal)
- Lisa
- Granular
- Áspera
- Cristalina
- Apanalada (con poros y cavidades visibles)

### **3.1.2.4. Superficie específica**

Es la relación entre la superficie exterior de una partícula del agregado y el volumen que esta ocupa. Esta propiedad indica la cantidad de agua y cemento que se deberá usar en la mezcla. A mayor tamaño de una masa de agregado, menor superficie específica, por consiguiente, se requerirá menos agua y menos cemento (Sánchez, 2001).

### **3.1.2.5. Porosidad**

La porosidad del material afecta las propiedades mecánicas del agregado, pues un agregado muy poroso pierde dureza y resistencia. De esta propiedad también depende la capacidad de absorción de agua que tendrá el agregado.

#### **3.1.2.6. Densidad o peso específico**

Es la relación entre el peso y el volumen de una masa de agregado determinada. Esta propiedad depende del origen del agregado de manera directa y también de la porosidad del material.

#### **3.1.2.7. Peso volumétrico**

Se define como la relación entre el peso del agregado y el volumen que ocupan las partículas del agregado dentro de un recipiente de volumen conocido.

#### **3.1.2.8. Color**

Los agregados pueden tener diferente color dependiendo de su origen, así como de su contaminación, un agregado más oscuro puede tener más contenido de sustancias perjudiciales para la mezcla que un agregado de tonalidad clara.

#### **3.1.2.9. Abultamiento de la arena**

Esta propiedad consiste en un aumento de volumen para un determinado peso de arena, el cual es causado por la presión del agua entre partículas de arena cuando se encuentra húmeda.

### **3.1.3. Propiedades mecánicas**

Las propiedades mecánicas indican la resistencia y capacidad del agregado fino cuando se le aplica una fuerza, por lo tanto, también indica su capacidad para transmitir fuerza y deformarse.

### **3.1.3.1. Resistencia**

La resistencia del agregado es importante debido a que la falla del mortero está regida por esta, se busca que la resistencia de la pasta de cemento sea mayor que la del agregado.

### **3.1.3.2. Tenacidad**

Es la resistencia a la falla por impacto, si el agregado tiene baja tenacidad, la granulometría de este se puede ver afectada, así como su calidad.

### **3.1.3.3. Adherencia**

Propiedad que juega un papel muy importante para la mezcla de mortero, de esta depende la interacción que tendrá el agregado con la pasta de cemento, qué tan ligadas se encontrarán las partículas con la pasta.

### **3.1.3.4. Dureza**

Esta propiedad depende de la constitución mineralógica, la estructura y procedencia de los agregados.

### **3.1.3.5. Sustancias perjudiciales**

Se debe buscar que los agregados no se encuentren contaminados con limo, arcilla, humus y otras materias orgánicas, sales químicas y capas o incrustaciones superficiales, pues estas sustancias restan calidad y resistencia a la mezcla.

### 3.2. Normas y ensayos aplicados al agregado fino

Al agregado fino se le acreditan muchas de las propiedades que puede adquirir el mortero, esto quiere decir que es imperativo conocer las características físicas y propiedades mecánicas de material. También el polvo de llanta se utilizará como un porcentaje de agregado fino en el mortero a evaluar, se consideran aplicables las pruebas con base en las normas dictadas por la American Society for Testing and Materials (ASTM), o su equivalente para Guatemala, las Normas Técnicas Guatemaltecas (NTG).

- Definición de agregado fino según NTG 41006 (ASTM C 125-07)
- Especificación estándar para agregados del concreto según NTG 41007 (ASTM C33/C33-08).

Tabla VIII. **Límites granulométricos para agregado fino según NTG 41007 (ASTM C33/C33-08)**

Tamiz (Especificados en ASTM E-11)	Porcentaje que pasa (Arena natural)	Porcentaje que pasa (Arena manufacturada)
<b>9.5 mm (3/8")</b>	100	100
<b>4.75 mm (No. 4)</b>	95 a 100	95 a 100
<b>2.36 mm (No. 8)</b>	80 a 100	80 a 95
<b>1.18 mm (No. 16)</b>	50 a 85	45 a 95
<b>600 µm (No. 30)</b>	25 a 60	25 a 75
<b>300 µm (No. 50)</b>	5 a 30	10 a 35
<b>150 µm (No. 100)</b>	0 a 10	8 a 20

Fuente: Comisión Guatemalteca de Normas (2010). *NTG 41007 (ASTM C33/C33-08)*.

*Agregados para concreto. Especificaciones.*

- Análisis granulométrico por tamices de los agregados fino y grueso según NTG 41010 h1 (ASTM C136-14).

Figura 16. **Ensayo de análisis granulométrico para agregado fino**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

- Determinación de la densidad aparente (masa unitaria) e índice de vacíos en los agregados según NTG 41010 h2 (ASTM C29/C29).
- Determinación por lavado del material que pasa por el tamiz 75  $\mu\text{m}$  (No. 200) en agregados minerales según NTG 41010 h3 (ASTM C-117).
- Determinación de materia orgánica en los agregados finos para concreto según NTG 41010 h4 (ASTM C-40).
- Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agua del agregado fino según NTG 41010 h9 (ASTM C-128).



## **4. PROPIEDADES DE LOS MORTEROS Y LAS NORMAS QUE DEBE CUMPLIR**

El mortero se puede definir como una mezcla de un material aglutinante, agregado fino y agua, al endurecerse presenta diferentes propiedades químicas, físicas y mecánicas que, en su estado fresco, por lo que se analizan sus propiedades en: Estado plástico y estado endurecido.

### **4.1. Propiedades en estado plástico**

Un mortero se encuentra en estado fresco o plástico cuando este no ha adquirido la rigidez necesaria causada por el fraguado. En este estado el mortero es manejable y cambia su volumen debido a la retención de agua y contenido de aire.

#### **4.1.1. Manejabilidad**

Esta propiedad mide la facilidad de colocación de la mezcla, está totalmente relacionada con la consistencia o fluidez del mortero. Es una de las propiedades más relevantes del mortero en estado plástico esto debido a que la manejabilidad ayuda a los morteros a soportar las unidades de mampostería o tener una buena adherencia si el mortero es de revestimiento. Esta depende de la cantidad de agua agregada a la mezcla y la graduación de los agregados. La tabla XIII presenta los porcentajes óptimos de fluidez que se pueden obtener en el ensayo de la mesa de flujo (ASTM C-230), dependiendo la consistencia que se desea obtener.

Tabla IX. **Fluidez recomendada del mortero**

<b>Consistencia</b>	<b>Fluidez en porcentaje</b>
Dura (seca)	80-100
Media (plástica)	100-120
Fluida (húmeda)	120-150

Fuente: Sánchez (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*.

#### **4.1.2. Retención de agua**

Es la propiedad para mantener su plasticidad cuando entra en contacto con una superficie absorbente, esto se logra manteniendo retenida el agua, pues si esta se succiona o se evapora se pierde la adherencia entre la pieza y el mortero. Esta propiedad influye directamente en la velocidad de endurecimiento y también en la resistencia a la compresión debido a que el cemento debe mantenerse hidratado.

#### **4.1.3. Contenido de aire**

El contenido de aire es un factor que se produce debido a las burbujas o vacíos existentes en el mortero, esta propiedad permite la expansión y compresión del mortero y evita el fisuramiento al endurecerse, pero debe cuidarse de no tener un alto porcentaje de aire provocando un mortero poroso y permeable.

#### **4.1.4. Velocidad de endurecimiento**

Se debe buscar que los tiempos de fraguado inicial y final de la mezcla cumplan con los límites adecuados (se considera aceptables valores entre 2 y 24

horas), estos límites dependerán de diversos factores ambientales o de la mezcla.

## **4.2. Propiedades en estado endurecido**

El estado endurecido del concreto ocurre cuando esté ya terminó su fraguado y adquiere resistencia a los esfuerzos sometidos, así como durabilidad y adherencia.

### **4.2.1. Adherencia**

De esta propiedad depende la funcionalidad del mortero debido a que su función primordial es adherirse a unidades de mampostería, se puede definir como “La capacidad que tiene el mortero de absorber tensiones normales y tangenciales a la superficie que une el mortero con la estructura” (Sánchez, 2001, p. 126).

Las mayores resistencias a la adherencia se logran con mezclas que tengan una buena trabajabilidad, respetando lo indicado en la norma ASTM C-270 que indica que “...todo mortero sea usado antes de las dos horas y media, con opción a reacondicionarse tantas veces como sea necesario dentro de ese lapso” (ASTM, 2019, p. 5).

### **4.2.2. Retracción**

Es una propiedad que depende de las reacciones químicas de hidratación de la mezcla, si el agua de la mezcla se evapora rápidamente se presentan tensiones internas en el mortero generando grietas. Para evitar la retracción es

conveniente usar cementos con contenido de puzolana y arenas de buena granulometría con pocos finos.

### **4.2.3. Resistencia**

La función principal del mortero es actuar como una unión resistente, dependiendo de los esfuerzos a los que se encuentre sometido el elemento este puede presentar resistencia a compresión, resistencia a tensión y resistencia a corte.

#### **4.2.3.1. Resistencia a compresión**

Se busca que el mortero presente una alta resistencia a la compresión cuando este se someta a cargas altas y sucesivas, pues este parámetro da un indicio de cómo será las resistencias a corte y tensión.

La resistencia a compresión depende de la cantidad de cemento en la mezcla de mortero, un mortero con mayor porcentaje de cemento en la mezcla será un mortero más resistente e impermeable.

#### **4.2.3.2. Resistencia a tensión**

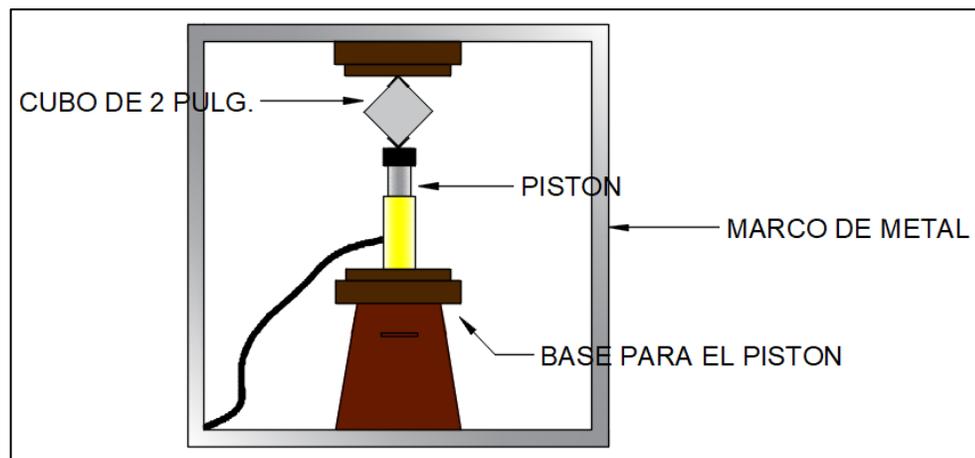
La resistencia a tensión se presenta cuando el elemento se somete a tensiones diagonales y aunque en morteros suele ser baja se debe conocer esta propiedad ya que se presenta debido a sismos, hundimientos o bajo la acción de cargas gravitacionales.

#### 4.2.3.3. Resistencia a corte

Esta propiedad suele evaluarse en prismas de mampostería sujetos a carga de compresión diagonal ya que trabajan como una pieza monolítica al ser sometidos a esfuerzos cortantes, donde se presentan fallas por esfuerzos tangenciales en las juntas, tensión diagonal y fallas parcialmente definidas.

La unidad de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería presenta un ensayo directo para determinar la resistencia a corte del mortero, esto modificando el ensayo a compresión de morteros, que se describe en la norma ASTM C-109. En este ensayo se propone colocar el cubo de ensayo de 2 pulgadas de lado apoyado en sus aristas para producir una falla aproximada a  $45^\circ$  simulando el comportamiento que podría presentar un mortero tanto de pega como de revestimiento.

Figura 17. **Esquema del ensayo de resistencia a corte en morteros de la Unidad de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería**



Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD 2020.

#### **4.2.4. Durabilidad**

La durabilidad del mortero se determina de acuerdo con la resistencia que este presenta a los agentes externos, como daños producidos por contaminación ambiental, bajas temperaturas, penetración de agua, eflorescencias, entre otros. Un mortero con alta resistencia a la compresión será un mortero con buena durabilidad.

#### **4.2.5. Eflorescencia**

Las eflorescencias son unos polvillos blancos y secos resultantes de la precipitación y posterior cristalización de ciertas sales solubles en agua, que se depositan en superficies que han tenido humedad cuando ésta se seca y el líquido se evapora (EROSKI Consumer, 2022).

#### **4.2.6. Apariencia**

Una de las propiedades más importantes del mortero de revestimiento es la apariencia, la cual dependerá de la plasticidad de la mezcla, la calidad de los componentes y la colocación en la superficie.

#### **4.2.7. Permeabilidad**

La permeabilidad es la propiedad que permite la infiltración del agua a través de los poros del mortero, por ello se considera impermeable un mortero cuyo contenido de aire es mínimo.

Un mortero permeable será un mortero con baja resistencia a compresión, pero un buen material de absorción acústica debido a su alto contenido de vacíos.

### 4.3. Normas que deben cumplir los morteros de revestimiento

Para el análisis óptimo de las propiedades del mortero de revestimiento en estado plástico se consideran aplicables los métodos de ensayo descritos en las normas dictadas por la American Society for Testing and Materials (ASTM) o su equivalente para Guatemala, las Normas Técnicas Guatemaltecas (NTG).

- Definición de mortero de revestimiento según NTG 41004.
- Requisitos y especificaciones de los morteros para revestimiento según NTG 41004: La norma NTG 41004 presenta a detalle los requisitos mínimos que deben cumplir los morteros de recubrimiento en base a su espesor.

Tabla X. **Requisitos y especificaciones de los morteros de revestimiento**

Especificación	Clasificación				
	Repello	Repello de alta resistencia	Morteros de revestimiento		
			Fino (Espesor de 0.5 hasta 1 cm)	Medio (Espesor de hasta 2 cm)	Grueso (Espesor de hasta 3 cm)
Resistencia mínima a la compresión a 28 días	25 kg/cm <sup>2</sup>	106 kg/cm <sup>2</sup>	25 kg/cm <sup>2</sup>	25 kg/cm <sup>2</sup>	25 kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia mínima a la adherencia a 28 días	3 kg/cm <sup>2</sup>	3 kg/cm <sup>2</sup>	3 kg/cm <sup>2</sup>	3 kg/cm <sup>2</sup>	3 kg/cm <sup>2</sup>

Continuación de la tabla X.

Fluidez de mesa de flujo de sacudidas	De 16.5 cm a 17.5 cm				
Retención mínima de agua	75 %	75 %	75 %	75 %	75 %
Contenido mínimo de aire	8 %	8 %	8 %	8 %	8 %

Fuente: Comisión Guatemalteca de Normas (2021). *NTG 41104 Morteros de recubrimiento, predosificados y premezclados en seco a base de conglomerantes hidráulicos.*

- Requisitos para la especificación por proporciones según NTG 41050 (ASTM C-270).

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

Mortero	Tipo	Proporciones por volumen (Materiales comandantes)							Proporción de agregado (en condiciones húmedo suelto)	
		Cemento Hidráulico	Cemento para mortero de pega			Cemento de Mampostería				Cal hidratada o de cal pasta
			M	S	N	M	S	N		
Cemento-cal	M	1	-	-	-	-	-	-	Más ¼	
	S	1	-	-	-	-	-	-	De ¼ a ½	
	N	1	-	-	-	-	-	-	De ½ a 1¼	
	O	1	-	-	-	-	-	-	De 1¼ a 2½	
Cemento para mortero de pega	M	1	-	-	1	-	-	-	No menos que 2¼ y no más que 3 veces la suma de los volúmenes separados de materiales cementantes	
	M	-	1	-	-	-	-	-		
	S	½	-	-	1	-	-	-		
	S	-	-	1	-	-	-	-		
	N	-	-	-	1	-	-	-		
Cemento de mampostería	O	-	-	-	1	-	-	-		
	M	1	-	-	-	-	1	-		
	M	-	-	-	-	1	-	-		
	S	½	-	-	-	-	1	-		
	S	-	-	-	-	-	1	-		
N	-	-	-	-	-	-	1	-		
O	-	-	-	-	-	-	1	-		

Fuente: Comisión Guatemalteca de Normas (2012). *NTG 41050 (ASTM C-270) Morteros de pega para unidades de mampostería.*

- Requisitos para la especificación por propiedades según NTG 41050 (ASTM C-270): el cuadro 2 de la norma NTG 41050 (ASTM C-270), presenta las propiedades requeridas para morteros elaborados en laboratorio con una cantidad de agua que produzca un flujo de  $110 \pm 5 \%$ .

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

Mortero	Tipo	Resistencia a la compresión promedio mínima Mpa (lb/pulg <sup>2</sup> )	Retención de agua mínima en porcentaje	Contenido de aire máximo en porcentaje	Proporción de agregado (en condición húmedo suelto)
<b>Cemento-cal</b>	M	17.2 (2,500)	75	12	No menos que 2¼ y no más que 3 veces la suma de los volúmenes separados de materiales cementantes
	S	12.4 (1,800)	75	12	
	N	5.2 (750)	75	14	
	O	2.4 (350)	75	14	
<b>Cemento para mortero de pega</b>	M	17.2 (2,500)	75	12	No menos que 2¼ y no más que 3 veces la suma de los volúmenes separados de materiales cementantes
	S	12.4 (1,800)	75	12	
	N	5.2 (750)	75	14	
	O	2.4 (350)	75	14	
<b>Cemento de mampostería</b>	M	17.2 (2,500)	75	18	No menos que 2¼ y no más que 3 veces la suma de los volúmenes separados de materiales cementantes
	S	12.4 (1,800)	75	18	
	N	5.2 (750)	75	20	
	O	2.4 (350)	75	20	

Fuente: Comisión Guatemalteca de Normas (2012). *NTG 41050 (ASTM C-270) morteros de pega para unidades de mampostería.*

- Determinación del tiempo de fraguado del cemento hidráulico usando la aguja de Vicat según NTG 41003 h10 (ASTM C-191/08).
- Determinación de la retención de agua en morteros a base de cemento hidráulico y cernidos según NTG 41104 h2 (ASTM C-1506).
- Determinación del contenido de aire en los morteros de cemento hidráulico según NTG 41003 h3 (ASTM C-185/15a).

- Determinación de la resistencia a la compresión de mortero de cemento hidráulico usando testigos cúbicos de 50 mm (2 pulg) de lado según NTG 41003 h4 (ASTM C-109).
- Determinación de la resistencia a la flexión de morteros de cemento hidráulico según NTG 41003 h5 (ASTM C-348/14).
- Determinación de la resistencia a tensión en morteros de cemento hidráulico según ASTM C-190.
- Determinación de la resistencia a corte en morteros según método S.R (Sección de Estructuras, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC): un estudio realizado en la sección de estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería presenta un método de ensayo para determinar la resistencia a corte en morteros, haciendo una modificación al ensayo de resistencia a compresión. Se propone utilizar cubos de 50 mm de lado y ser sometidos a esfuerzos de compresión en sus esquinas formando una diagonal de  $45^\circ$ , de esta manera se obtiene el equivalente al valor del esfuerzo de corte realizando el análisis en su diagonal y no en una de las caras como se haría en el ensayo a compresión.
- Determinación de la resistencia a la tracción o adherencia en morteros de cemento hidráulico según NTG 41101 h1.
- Ensayo de impermeabilización en morteros según método S.R (Sección de Estructuras, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC).

## 5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 5.1. Obtención de la materia prima

Las llantas o neumáticos desechados se encuentran principalmente en basureros o rellenos sanitarios, también zonas donde se venden para su reencauchado, e inclusive en pinchazos donde se reúsa el neumático que ya no sirve.

Para obtener la materia prima de los ensayos realizados en este trabajo se contactó con la planta trituradora Hule de Guate, S.A ubicada en la 10ª. Avenida, zona 8 de Guatemala. Esta planta se dedica a la trituración mecánica de neumáticos reencauchados para la obtención del granulado de caucho aproximado de 2 a 3 mm.

Figura 18. **Planta trituradora “Hule de Guate, S.A”**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

### **5.1.1. Método de trituración de llantas utilizado**

La planta Hule de Guate utiliza el método de reciclaje secundario o mecánico, donde, por medio de una máquina trituradora, se obtiene el caucho granulado de 2 a 3 mm. o un polvo de llanta de menor chip.

### **5.1.2. Procedimiento**

El procedimiento utilizado en Hule de Guate es, de manera general el siguiente:

- Se utilizan aproximadamente de 2 a 3 llantas de camión para obtener 1 quintal de caucho granulado.
- La llanta entera se limpia superficialmente para eliminar residuos que puedan dificultar el proceso de triturado.
- La llanta entera se corta en tiras de forma manual para ser enviadas al proceso de trituración.
- Las tiras de llanta son introducidas en la máquina trituradora, la cual, por medio de cuchillas de alta resistencia, corta el caucho en trozos de 80 a 120 mm aproximadamente.
- Los trozos de caucho obtenidos se pasan a un molino granulador donde se obtiene la granulometría buscada (de 2 a 3 mm), o polvo de llanta.
- En la banda que se dirige a la tolva que tiene los molinos granuladores, se encuentran imanes encargados de separar los aceros y textiles de la llanta para dejar únicamente el caucho.
- Finalmente, el caucho granulado se empaca en costales para su venta en presentación de quintal.

Figura 19. **Máquina trituradora para obtener trozos de caucho**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

Figura 20. **Molinos granuladores para obtener el caucho granulado de  
2 a 3 mm**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

## **5.2. Ensayos de laboratorio realizados al polvo de llanta o caucho granulado como agregado fino**

Como el polvo de llanta o caucho granulado funcionará como un sustituto porcentual del agregado fino, este debe ser analizado bajo las mismas normas de ensayo de un agregado fino, verificando su granulometría para determinar su módulo de finura y el diámetro óptimo del grano para utilizar en la mezcla.

### **5.2.1. Análisis granulométrico por tamices de los agregados fino y grueso según NTG 41010 h1 (ASTM C136-14)**

Para la elaboración de los morteros se consideró utilizar un porcentaje volumétrico de arena de río y de caucho granulado, por ello, se hizo el análisis granulométrico a cada elemento para determinar el tamaño del grano a utilizar en la mezcla.

#### **5.2.1.1. Análisis granulométrico realizado a la arena de río**

Se realizó el análisis granulométrico a una muestra de 869.45 g de arena de río con la tamizadora de la sección de Mecánica de Suelos de la Universidad San Carlos de Guatemala, guiándose en la norma NTG 41010 h1 (ASTM C136-14).

Tabla XIII. **Resultados análisis granulométrico arena de río**

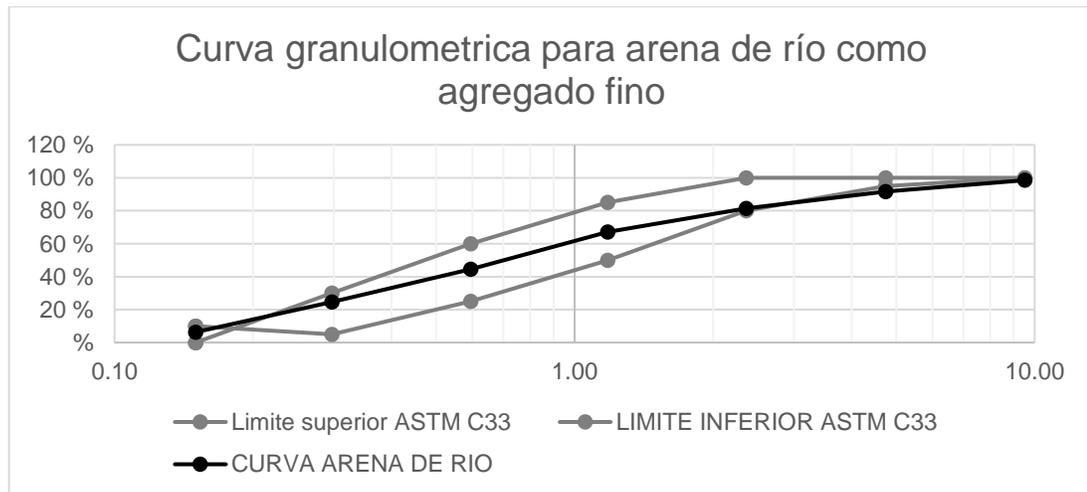
TAMIZ		PESO (g)		PORCENTAJE RETENIDO		PORCENTAJE QUE PASA
Malla	Abertura (mm)	Acumulado	Separado	Separado	Acumulado	
3/8"	9.53	12.76	12.76	1.47 %	1.47 %	98.53 %

Continuación de la tabla XIII.

<b>#4</b>	<b>4.76</b>	<b>72.97</b>	<b>60.21</b>	<b>6.92 %</b>	<b>8.39 %</b>	<b>91.61 %</b>
<b>#8</b>	2.38	161.4	88.43	10.17 %	18.56 %	81.44 %
<b>#16</b>	1.19	285.16	123.76	14.23 %	32.80 %	67.20 %
<b>#30</b>	0.60	481.54	196.38	22.59 %	55.38 %	44.62 %
<b>#50</b>	<b>0.30</b>	<b>655.49</b>	<b>173.95</b>	<b>20.01 %</b>	<b>75.39 %</b>	<b>24.61 %</b>
<b>#100</b>	0.15	814.46	158.97	18.28 %	93.67 %	6.33 %
<b>Fondo</b>		869.47	55.01	6.33 %	100.00 %	0.00 %
		<b>SUMA</b>	869.47	100 %		

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Curva granulométrica de la arena de río en análisis para morteros con caucho granulado**



Fuente: elaboración propia.

#### 5.2.1.2. **Análisis granulométrico realizado al caucho granulado**

Se realizó el análisis granulométrico a una muestra de 294.0 g de arena de río con la tamizadora de la sección de Tecnología de la madera del Centro de

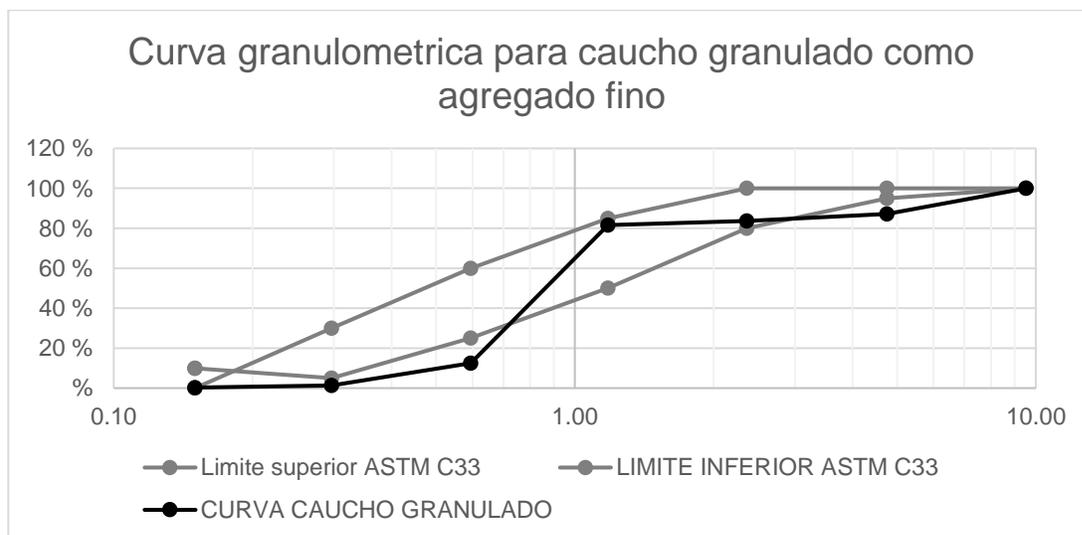
Investigaciones de la Universidad San Carlos de Guatemala, guiándose en la norma NTG 41010 h1 (ASTM C136-14).

Tabla XIV. **Resultados análisis granulométrico al caucho granulado**

TAMIZ		PESO (g)		PORCENTAJE RETENIDO		PORCENTAJE QUE PASA
Malla	Abertura mm	Acumulado	Separado	Separado	Acumulado	
3/8"	9.53	0	0	0.00 %	0.00 %	100.00 %
#4	4.75	37.53	37.53	12.77 %	12.77 %	87.23 %
#8	2.36	48.11	10.58	3.60 %	16.37 %	83.63 %
#16	1.18	53.87	5.76	1.96 %	18.33 %	81.67 %
#30	0.60	257.3	203.43	69.21 %	87.53 %	12.47 %
#50	0.30	289.9	32.6	11.09 %	98.62 %	1.38 %
#100	0.15	293.13	3.23	1.10 %	99.72 %	0.28 %
Fondo	0.00	293.95	0.82	0.28 %	100.00 %	0.00 %
		<b>SUMA</b>	293.95	100 %		

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Curva granulométrica del caucho granulado en análisis para agregar en los morteros**



Fuente: elaboración propia.

### **5.3. Ensayos realizados al mortero de revestimiento con adición de polvo de neumático o caucho granulado**

Para determinar la mejor proporción volumétrica de un mortero de revestimiento con polvo de neumático o caucho granulado se elaboraron diferentes morteros con proporciones variables buscando aquella con mejor resistencia a compresión, corte, adherencia y un buen porcentaje de impermeabilización.

#### **5.3.1. Selección de proporciones para la elaboración de morteros de revestimiento con polvo de neumático**

Para determinar las proporciones de los morteros a ensayar se dividieron los ensayos en 3 fases:

##### **5.3.1.1. Primera fase de selección de proporciones**

En la primera fase se analizan morteros con una mayor cantidad de caucho respecto al cemento buscando obtener una mezcla más ligera y analizar si la cantidad de caucho afecta las resistencias del mortero y si se obtiene un mortero impermeable.

##### **5.3.1.2. Segunda fase de selección de proporciones**

En la segunda fase se analizan morteros con una menor cantidad de caucho que iguala la cantidad de arena en la mezcla, tanto en morteros de cemento como en morteros de cal. Se propuso analizar estos morteros con base en la composición química del cemento y del caucho, ya que analizando la cadena polimérica del caucho se observa que tiene sus átomos colocados de

forma ordenada y periódica, por lo que, al igual que el cemento, se considera un material cristalino lo que hace que se puedan relacionar bien estos materiales, pero, considerando que el caucho o poli isopreno posee 2 dobles enlaces carbono – carbono, se propone utilizar únicamente la mitad de cantidad de caucho respecto a cemento en las mezclas a analizar.

Con base en el análisis granulométrico del caucho, se dividió la muestra de mortero en 3 tamaños:

- Caucho grueso: es el caucho retenido en el tamiz no. 16
- Caucho medio: es el caucho que pasa el tamiz no. 16 y queda retenido en el tamiz no. 30.
- Caucho fino: es el caucho que pasa el tamiz no. 30.

Para una muestra de caucho de 180.4 g se obtuvieron los siguientes porcentajes de caucho grueso, medio y fino:

Tabla XV. **Porcentajes de caucho grueso, medio y fino**

<b>Tipo de caucho</b>	<b>Cantidad (g)</b>	<b>Porcentaje obtenido</b>
<b>Caucho grueso</b>	103.5	57.37
<b>Caucho medio</b>	64.3	35.65
<b>Caucho fino</b>	12.6	6.98
<b>Peso total de la muestra</b>	180.4	100

Fuente: elaboración propia.

Debido a que solamente se obtuvo 7 % de caucho fino se consideró analizar únicamente el caucho grueso y caucho medio, pues obtener el caucho fino de la muestra total no favorece económicamente.

Figura 23. **Caucho fino, medio y grueso**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

### 5.3.1.3. **Tercera fase de selección de proporciones**

Después de analizar la resistencia a la compresión, corte, adherencia y realizar ensayos de impermeabilización a menor escala, se elige la proporción de mortero que tenga los mejores resultados para realizar el ensayo de impermeabilización descrito en la sección 4.3.13 y los ensayos de laboratorio correspondientes para el mortero en estado plástico.

Tabla XVI. **Proporciones utilizadas para ensayos de mortero de revestimiento con polvo de neumático**

Fase	Identificación del mortero	Proporción volumétrica			
		Cemento	Arena	Caucho	Cal
Primera fase	1	1	1	1	-
	2	1	1	1.5	-
	3	1	1	2	-
	4	2	1	1	-

Continuación de la tabla XVI.

<b>Segunda fase</b>	5	1	0.5	0.5G*	-
	6	1	0.5	0.5M*	-
	7	-	0.5	0.5G*	1
	8	-	0.5	0.5M*	1

Nota: M\* se refiere a caucho Mediano  
G\* se refiere a caucho Gueso

Fuente: elaboración propia.

### 5.3.2. Elaboración de morteros de revestimiento

Para elaborar los 8 morteros de revestimiento en estudio, se siguió el mismo procedimiento de mezclado:

#### 5.3.2.1. Procedimiento

- Se selecciona un recipiente de volumen conocido para medir los 3 materiales de la mezcla: Cemento, caucho, arena; o bien, cal, caucho, arena.

Figura 24. Recipiente de volumen conocido



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).

Colección particular. Guatemala.

- El primer material para colocar en el área donde se realizará la mezcla es el caucho, seguido por el cemento o la cal. Se realiza una primera mezcla en seco de estos 2 materiales, buscando que quede lo más homogénea posible.
- El siguiente material para agregar es la arena, esta debe estar seca para no afectar la cantidad de agua de la mezcla, una vez agregados los 3 materiales se mezcla en seco para garantizar que están bien distribuidos.

Figura 25. **Mezcla de los materiales secos (caucho, cemento y arena)**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

- Con el mismo recipiente se agrega agua a la mezcla, considerando que es una mezcla para mortero de revestimiento, debe ser más trabajable que una mezcla para mortero de pega cuidando que no sea demasiado lechosa, esto podría reducir su resistencia.

Figura 26. **Mezcla de mortero de revestimiento**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

### **5.3.3. Resistencia a la compresión en morteros de revestimiento con polvo de neumáticos, usando testigos cúbicos de 50 mm (2 pulg) de lado**

Se elaboraron 24 cubos de 50 mm de lado con las 8 proporciones de mortero, de acuerdo con el procedimiento descrito en la sección 4.3.8.2.2, se ensayaron a las edades correspondientes según indica la norma (7, 14 y 28 días). Durante la aplicación de carga se tomó medida de la deformación de las caras en los ejes “x” y “z”. Se considera la máxima deformación y carga resistida aplicada para determinar el esfuerzo del elemento.

Figura 27. **Elaboración de los cubos de morteros con polvo de neumático**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

### 5.3.3.1. **Datos obtenidos del ensayo a compresión**

Para realizar el ensayo a compresión se utilizó un cilindro hidráulico y bomba manual de uso general con las siguientes especificaciones:

Tabla XVII. **Especificaciones del cilindro hidráulico utilizado en el ensayo a compresión**

Número de modelo	Capacidad máxima (PSI)	Área efectiva (in <sup>2</sup> )	Carrera (in)	Área efectiva (cm <sup>2</sup> )	Carrera (cm)
RC 102	10,000	2.24	2.13	14.45	5.41

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de la Sección de Estructuras. *Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.*

Figura 28. Sistema de ensayo a compresión empleado en la Sección de Estructuras, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

- Cálculo de la carga aplicada

$$F_{cil} \times A_{cil} = \frac{Carga (lb)}{2.205} = Carga (kg)$$

Donde:

$F_{cil}$  = fuerza del cilindro en PSI

$A_{cil}$  = área del cilindro en in<sup>2</sup>

- Cálculo del esfuerzo a compresión

$$f_m = \frac{Carga (kg)}{A_{tr} (cm^2)}$$

Donde:

$f_m$  = esfuerzo a compresión del mortero en kg/cm<sup>2</sup>

$A_{tr}$  = sección transversal del elemento en cm<sup>2</sup>

- Cálculo de las deformaciones en “x” y “z”

$$\varepsilon = \frac{X_n - X_o}{X_o}$$

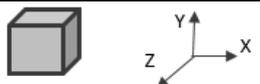
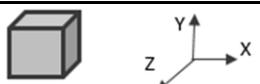
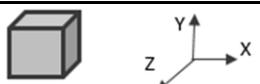
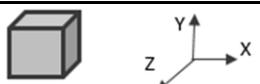
Donde:

$\varepsilon$  = deformación unitaria en cm/cm

$X_n$  = longitud obtenida en la carga aplicada en cm

$X_o$  = longitud inicial en cm

Tabla XVIII. Identificación de los cubos de ensayo a los 7, 14 y 28 días

DATOS OBTENIDOS EN CAMPO																																			
ENSAYO A (DÍAS):		7		días																															
TIPO DE ENSAYO:		ENSAYO A COMPRESIÓN																																	
IDENTIFICACIÓN		PROPORCIÓN				PESO	DIMENSIONES																												
No. elemento	Nombre	Cemento	Arena	Caucho	Cal	Peso (g)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)																										
1	17	1	1	1	-	200.3	5	5	4.9																										
2	27	1	1	1.5	-	188.5	5	5	4.9																										
3	37	1	1	2	-	185.8	5	4.9	4.9																										
4	47	2	1	1	-	209.3	5	5	5																										
5	57	1	0.5	0.5	-	216.6	5.02	5	5.05																										
6	67	1	0.5	0.5	-	205.2	5.08	5	5.08																										
7	77	-	0.5	0.5	1	149.2	4.9	5	4.9																										
8	87	-	0.5	0.5	1	161.2	4.9	5	4.9																										
<table border="0" style="width:100%; border:none;"> <tr> <td style="width:10%;"></td> </tr> <tr> <td colspan="2">ENSAYO A (DÍAS):</td> <td colspan="2">14</td> <td colspan="2">días</td> <td colspan="4" rowspan="2">  </td> </tr> <tr> <td colspan="2">TIPO DE ENSAYO:</td> <td colspan="4">ENSAYO A COMPRESIÓN</td> </tr> </table>																				ENSAYO A (DÍAS):		14		días						TIPO DE ENSAYO:		ENSAYO A COMPRESIÓN			
ENSAYO A (DÍAS):		14		días																															
TIPO DE ENSAYO:		ENSAYO A COMPRESIÓN																																	
IDENTIFICACIÓN		PROPORCIÓN				PESO	DIMENSIONES																												
No. elemento	Nombre	Cemento	Arena	Caucho	Cal	Peso (g)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)																										
1	114	1	1	1	-	210.8	4.9	5	5																										
2	214	1	1	1.5	-	200.6	4.9	4.9	5																										
3	314	1	1	2	-	196.6	4.9	5	5																										
4	414	2	1	1	-	214.2	4.9	5	4.9																										
5	514	1	0.5	0.5	-	221.3	4.9	4.9	4.9																										
6	614	1	0.5	0.5	-	211.1	4.9	4.9	4.9																										
7	714	-	0.5	0.5	1	139.2	4.9	5	4.9																										
8	814	-	0.5	0.5	1	152.6	4.9	5	4.9																										
<table border="0" style="width:100%; border:none;"> <tr> <td style="width:10%;"></td> </tr> <tr> <td colspan="2">ENSAYO A (DÍAS):</td> <td colspan="2">28</td> <td colspan="2">días</td> <td colspan="4" rowspan="2">  </td> </tr> <tr> <td colspan="2">TIPO DE ENSAYO:</td> <td colspan="4">ENSAYO A COMPRESIÓN</td> </tr> </table>																				ENSAYO A (DÍAS):		28		días						TIPO DE ENSAYO:		ENSAYO A COMPRESIÓN			
ENSAYO A (DÍAS):		28		días																															
TIPO DE ENSAYO:		ENSAYO A COMPRESIÓN																																	
IDENTIFICACIÓN		PROPORCIÓN				PESO	DIMENSIONES																												
No. elemento	Nombre	Cemento	Arena	Caucho	Cal	Peso (g)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)																										
1	128	1	1	1	-	214.2	4.9	5	4.9																										
2	228	1	1	1.5	-	200.8	4.9	5	4.9																										
3	328	1	1	2	-	200.5	5	4.9	4.9																										
4	428	2	1	1	-	214.5	5	5	5																										
5	528	1	0.5	0.5	-	223.1	5	5	4.9																										
6	628	1	0.5	0.5	-	214.7	5	5	5																										
7	728	-	0.5	0.5	1	143.1	5	4.9	5																										
8	828	-	0.5	0.5	1	154.7	5	5	5																										

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. Datos esfuerzo – deformación para elementos de ensayo a compresión a los 7 días

DATOS ESFUERZO-DEFORMACIÓN ENSAYOS A 7 DÍAS											
Elemento:	17	F <sub>cil</sub>	A <sub>cil</sub>	Carga (lb)	Carga (kg)	X (cm)	Z (cm)	A <sub>tr</sub>	f <sub>m</sub>	ε <sub>x</sub>	ε <sub>z</sub>
		50	2.24	112	50.79	5	4.9	24.5	2.07	0.00	0.00
		100	2.24	224	101.59	5	4.9	24.5	4.15	0.00	0.00
		150	2.24	336	152.38	5	4.9	24.5	6.22	0.00	0.00
		200	2.24	448	203.17	5	4.9	24.5	8.29	0.00	0.00
		250	2.24	560	253.97	5	4.9	24.5	10.37	0.00	0.00
		300	2.24	672	304.76	5	4.9	24.5	12.44	0.00	0.00
		350	2.24	784	355.56	5	4.9	24.5	14.51	0.00	0.00
		400	2.24	896	406.35	5	4.9	24.5	16.59	0.00	0.00
		450	2.24	1008	457.14	5	4.9	24.5	18.66	0.00	0.00
		500	2.24	1120	507.94	5	4.9	24.5	20.73	0.00	0.00
		550	2.24	1232	558.73	5	4.9	24.5	22.81	0.00	0.00
		600	2.24	1344	609.52	5	5	25	24.38	0.00	0.02
		650	2.24	1456	660.32	5.1	5	25.5	25.89	0.02	0.02
		700	2.24	1568	711.11	5.1	5	25.5	27.89	0.02	0.02
		750	2.24	1680	761.90	5.1	5.1	26.01	29.29	0.02	0.04
	800	2.24	1792	812.70	5.2	5.2	27.04	30.06	0.04	0.06	
Elemento:	27	F <sub>cil</sub>	A <sub>cil</sub>	Carga (lb)	Carga (kg)	X (cm)	Z (cm)	A <sub>tr</sub>	f <sub>m</sub>	ε <sub>x</sub>	ε <sub>z</sub>
		50	2.24	112	50.79	5	4.9	24.50	2.07	0	0
		100	2.24	224	101.59	5	4.9	24.50	4.15	0	0
		150	2.24	336	152.38	5	4.9	24.50	6.22	0	0
		200	2.24	448	203.17	5	4.9	24.50	8.29	0	0
		250	2.24	560	253.97	5	4.9	24.50	10.37	0	0
		300	2.24	672	304.76	5	5	25.00	12.19	0	0.020
		350	2.24	784	355.56	5	5	25.00	14.22	0	0.020
		400	2.24	896	406.35	5	5	25.00	16.25	0	0.020
		450	2.24	1008	457.14	5.1	5.1	26.01	17.58	0.02	0.041
		500	2.24	1120	507.94	5.1	5.1	26.01	19.53	0.02	0.041
		550	2.24	1232	558.73	5.2	5.1	26.52	21.07	0.04	0.041
		600	2.24	1344	609.52	5.4	5.2	28.08	21.71	0.08	0.061
	Elemento:	37	F <sub>cil</sub>	A <sub>cil</sub>	Carga (lb)	Carga (kg)	X (cm)	Z (cm)	A <sub>tr</sub>	f <sub>m</sub>	ε <sub>x</sub>
		50	2.24	112	50.79	5	4.9	24.50	2.07	0	0
		100	2.24	224	101.59	5	4.9	24.50	4.15	0	0
		150	2.24	336	152.38	5	4.9	24.50	6.22	0	0
		200	2.24	448	203.17	5	4.9	24.50	8.29	0	0
		250	2.24	560	253.97	5	4.9	24.50	10.37	0	0
		300	2.24	672	304.76	5.1	4.9	24.99	12.20	0.02	0
		350	2.24	784	355.56	5.1	5	25.50	13.94	0.02	0.020
		400	2.24	896	406.35	5.2	5.1	26.52	15.32	0.04	0.041
		450	2.24	1008	457.14	5.3	5.2	27.56	16.59	0.06	0.061

Continuación de la tabla XIX.

Elemento:	47	F <sub>cil</sub>	A <sub>cil</sub>	Carga (lb)	Carga (kg)	X (cm)	Z (cm)	A <sub>tr</sub>	f <sub>m</sub>	ε <sub>x</sub>	ε <sub>z</sub>
	50	2.24	112	50.79	5	4.9	24.50	2.07	0	0.02	
	100	2.24	224	101.59	5	4.9	24.50	4.15	0	0.02	
	150	2.24	336	152.38	5	4.9	24.50	6.22	0	0.02	
	200	2.24	448	203.17	5	5	25.00	8.13	0	0	
	250	2.24	560	253.97	5	5	25.00	10.16	0	0	
	300	2.24	672	304.76	5	5	25.00	12.19	0	0	
	350	2.24	784	355.56	5	5	25.00	14.22	0	0	
	400	2.24	896	406.35	5	5	25.00	16.25	0	0	
	450	2.24	1008	457.14	5	5	25.00	18.29	0	0	
	500	2.24	1120	507.94	5.5	5.2	28.60	17.76	0.1	0.04	

Elemento:	57	F <sub>cil</sub>	A <sub>cil</sub>	Carga (lb)	Carga (kg)	X (cm)	Z (cm)	A <sub>tr</sub>	f <sub>m</sub>	ε <sub>x</sub>	ε <sub>z</sub>
	25	2.24	56	25.40	5.02	5.05	25.35	1.00	0.00	0.00	
	50	2.24	112	50.79	5.02	5.05	25.35	2.00	0.00	0.00	
	100	2.24	224	101.59	5.12	5.17	26.47	3.84	0.020	0.024	
	150	2.24	336	152.38	5.12	5.17	26.47	5.76	0.020	0.024	
	200	2.24	448	203.17	5.12	5.17	26.47	7.68	0.020	0.024	
	250	2.24	560	253.97	5.13	5.17	26.52	9.58	0.022	0.024	
	300	2.24	672	304.76	5.13	5.17	26.52	11.49	0.022	0.024	
	350	2.24	784	355.56	5.13	5.17	26.52	13.41	0.022	0.024	
	400	2.24	896	406.35	5.06	5.20	26.31	15.44	0.008	0.030	
	450	2.24	1008	457.14	5.08	5.27	26.77	17.08	0.012	0.044	
	500	2.24	1120	507.94	5.10	5.18	26.42	19.23	0.016	0.026	
	550	2.24	1232	558.73	5.09	5.07	25.81	21.65	0.014	0.004	
	600	2.24	1344	609.52	5.05	5.05	25.50	23.90	0.006	0.000	
	650	2.24	1456	660.32	5.09	5.20	26.47	24.95	0.014	0.030	
	700	2.24	1568	711.11	5.04	5.22	26.31	27.03	0.004	0.034	
	750	2.24	1680	761.90	5.05	5.31	26.82	28.41	0.006	0.051	
	800	2.24	1792	812.70	5.06	5.15	26.06	31.19	0.008	0.020	
	850	2.24	1904	863.49	5.11	5.10	26.06	33.13	0.018	0.010	
	900	2.24	2016	914.29	5.15	5.22	26.88	34.01	0.026	0.034	
	950	2.24	2128	965.08	5.24	5.31	27.82	34.68	0.044	0.051	
	1000	2.24	2240	1015.87	5.27	5.20	27.40	37.07	0.050	0.030	
	1050	2.24	2352	1066.67	5.25	5.20	27.30	39.07	0.046	0.030	
	1100	2.24	2464	1117.46	5.15	5.20	26.78	41.73	0.026	0.030	
	1150	2.24	2576	1168.25	5.22	5.22	27.25	42.87	0.040	0.034	
	1200	2.24	2688	1219.05	5.22	5.22	27.25	44.74	0.040	0.034	
	1250	2.24	2800	1269.84	5.20	5.22	27.14	46.78	0.036	0.034	
	1300	2.24	2912	1320.63	5.20	5.22	27.14	48.65	0.036	0.034	
	1350	2.24	3024	1371.43	5.20	5.30	27.56	49.76	0.036	0.050	
1400	2.24	3136	1422.22	5.20	5.30	27.56	51.60	0.036	0.050		
1450	2.24	3248	1473.02	5.25	5.32	27.93	52.74	0.046	0.053		
1500	2.24	3360	1523.81	5.25	5.33	27.98	54.46	0.046	0.055		
1550	2.24	3472	1574.60	5.30	5.35	28.36	55.53	0.056	0.059		

Continuación de la tabla XIX.

Elemento:	67	F <sub>cil</sub>	A <sub>cil</sub>	Carga (lb)	Carga (kg)	X (cm)	Z (cm)	A <sub>tr</sub>	f <sub>m</sub>	ε <sub>x</sub>	ε <sub>z</sub>
	50	2.24	112	50.79	5.08	5.08	25.81	1.97	0.000	0.000	
	100	2.24	224	101.59	5.08	5.08	25.81	3.94	0.000	0.000	
	200	2.24	448	203.17	5.08	5.08	25.81	7.87	0.000	0.000	
	300	2.24	672	304.76	5.08	5.08	25.81	11.81	0.000	0.000	
	400	2.24	896	406.35	5.10	5.15	26.27	15.47	0.004	0.014	
	500	2.24	1120	507.94	5.10	5.07	25.86	19.64	0.004	0.002	
	600	2.24	1344	609.52	5.13	5.15	26.42	23.07	0.010	0.014	
	650	2.24	1456	660.32	5.10	5.20	26.52	24.90	0.004	0.024	
	700	2.24	1568	711.11	5.18	5.20	26.94	26.40	0.020	0.024	
	750	2.24	1680	761.90	5.20	5.22	27.14	28.07	0.024	0.028	
	800	2.24	1792	812.70	5.20	5.25	27.30	29.77	0.024	0.033	
	850	2.24	1904	863.49	5.20	5.27	27.40	31.51	0.024	0.037	
	900	2.24	2016	914.29	5.17	5.22	26.99	33.88	0.018	0.028	
	950	2.24	2128	965.08	5.08	5.10	25.91	37.25	0.000	0.004	
	1000	2.24	2240	1015.87	5.11	5.09	26.01	39.06	0.006	0.002	
	1100	2.24	2464	1117.46	5.11	5.10	26.06	42.88	0.006	0.004	
	1200	2.24	2688	1219.05	5.15	5.20	26.78	45.52	0.014	0.024	
1300	2.24	2912	1320.63	5.15	5.17	26.63	49.60	0.014	0.018		
1400	2.24	3136	1422.22	5.15	5.20	26.78	53.11	0.014	0.024		
1500	2.24	3360	1523.81	5.27	5.27	27.77	54.87	0.037	0.037		
1600	2.24	3584	1625.40	5.60	5.37	30.07	54.05	0.102	0.057		
Elemento:	77	F <sub>cil</sub>	A <sub>cil</sub>	Carga (lb)	Carga (kg)	X (cm)	Z (cm)	A <sub>tr</sub>	f <sub>m</sub>	ε <sub>x</sub>	ε <sub>z</sub>
	25	2.24	56	25.40	4.90	4.90	24.01	1.06	0.02	0.02	
	50	2.24	112	50.79	4.90	5.00	24.50	2.07	0.02	0	
	75	2.24	168	76.19	4.90	5.00	24.50	3.11	0.02	0	
	100	2.24	224	101.59	5.10	5.50	28.05	3.62	0.02	0.1	
Elemento:	87	F <sub>cil</sub>	A <sub>cil</sub>	Carga (lb)	Carga (kg)	X (cm)	Z (cm)	A <sub>tr</sub>	f <sub>m</sub>	ε <sub>x</sub>	ε <sub>z</sub>
	25	2.24	56	25.40	4.9	4.9	24.01	1.06	0	0	
	50	2.24	112	50.79	4.9	4.9	24.01	2.12	0	0	
	75	2.24	168	76.19	4.9	4.9	24.01	3.17	0	0	
	100	2.24	224	101.59	4.9	5	24.50	4.15	0	0.02	
	150	2.24	336	152.38	6.0	5.4	32.40	4.70	0.22	0.10	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. Datos esfuerzo – deformación para elementos de ensayo a compresión a los 14 días

DATOS ESFUERZO-DEFORMACIÓN ENSAYOS A 14 DÍAS											
Elemento:	114	F <sub>cil</sub>	A <sub>cil</sub>	Carga (lb)	Carga (kg)	X (cm)	Z (cm)	A <sub>tr</sub>	f <sub>m</sub>	ε <sub>x</sub>	ε <sub>z</sub>
		25	2.24	56	25.40	4.90	5.00	24.50	1.04	0.00	0.00
		50	2.24	112	50.79	4.90	5.00	24.50	2.07	0.00	0.00
		100	2.24	224	101.59	4.90	5.00	24.50	4.15	0.00	0.00
		150	2.24	336	152.38	4.90	5.00	24.50	6.22	0.00	0.00
		200	2.24	448	203.17	4.90	5.00	24.50	8.29	0.00	0.00
		250	2.24	560	253.97	4.90	5.00	24.50	10.37	0.00	0.00
		300	2.24	672	304.76	4.90	5.00	24.50	12.44	0.00	0.00
		350	2.24	784	355.56	4.90	5.00	24.50	14.51	0.00	0.00
		400	2.24	896	406.35	4.90	5.00	24.50	16.59	0.00	0.00
		450	2.24	1008	457.14	4.90	5.00	24.50	18.66	0.00	0.00
		500	2.24	1120	507.94	4.90	5.00	24.50	20.73	0.00	0.00
		550	2.24	1232	558.73	4.90	5.00	24.50	22.81	0.00	0.00
		600	2.24	1344	609.52	4.90	5.00	24.50	24.88	0.00	0.00
		650	2.24	1456	660.32	4.90	5.00	24.50	26.95	0.00	0.00
		700	2.24	1568	711.11	4.90	5.00	24.50	29.02	0.00	0.00
	750	2.24	1680	761.90	4.90	5.00	24.50	31.10	0.00	0.00	
	800	2.24	1792	812.70	5.00	5.00	25.00	32.51	0.02	0.00	
	850	2.24	1904	863.49	5.00	5.10	25.50	33.86	0.02	0.02	
	900	2.24	2016	914.29	5.10	5.30	27.03	33.82	0.04	0.06	
Elemento:	214	F <sub>cil</sub>	A <sub>cil</sub>	Carga (lb)	Carga (kg)	X (cm)	Z (cm)	A <sub>tr</sub>	f <sub>m</sub>	ε <sub>x</sub>	ε <sub>z</sub>
		25	2.24	56	25.40	4.90	5.00	24.50	1.04	0.00	0.00
		50	2.24	112	50.79	4.90	5.00	24.50	2.07	0.00	0.00
		100	2.24	224	101.59	4.90	5.00	24.50	4.15	0.00	0.00
		150	2.24	336	152.38	4.90	5.00	24.50	6.22	0.00	0.00
		200	2.24	448	203.17	4.90	5.00	24.50	8.29	0.00	0.00
		250	2.24	560	253.97	4.90	5.00	24.50	10.37	0.00	0.00
		300	2.24	672	304.76	4.90	5.00	24.50	12.44	0.00	0.00
		350	2.24	784	355.56	4.90	5.10	24.99	14.23	0.00	0.02
		400	2.24	896	406.35	5.00	5.10	25.50	15.94	0.02	0.02
		450	2.24	1008	457.14	5.00	5.10	25.50	17.93	0.02	0.02
		500	2.24	1120	507.94	5.00	5.10	25.50	19.92	0.02	0.02
		550	2.24	1232	558.73	5.10	5.20	26.52	21.07	0.04	0.04
		600	2.24	1344	609.52	5.10	5.20	26.52	22.98	0.04	0.04
		650	2.24	1456	660.32	5.10	5.30	27.03	24.43	0.04	0.06
		700	2.24	1568	711.11	5.20	5.30	27.56	25.80	0.06	0.06
Elemento:	314	F <sub>cil</sub>	A <sub>cil</sub>	Carga (lb)	Carga (kg)	X (cm)	Z (cm)	A <sub>tr</sub>	f <sub>m</sub>	ε <sub>x</sub>	ε <sub>z</sub>
		25	2.24	56	25.40	4.9	5	24.50	1.04	0.00	0.00
		50	2.24	112	50.79	4.9	5	24.50	2.07	0.00	0.00
		100	2.24	224	101.59	4.9	5	24.50	4.15	0.00	0.00
		150	2.24	336	152.38	4.9	5	24.50	6.22	0.00	0.00
		200	2.24	448	203.17	4.9	5	24.50	8.29	0.00	0.00
		250	2.24	560	253.97	4.9	5	24.50	10.37	0.00	0.00
		300	2.24	672	304.76	4.9	5	24.50	12.44	0.00	0.00
		350	2.24	784	355.56	5	5	25.00	14.22	0.02	0.00
		400	2.24	896	406.35	5	5	25.00	16.25	0.02	0.00
		450	2.24	1008	457.14	5	5	25.00	18.29	0.02	0.00
	500	2.24	1120	507.94	5.1	5.1	26.01	19.53	0.04	0.02	

Continuación de la tabla XX.

Elemento:	414	F <sub>cil</sub>	A <sub>cil</sub>	Carga (lb)	Carga (kg)	X (cm)	Z (cm)	A <sub>tr</sub>	f <sub>m</sub>	ε <sub>x</sub>	ε <sub>z</sub>
	25	2.24	56	25.40	4.9	4.9	24.01	1.06	0.00	0.00	
	50	2.24	112	50.79	4.9	4.9	24.01	2.12	0.00	0.00	
	100	2.24	224	101.59	4.9	4.9	24.01	4.23	0.00	0.00	
	150	2.24	336	152.38	4.9	4.9	24.01	6.35	0.00	0.00	
	200	2.24	448	203.17	4.9	5	24.5	8.29	0.00	0.02	
	250	2.24	560	253.97	4.9	5	24.5	10.37	0.00	0.02	
	300	2.24	672	304.76	4.9	5	24.5	12.44	0.00	0.02	
	350	2.24	784	355.56	4.9	5	24.5	14.51	0.00	0.02	
	400	2.24	896	406.35	4.9	5	24.5	16.59	0.00	0.02	
	450	2.24	1008	457.14	4.9	5	24.5	18.66	0.00	0.02	
	500	2.24	1120	507.94	4.9	5.1	24.99	20.33	0.00	0.04	
	550	2.24	1232	558.73	5	5.1	25.5	21.91	0.02	0.04	
	600	2.24	1344	609.52	5.1	5.3	27.03	22.55	0.04	0.08	
Elemento:	514	F <sub>cil</sub>	A <sub>cil</sub>	Carga (lb)	Carga (kg)	X (cm)	Z (cm)	A <sub>tr</sub>	f <sub>m</sub>	ε <sub>x</sub>	ε <sub>z</sub>
	50	2.24	112	50.79	4.9	4.9	24.01	2.12	0.00	0.00	
	100	2.24	224	101.59	4.9	4.9	24.01	4.23	0.00	0.00	
	200	2.24	448	203.17	4.9	4.9	24.01	8.46	0.00	0.00	
	300	2.24	672	304.76	4.9	4.9	24.01	12.69	0.00	0.00	
	400	2.24	896	406.35	4.9	4.9	24.01	16.92	0.00	0.00	
	500	2.24	1120	507.94	4.9	4.9	24.01	21.16	0.00	0.00	
	600	2.24	1344	609.52	4.9	4.9	24.01	25.39	0.00	0.00	
	700	2.24	1568	711.11	4.9	4.9	24.01	29.62	0.00	0.00	
	800	2.24	1792	812.70	4.9	4.9	24.01	33.85	0.00	0.00	
	900	2.24	2016	914.29	4.9	4.9	24.01	38.08	0.00	0.00	
	1000	2.24	2240	1015.87	4.9	4.9	24.01	42.31	0.00	0.00	
	1100	2.24	2464	1117.46	5	4.9	24.50	45.61	0.02	0.00	
	1200	2.24	2688	1219.05	5.1	4.9	24.99	48.78	0.04	0.00	
	1300	2.24	2912	1320.63	5.1	5	25.50	51.79	0.04	0.02	
	1400	2.24	3136	1422.22	5.1	5	25.50	55.77	0.04	0.02	
	1500	2.24	3360	1523.81	5.1	5	25.50	59.76	0.04	0.02	
	1600	2.24	3584	1625.40	5.1	5	25.50	63.74	0.04	0.02	
	1700	2.24	3808	1726.98	5.1	5	25.50	67.72	0.04	0.02	
1800	2.24	4032	1828.57	5.2	5	26.00	70.33	0.06	0.02		
1850	2.24	4144	1879.37	5.3	5.4	28.62	65.67	0.08	0.10		
Elemento:	614	F <sub>cil</sub>	A <sub>cil</sub>	Carga (lb)	Carga (kg)	X (cm)	Z (cm)	A <sub>tr</sub>	f <sub>m</sub>	ε <sub>x</sub>	ε <sub>z</sub>
	50	2.24	112	50.79	4.9	4.9	24.01	2.12	0.00	0.00	
	100	2.24	224	101.59	4.9	4.9	24.01	4.23	0.00	0.00	
	200	2.24	448	203.17	4.9	4.9	24.01	8.46	0.00	0.00	
	300	2.24	672	304.76	4.9	4.9	24.01	12.69	0.00	0.00	
	400	2.24	896	406.35	4.9	4.9	24.01	16.92	0.00	0.00	
	500	2.24	1120	507.94	4.9	4.9	24.01	21.16	0.00	0.00	
	600	2.24	1344	609.52	4.9	4.9	24.01	25.39	0.00	0.00	
	700	2.24	1568	711.11	4.9	4.9	24.01	29.62	0.00	0.00	
	800	2.24	1792	812.70	4.9	4.9	24.01	33.85	0.00	0.00	
	900	2.24	2016	914.29	5	5	25.00	36.57	0.02	0.02	
	1000	2.24	2240	1015.87	5	5	25.00	40.63	0.02	0.02	
	1100	2.24	2464	1117.46	5	5	25.00	44.70	0.02	0.02	
	1200	2.24	2688	1219.05	4.9	5	24.50	49.76	0.00	0.02	
	1300	2.24	2912	1320.63	4.9	4.9	24.01	55.00	0.00	0.00	
	1400	2.24	3136	1422.22	4.9	5	24.50	58.05	0.00	0.02	
	1500	2.24	3360	1523.81	4.9	5	24.50	62.20	0.00	0.02	
	1600	2.24	3584	1625.40	4.9	5.1	24.99	65.04	0.00	0.04	
	1700	2.24	3808	1726.98	5	5.1	25.50	67.72	0.02	0.04	
	1800	2.24	4032	1828.57	5.2	5.1	26.52	68.95	0.06	0.04	
1900	2.24	4256	1930.16	5.7	6	34.20	56.44	0.16	0.22		

Continuación de la tabla XX.

Elemento:	714	F <sub>cil</sub>	A <sub>cil</sub>	Carga (lb)	Carga (kg)	X (cm)	Z (cm)	A <sub>tr</sub>	f <sub>m</sub>	ε <sub>x</sub>	ε <sub>z</sub>
	25	2.24	56	25.40	4.9	4.9	24.01	1.06	0.00	0.00	
	50	2.24	112	50.79	4.9	4.9	24.01	2.12	0.00	0.00	
	75	2.24	168	76.19	4.9	5	24.50	3.11	0.00	0.02	
	100	2.24	224	101.59	5.1	5	25.50	3.98	0.04	0.02	
	125	2.24	280	126.98	5.2	5.4	28.08	4.52	0.06	0.10	
Elemento:	814	F <sub>cil</sub>	A <sub>cil</sub>	Carga (lb)	Carga (kg)	X (cm)	Z (cm)	A <sub>tr</sub>	f <sub>m</sub>	ε <sub>x</sub>	ε <sub>z</sub>
	25	2.24	56	25.40	4.9	4.9	24.01	1.06	0.00	0.00	
	50	2.24	112	50.79	4.9	4.9	24.01	2.12	0.00	0.00	
	75	2.24	168	76.19	4.9	4.9	24.01	3.17	0.00	0.00	
	100	2.24	224	101.59	4.9	4.9	24.01	4.23	0.00	0.00	
	125	2.24	280	126.98	4.9	5	24.50	5.18	0.00	0.02	
	150	2.24	336	152.38	5.4	5.7	30.78	4.95	0.10	0.16	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Datos esfuerzo – deformación para elementos de ensayo a compresión a los 28 días**

DATOS ESFUERZO-DEFORMACIÓN ENSAYOS A 28 DÍAS											
Elemento:	128	F <sub>cil</sub>	A <sub>cil</sub>	Carga (lb)	Carga (kg)	X (cm)	Z (cm)	A <sub>tr</sub>	f <sub>m</sub>	ε <sub>x</sub>	ε <sub>z</sub>
	100	2.24	224	101.59	4.9	4.9	24.01	4.23	0.00	0.00	
	200	2.24	448	203.17	4.9	4.9	24.01	8.46	0.00	0.00	
	300	2.24	672	304.76	4.9	4.9	24.01	12.69	0.00	0.00	
	400	2.24	896	406.35	4.9	4.9	24.01	16.92	0.00	0.00	
	500	2.24	1120	507.94	4.9	4.9	24.01	21.16	0.00	0.00	
	600	2.24	1344	609.52	4.9	4.9	24.01	25.39	0.00	0.00	
	700	2.24	1568	711.11	4.9	4.9	24.01	29.62	0.00	0.00	
	800	2.24	1792	812.70	4.9	4.9	24.01	33.85	0.00	0.00	
	900	2.24	2016	914.29	4.9	4.9	24.01	38.08	0.00	0.00	
	1000	2.24	2240	1015.87	4.9	5	24.50	41.46	0.00	0.02	
	1100	2.24	2464	1117.46	5.1	5.4	27.54	40.58	0.04	0.10	

Continuación de la tabla XXI.

Elemento:	228	F <sub>cil</sub>	A <sub>cil</sub>	Carga (lb)	Carga (kg)	X (cm)	Z (cm)	A <sub>tr</sub>	f <sub>m</sub>	ε <sub>x</sub>	ε <sub>z</sub>
	50	2.24	112	50.79	4.9	4.9	24.01	2.12	0.00	0.00	
	100	2.24	224	101.59	4.9	4.9	24.01	4.23	0.00	0.00	
	200	2.24	448	203.17	4.9	4.9	24.01	8.46	0.00	0.00	
	300	2.24	672	304.76	4.9	4.9	24.01	12.69	0.00	0.00	
	400	2.24	896	406.35	4.9	4.9	24.01	16.92	0.00	0.00	
	500	2.24	1120	507.94	4.9	4.9	24.01	21.16	0.00	0.00	
	600	2.24	1344	609.52	4.9	5	24.50	24.88	0.00	0.02	
	700	2.24	1568	711.11	4.9	5	24.50	29.02	0.00	0.02	
	800	2.24	1792	812.70	5	5.3	26.50	30.67	0.02	0.08	
	850	2.24	1904	863.49	5.1	5.8	29.58	29.19	0.04	0.18	
Elemento:	328	F <sub>cil</sub>	A <sub>cil</sub>	Carga (lb)	Carga (kg)	X (cm)	Z (cm)	A <sub>tr</sub>	f <sub>m</sub>	ε <sub>x</sub>	ε <sub>z</sub>
	50	2.24	112	50.79	5	4.9	24.50	2.07	0.00	0.00	
	100	2.24	224	101.59	5	4.9	24.50	4.15	0.00	0.00	
	150	2.24	336	152.38	5	4.9	24.50	6.22	0.00	0.00	
	200	2.24	448	203.17	5	4.9	24.50	8.29	0.00	0.00	
	250	2.24	560	253.97	5	4.9	24.50	10.37	0.00	0.00	
	300	2.24	672	304.76	5	5	25.00	12.19	0.00	0.02	
	350	2.24	784	355.56	5	5	25.00	14.22	0.00	0.02	
	400	2.24	896	406.35	5	5	25.00	16.25	0.00	0.02	
	450	2.24	1008	457.14	5	5	25.00	18.29	0.00	0.02	
	500	2.24	1120	507.94	5	5	25.00	20.32	0.00	0.02	
	550	2.24	1232	558.73	5	5	25.00	22.35	0.00	0.02	
	600	2.24	1344	609.52	5.1	5.2	26.52	22.98	0.02	0.06	
	650	2.24	1456	660.32	5.3	5.3	28.09	23.51	0.06	0.08	
	Elemento:	428	F <sub>cil</sub>	A <sub>cil</sub>	Carga (lb)	Carga (kg)	X (cm)	Z (cm)	A <sub>tr</sub>	f <sub>m</sub>	ε <sub>x</sub>
	50	2.24	112	50.79	4.9	4.9	24.01	2.12	0.02	0.02	
	100	2.24	224	101.59	4.9	4.9	24.01	4.23	0.02	0.02	
	200	2.24	448	203.17	4.9	4.9	24.01	8.46	0.02	0.02	
	300	2.24	672	304.76	4.9	4.9	24.01	12.69	0.02	0.02	
	400	2.24	896	406.35	4.9	4.9	24.01	16.92	0.02	0.02	
	500	2.24	1120	507.94	4.9	4.9	24.01	21.16	0.02	0.02	
	600	2.24	1344	609.52	4.9	4.9	24.01	25.39	0.02	0.02	
	700	2.24	1568	711.11	4.9	5	24.50	29.02	0.02	0.00	
	800	2.24	1792	812.70	5	5.2	26.00	31.26	0.00	0.04	
	850	2.24	1904	863.49	5.2	5.3	27.56	31.33	0.04	0.06	
Elemento:	528	F <sub>cil</sub>	A <sub>cil</sub>	Carga (lb)	Carga (kg)	X (cm)	Z (cm)	A <sub>tr</sub>	f <sub>m</sub>	ε <sub>x</sub>	ε <sub>z</sub>
	25	2.24	56	25.40	4.9	5	24.50	1.04	0.02	0.02	
	100	2.24	224	101.59	4.9	5	24.50	4.15	0.02	0.02	
	200	2.24	448	203.17	4.9	5	24.50	8.29	0.02	0.02	
	300	2.24	672	304.76	4.9	5	24.50	12.44	0.02	0.02	
	400	2.24	896	406.35	4.9	5	24.50	16.59	0.02	0.02	
	500	2.24	1120	507.94	5	5	25.00	20.32	0.00	0.02	
	600	2.24	1344	609.52	5	5	25.00	24.38	0.00	0.02	
	700	2.24	1568	711.11	5	5	25.00	28.44	0.00	0.02	
	800	2.24	1792	812.70	5	5	25.00	32.51	0.00	0.02	
	900	2.24	2016	914.29	5	5	25.00	36.57	0.00	0.02	
	1000	2.24	2240	1015.87	5	5	25.00	40.63	0.00	0.02	
1100	2.24	2464	1117.46	5	5	25.00	44.70	0.00	0.02		

Continuación de la tabla XXI.

1200	2.24	2688	1219.05	5	5	25.00	48.76	0.00	0.02		
1300	2.24	2912	1320.63	4.9	5	24.50	53.90	0.02	0.02		
1400	2.24	3136	1422.22	4.9	5	24.50	58.05	0.02	0.02		
1500	2.24	3360	1523.81	4.9	5	24.50	62.20	0.02	0.02		
1600	2.24	3584	1625.40	5	5	25.00	65.02	0.00	0.02		
1700	2.24	3808	1726.98	5	5	25.00	69.08	0.00	0.02		
1800	2.24	4032	1828.57	5.2	5.4	28.08	65.12	0.04	0.10		
<b>Elemento:</b>	<b>628</b>	<b>F<sub>cil</sub></b>	<b>A<sub>cil</sub></b>	<b>Carga (lb)</b>	<b>Carga (kg)</b>	<b>X (cm)</b>	<b>Z (cm)</b>	<b>A<sub>tr</sub></b>	<b>f<sub>m</sub></b>	<b>ε<sub>x</sub></b>	<b>ε<sub>z</sub></b>
		50	2.24	112	50.79	5	4.9	24.50	2.07	0.00	0.02
		100	2.24	224	101.59	5	4.9	24.50	4.15	0.00	0.02
		200	2.24	448	203.17	5	4.9	24.50	8.29	0.00	0.02
		300	2.24	672	304.76	5	4.9	24.50	12.44	0.00	0.02
		400	2.24	896	406.35	5	4.9	24.50	16.59	0.00	0.02
		500	2.24	1120	507.94	5	5	25.00	20.32	0.00	0.00
		600	2.24	1344	609.52	5	5	25.00	24.38	0.00	0.00
		700	2.24	1568	711.11	5	5	25.00	28.44	0.00	0.00
		800	2.24	1792	812.70	5	5	25.00	32.51	0.00	0.00
		900	2.24	2016	914.29	5	5	25.00	36.57	0.00	0.00
		1000	2.24	2240	1015.87	5	5	25.00	40.63	0.00	0.00
		1100	2.24	2464	1117.46	5	5	25.00	44.70	0.00	0.00
		1200	2.24	2688	1219.05	5	5	25.00	48.76	0.00	0.00
		1300	2.24	2912	1320.63	5	5	25.00	52.83	0.00	0.00
		1400	2.24	3136	1422.22	5	5	25.00	56.89	0.00	0.00
		1500	2.24	3360	1523.81	5	4.9	24.50	62.20	0.00	0.02
		1600	2.24	3584	1625.40	5	4.9	24.50	66.34	0.00	0.02
		1700	2.24	3808	1726.98	5	5	25.00	69.08	0.00	0.00
		1800	2.24	4032	1828.57	5.1	5	25.50	71.71	0.02	0.00
		1900	2.24	4256	1930.16	5.1	5	25.50	75.69	0.02	0.00
		2000	2.24	4480	2031.75	5.1	5	25.50	79.68	0.02	0.00
		2100	2.24	4704	2133.33	5.1	5	25.50	83.66	0.02	0.00
		2200	2.24	4928	2234.92	5.3	5	26.50	84.34	0.06	0.00
<b>Elemento:</b>	<b>728</b>	<b>F<sub>cil</sub></b>	<b>A<sub>cil</sub></b>	<b>Carga (lb)</b>	<b>Carga (kg)</b>	<b>X (cm)</b>	<b>Z (cm)</b>	<b>A<sub>tr</sub></b>	<b>f<sub>m</sub></b>	<b>ε<sub>x</sub></b>	<b>ε<sub>z</sub></b>
		25	2.24	56	25.40	4.9	4.9	24.01	1.06	0.02	0.02
		50	2.24	112	50.79	4.9	4.9	24.01	2.12	0.02	0.02
		75	2.24	168	76.19	5	5	25.00	3.05	0.00	0.00
		100	2.24	224	101.59	5	5	25.00	4.06	0.00	0.00
		125	2.24	280	126.98	5.1	5.3	27.03	4.70	0.02	0.06
		150	2.24	336	152.38	5.5	5.4	29.70	5.13	0.10	0.08
<b>Elemento:</b>	<b>828</b>	<b>F<sub>cil</sub></b>	<b>A<sub>cil</sub></b>	<b>Carga (lb)</b>	<b>Carga (kg)</b>	<b>X (cm)</b>	<b>Z (cm)</b>	<b>A<sub>tr</sub></b>	<b>f<sub>m</sub></b>	<b>ε<sub>x</sub></b>	<b>ε<sub>z</sub></b>
		25	2.24	56	25.40	4.9	5	24.50	1.04	0.02	0.00
		50	2.24	112	50.79	4.9	5	24.50	2.07	0.02	0.00
		75	2.24	168	76.19	4.9	5	24.50	3.11	0.02	0.00
		100	2.24	224	101.59	4.9	5	24.50	4.15	0.02	0.00
		125	2.24	280	126.98	4.9	5	24.50	5.18	0.02	0.00
		150	2.24	336	152.38	5.3	5.1	27.03	5.64	0.06	0.02



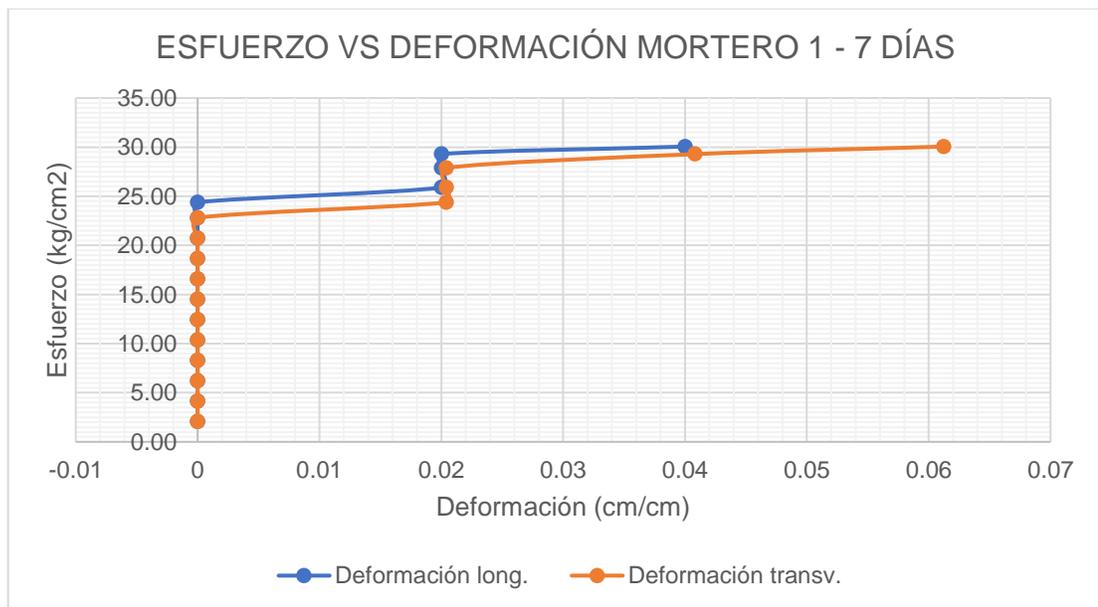
Fuente: elaboración propia.

### 5.3.3.2. Gráfica esfuerzo vs deformación para los elementos sometidos a compresión

Se tabuló la información obtenida en los ensayos y se realizaron gráficas relacionando el esfuerzo a compresión como ordenadas y la deformación unitaria en “x” y “z” como abscisas.

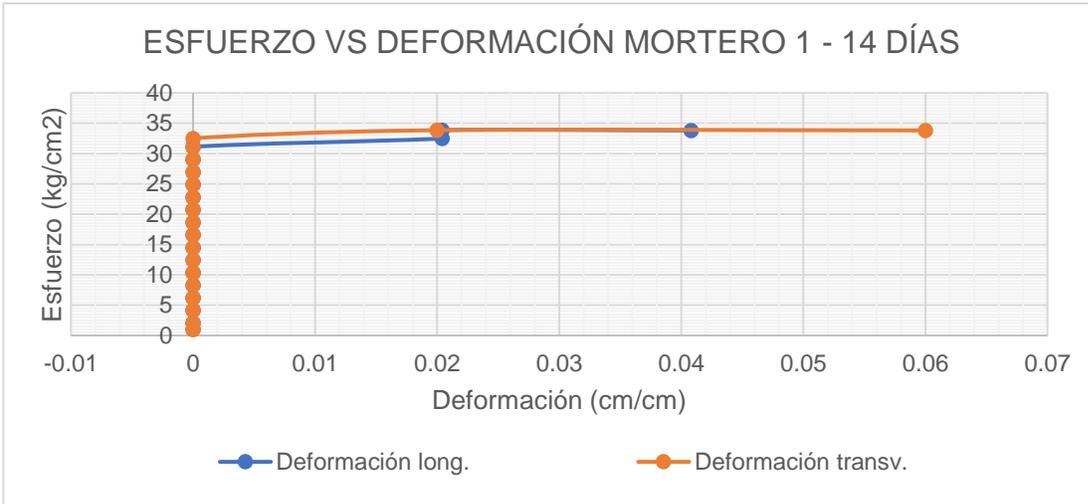
- Mortero tipo 1

Figura 29. Gráfica esfuerzo vs deformación para mortero 1 a compresión - 7 días



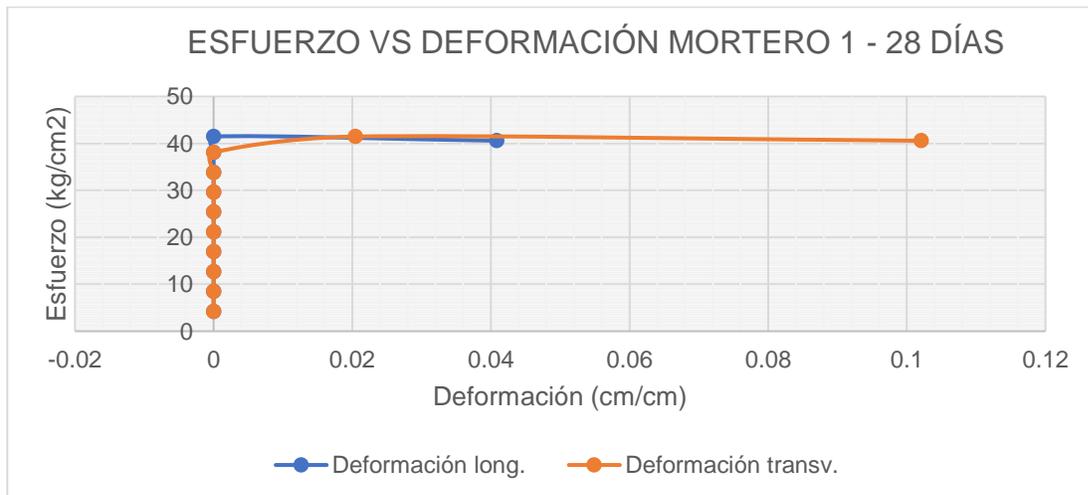
Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Gráfica esfuerzo vs deformación para mortero 1 a compresión - 14 días**



Fuente: elaboración propia.

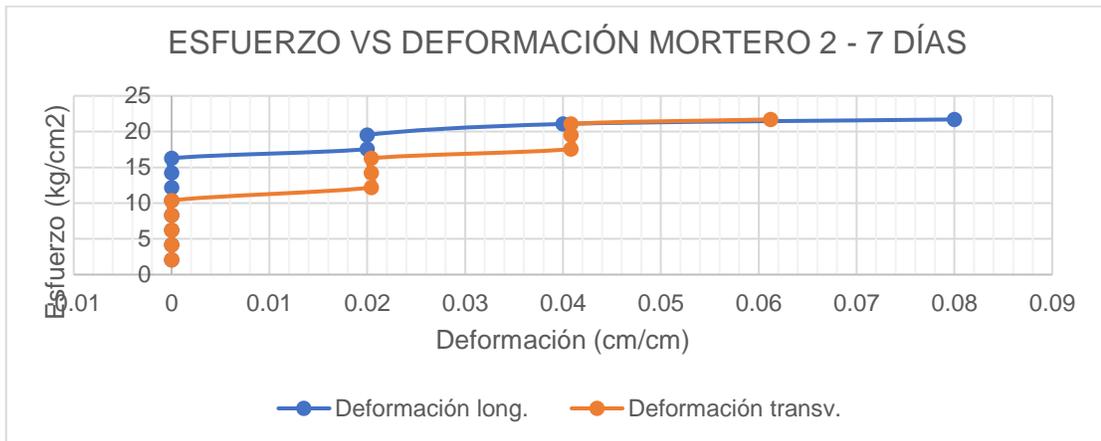
Figura 31. **Gráfica esfuerzo vs deformación para mortero 1 a compresión - 28 días**



Fuente: elaboración propia.

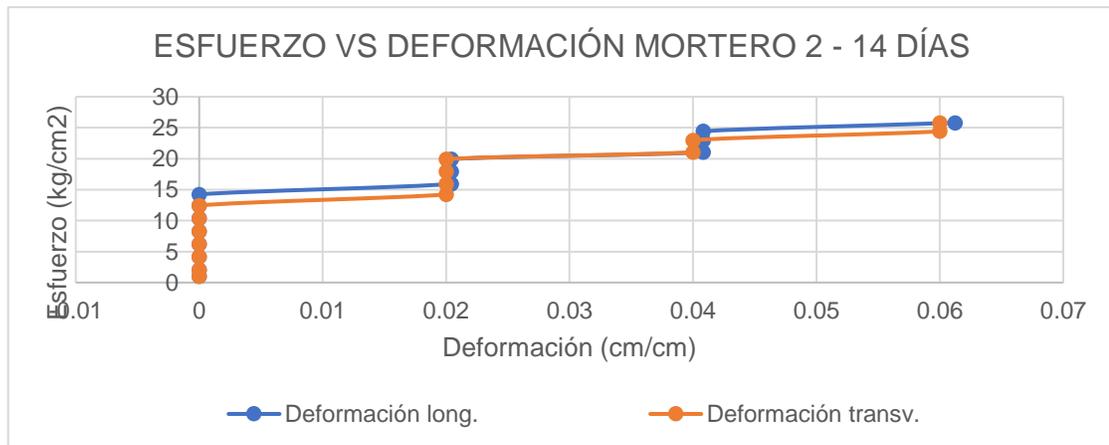
- Mortero tipo 2

Figura 32. **Gráfica esfuerzo vs deformación para mortero 2 a compresión – 7 días**



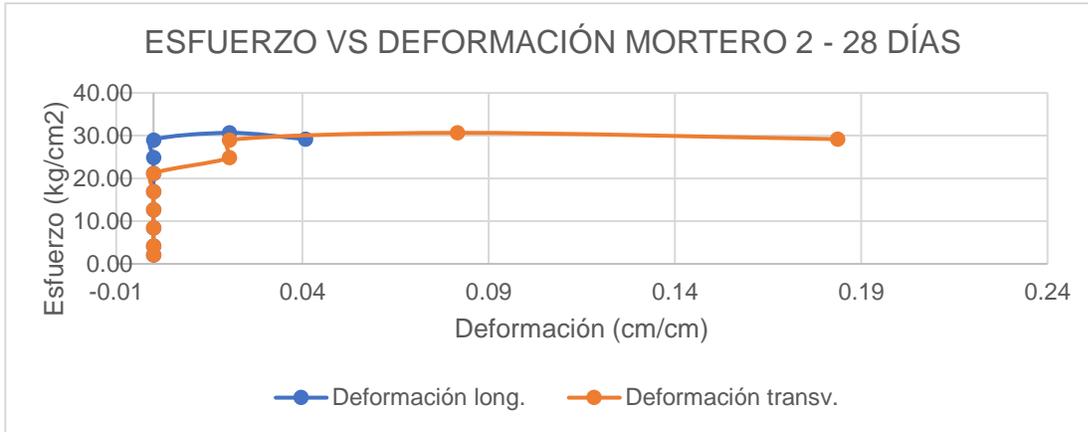
Fuente: elaboración propia.

Figura 33. **Gráfica esfuerzo vs deformación para mortero 2 a compresión – 14 días**



Fuente: elaboración propia.

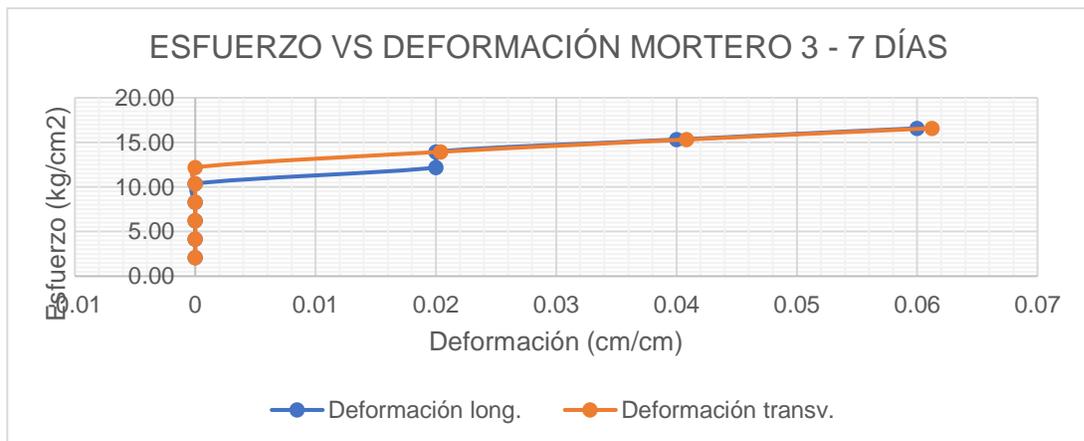
Figura 34. **Gráfica esfuerzo vs deformación para mortero 2 a compresión – 28 días**



Fuente: elaboración propia.

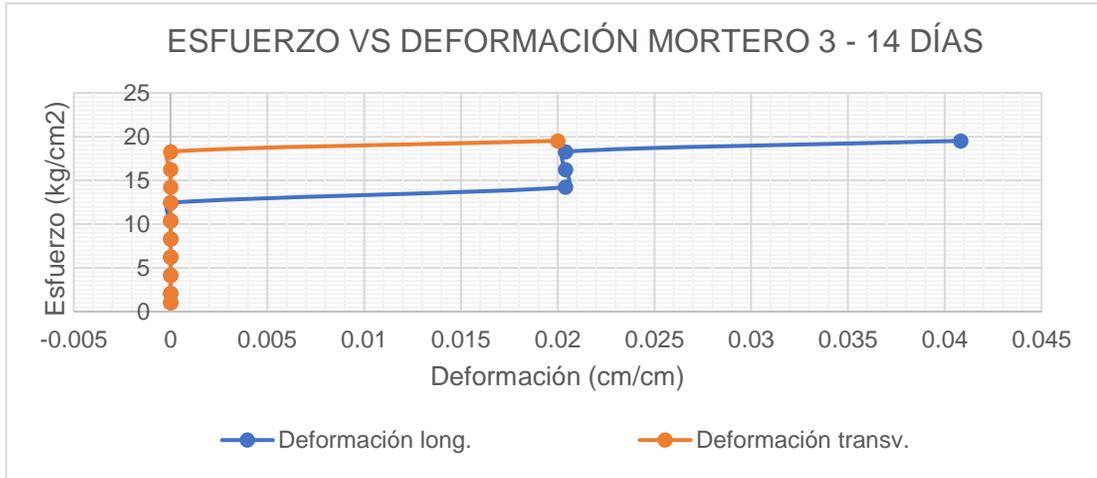
- Mortero tipo 3

Figura 35. **Gráfica esfuerzo vs deformación para mortero 3 a compresión – 7 días**



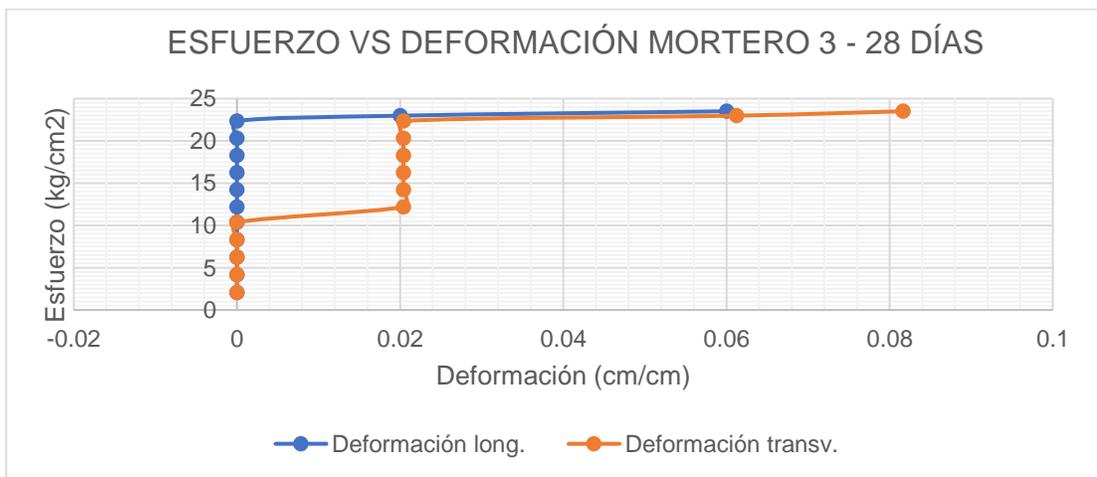
Fuente: elaboración propia.

Figura 36. **Gráfica esfuerzo vs deformación para mortero 3 a compresión – 14 días**



Fuente: elaboración propia.

Figura 37. **Gráfica esfuerzo vs deformación para mortero 3 a compresión - 28 días**



Fuente: elaboración propia.

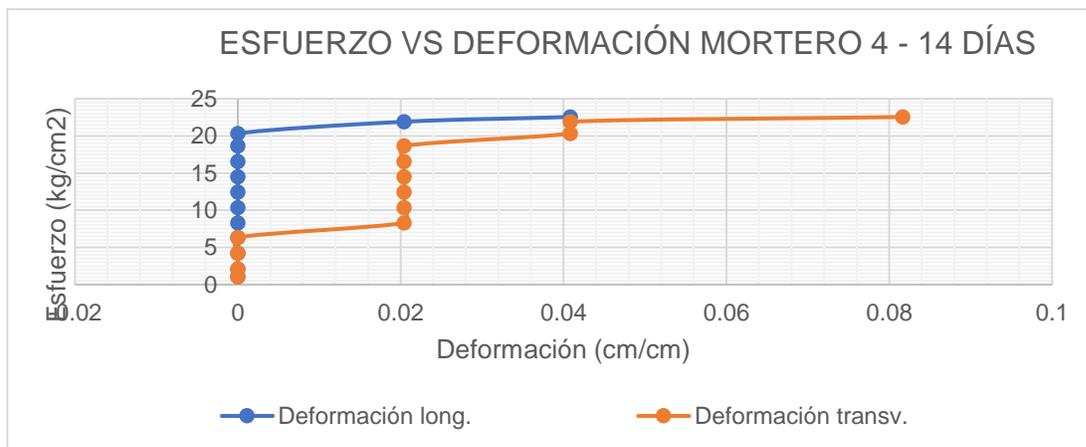
- Mortero tipo 4

Figura 38. **Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 4 a compresión – 7 días**



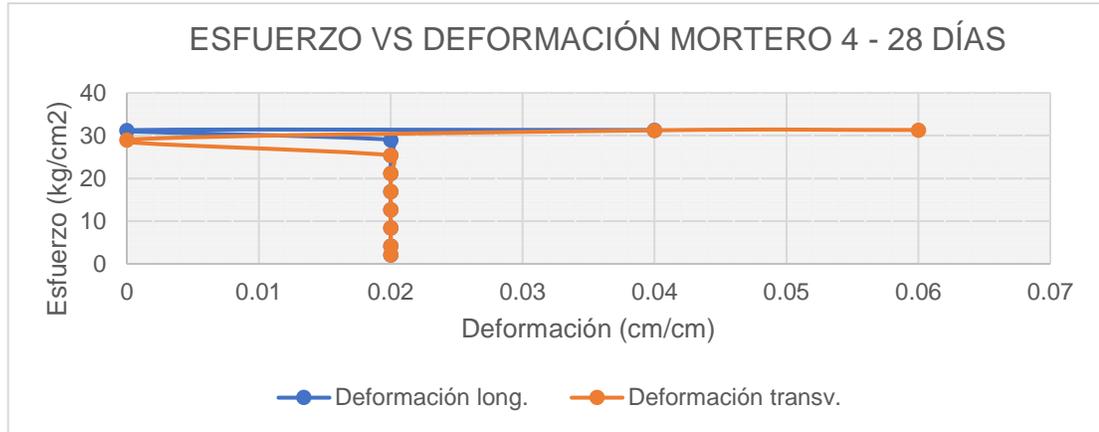
Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 4 a compresión – 14 días**



Fuente: elaboración propia.

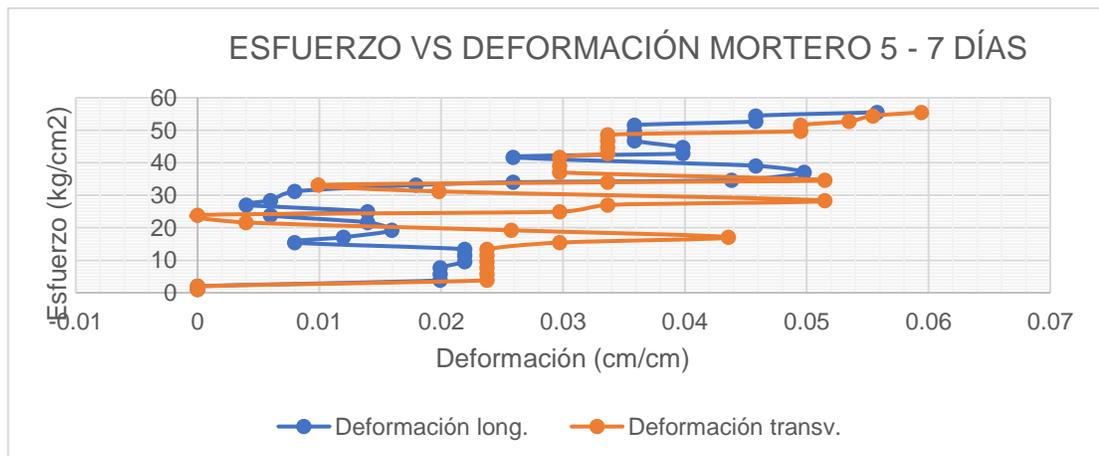
Figura 40. **Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 4 a compresión – 28 días**



Fuente: elaboración propia.

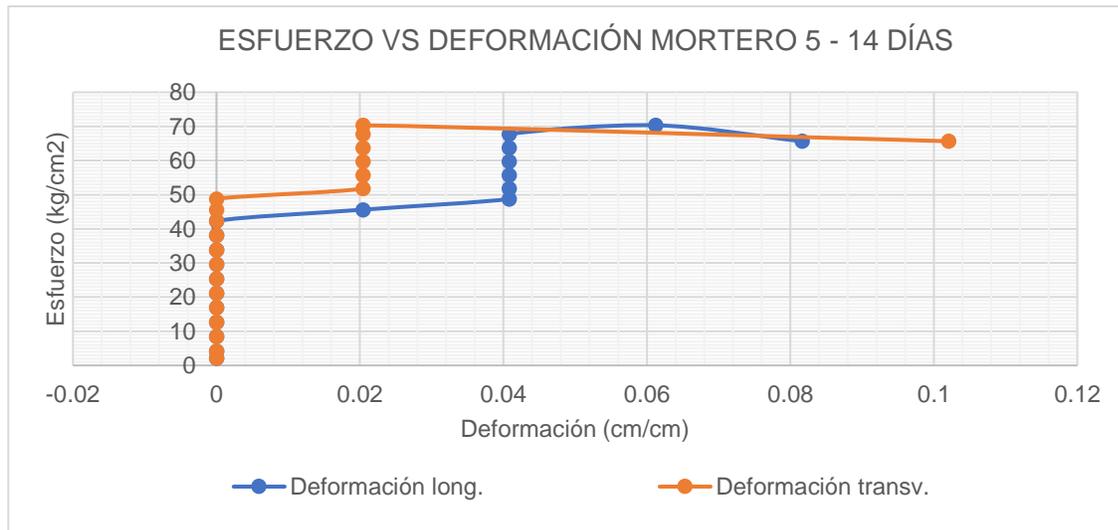
- Mortero tipo 5

Figura 41. **Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 5 a compresión – 7 días**



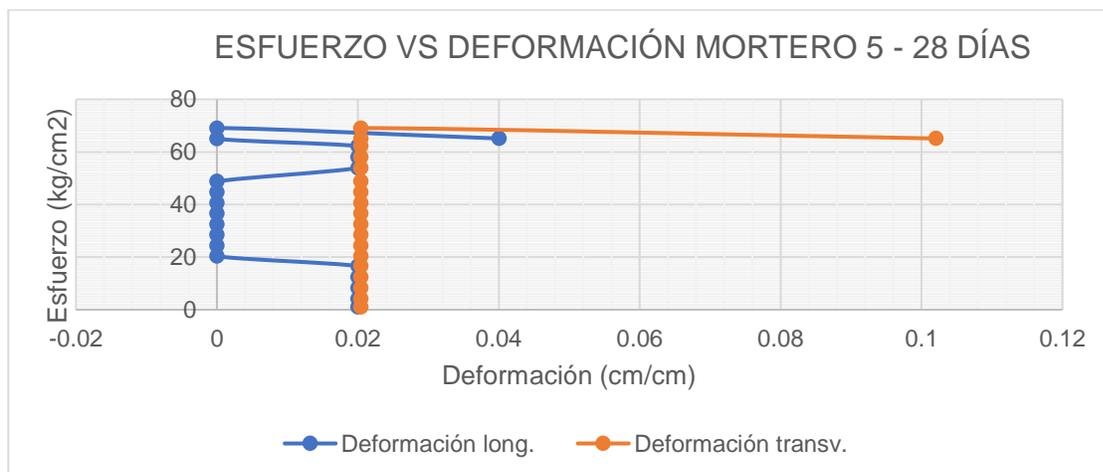
Fuente: elaboración propia.

Figura 42. **Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 5 a compresión – 14 días**



Fuente: elaboración propia.

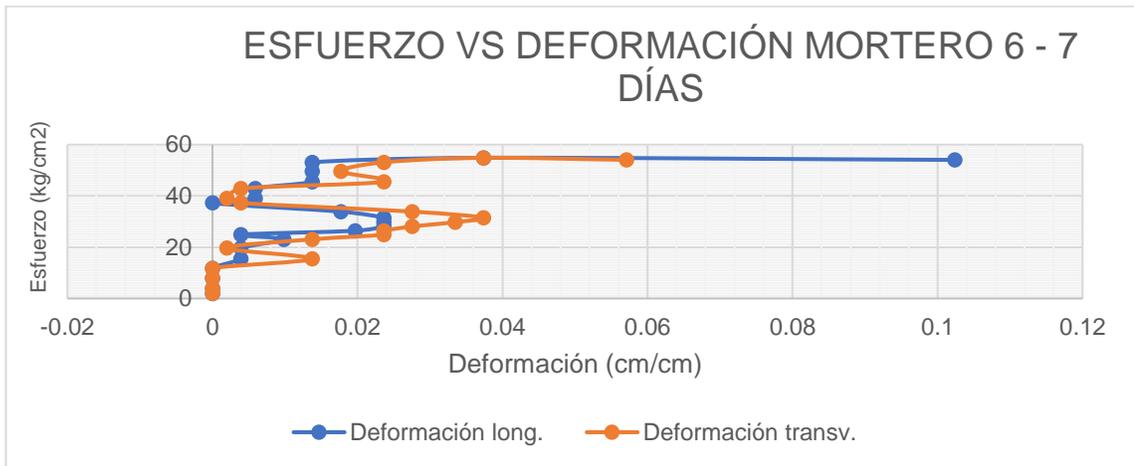
Figura 43. **Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 5 a compresión – 28 días**



Fuente: elaboración propia.

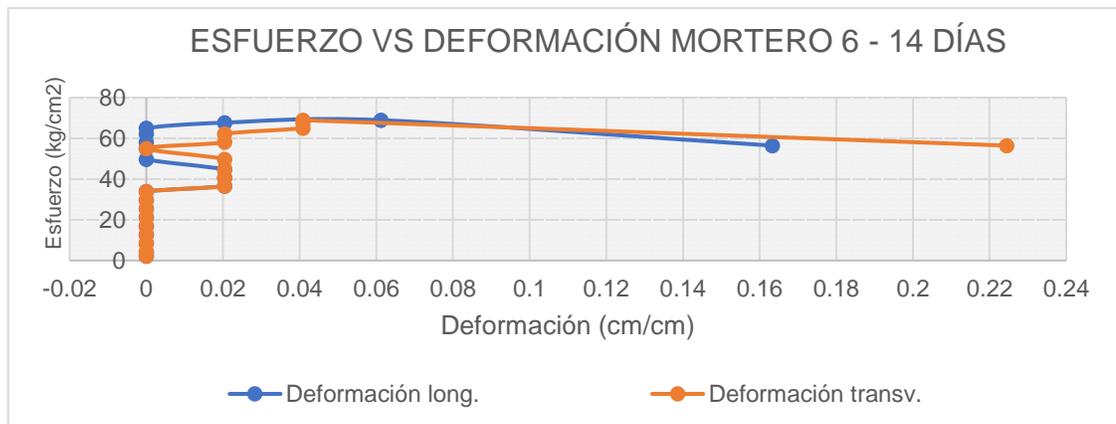
- Mortero tipo 6

Figura 44. **Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 6 a compresión – 7 días**



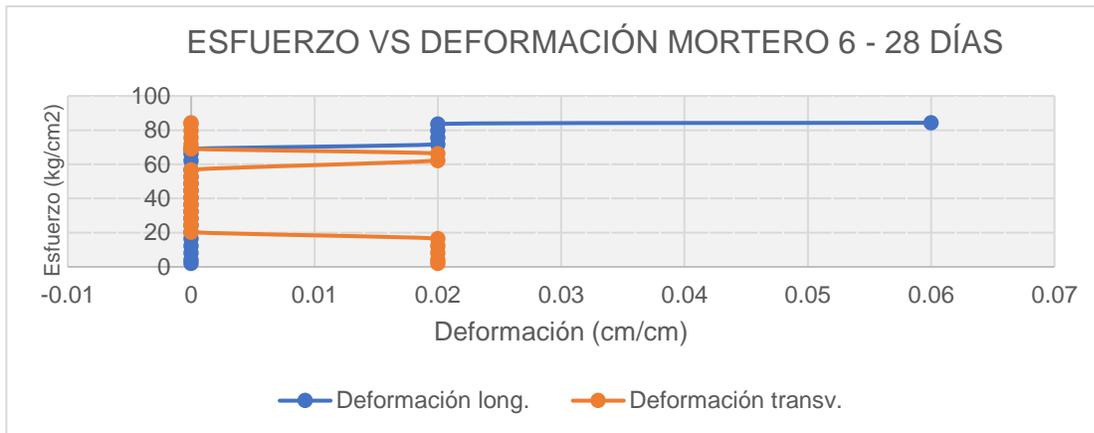
Fuente: elaboración propia.

Figura 45. **Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 6 a compresión – 14 días**



Fuente: elaboración propia.

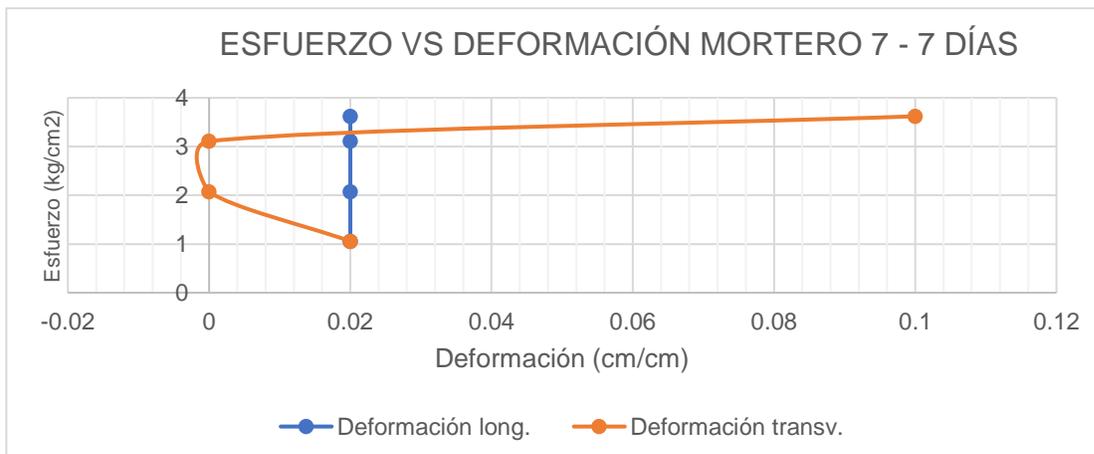
Figura 46. **Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 6 a compresión – 28 días**



Fuente: elaboración propia.

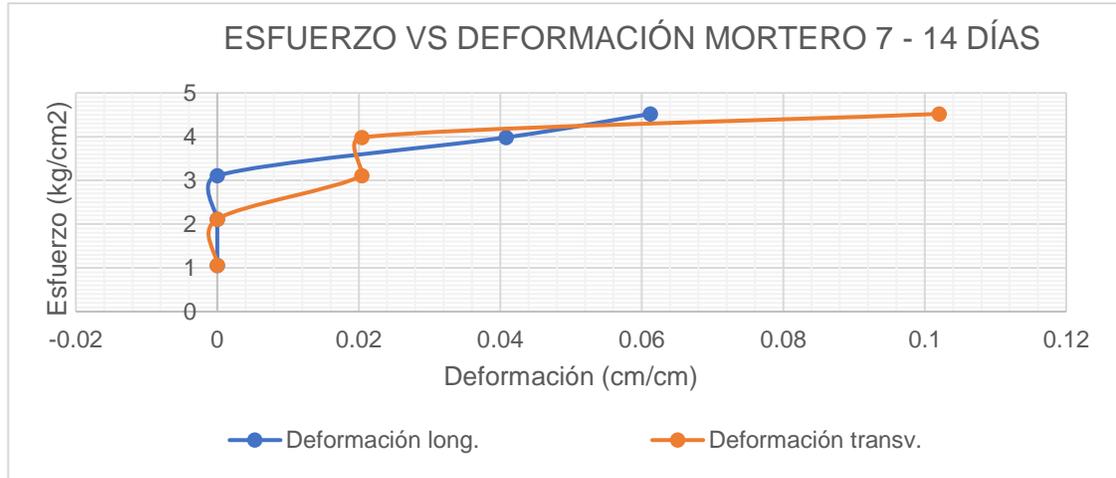
- Mortero tipo 7

Figura 47. **Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 7 a compresión – 7 días**



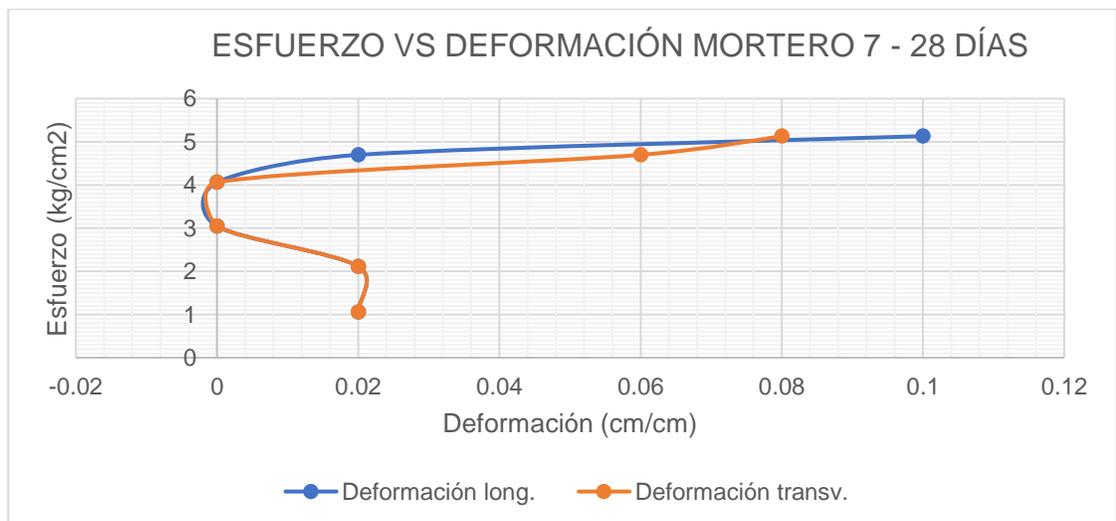
Fuente: elaboración propia.

Figura 48. **Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 7 a compresión – 14 días**



Fuente: elaboración propia.

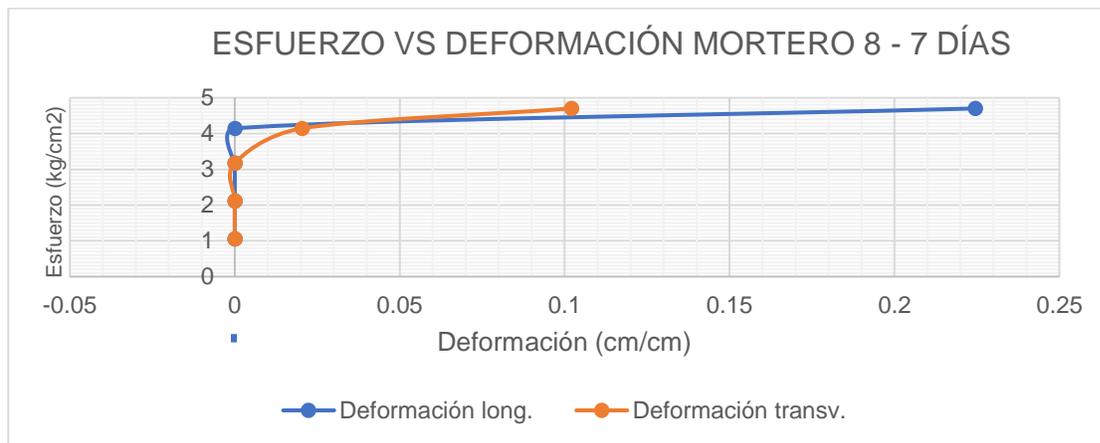
Figura 49. **Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 7 a compresión – 28 días**



Fuente: elaboración propia.

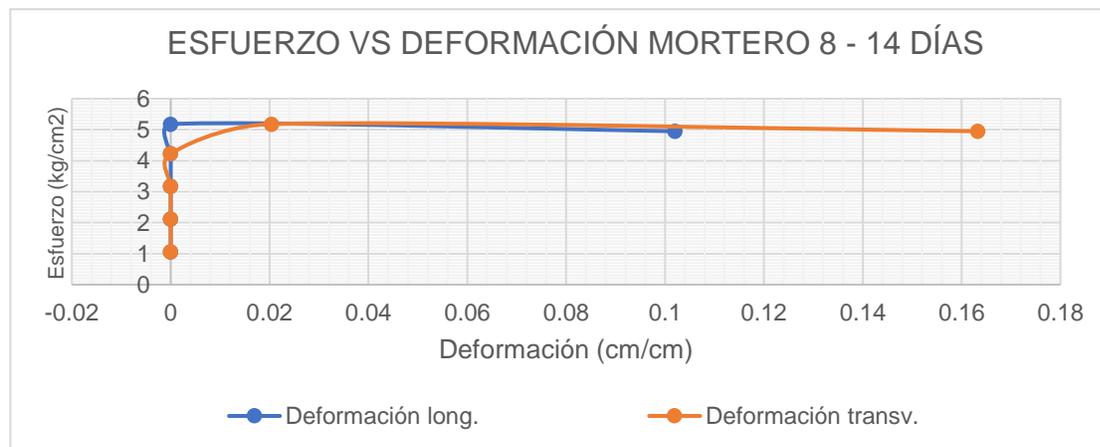
- Mortero tipo 8

Figura 50. **Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 8 a compresión – 7 días**



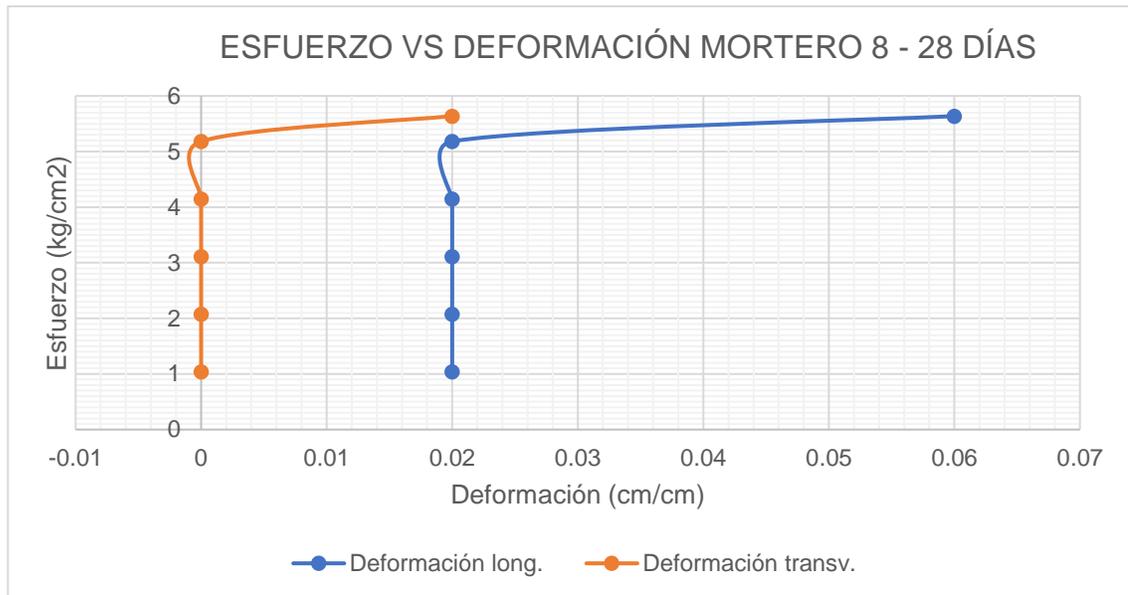
Fuente: elaboración propia.

Figura 51. **Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 8 a compresión – 14 días**



Fuente: elaboración propia.

Figura 52. **Gráfica esfuerzo vs deformación mortero 8 a compresión – 28 días**



Fuente: elaboración propia.

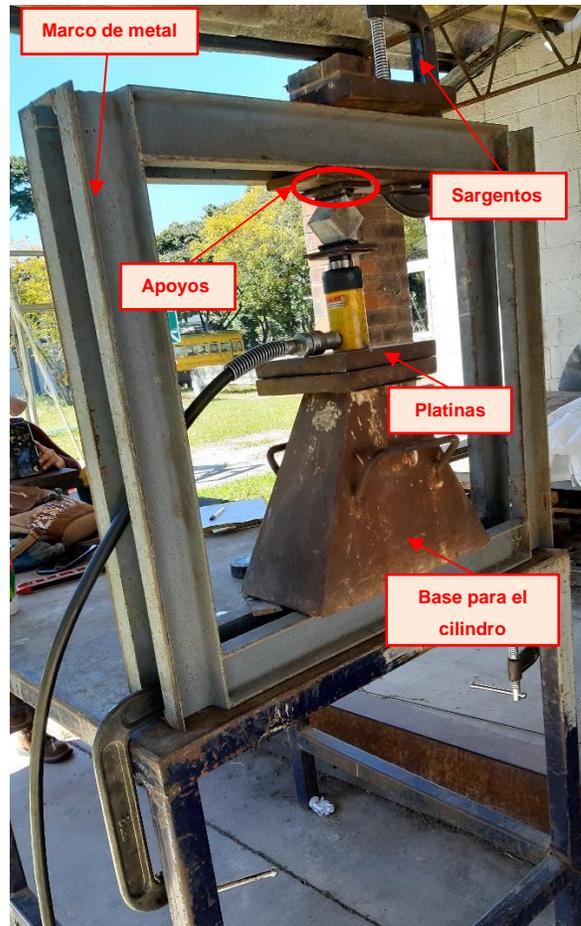
#### 5.3.4. Resistencia al corte en morteros de revestimiento con polvo de neumáticos, usando testigos cúbicos de 50 mm (2 pulg) de lado

Con base en los resultados obtenidos en el ensayo a resistencia a compresión se identificaron 2 morteros con resistencias altas, el mortero 5 y mortero 6, por lo tanto, se analizaron estos 2 morteros para su resistencia al corte con el método especificado en la sección 4.2.3.3, específicamente a 7, 14 y 21 días, donde se busca relacionar los esfuerzos cortantes con la deformación unitaria en su diagonal y en su sección transversal.

### 5.3.4.1. Datos obtenidos en el ensayo a corte

Para realizar el ensayo a corte se utilizó el mismo cilindro hidráulico y la bomba manual utilizada para el ensayo a compresión descrito en la tabla XXI.

Figura 53. Sistema de ensayo a corte empleado en la Sección de Estructuras, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

- Cálculo de la carga aplicada

$$F_{cil} \times A_{cil} = \frac{Carga (lb)}{2.205} = Carga (kg)$$

Donde:

$F_{cil}$  = fuerza del cilindro en PSI

$A_{cil}$  = área del cilindro en in<sup>2</sup>

- Cálculo del esfuerzo a corte

$$\sigma_{corte} = \frac{Carga (kg)}{A_{tr} (cm^2)}$$

Donde:

$\sigma_{corte}$  = esfuerzo a compresión del mortero en kg/cm<sup>2</sup>

$A_{tr}$  = área transversal (diagonal y "x") del elemento en cm<sup>2</sup>

- Cálculo de las deformaciones en "x" y "d"

$$\varepsilon = \frac{X_n - X_o}{X_o}$$

Donde:

$\varepsilon$  = deformación unitaria en cm/cm

$X_n$  = longitud obtenida en la carga aplicada en cm

$X_o$  = longitud inicial en cm

Tabla XXII. Identificación de los cubos de ensayo para el mortero 5 a los 7, 14 y 21 días

DATOS ENSAYO CORTE MORTERO 5 A 7 DÍAS										
PESO (g):	201.5									
M5-7	F <sub>cil</sub> (PSI)	A <sub>cil</sub> (in <sup>2</sup> )	F <sub>apl</sub> (lb)	F <sub>apl</sub> (kg)	X (cm)	D (cm)	A <sub>tr</sub> (cm <sup>2</sup> )	σ <sub>corte</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	ε <sub>D</sub> (mm/m)	ε <sub>x</sub> (mm/m)
	0	2.24	0	0.00	5.00	7.06	35.34	0.00	0.00000	0.00000
	150	2.24	336	152.38	5.10	7.23	36.88	4.13	0.02333	0.01978
	200	2.24	448	203.17	5.05	7.09	35.76	5.68	0.00333	0.00839
	250	2.24	560	253.97	5.08	7.13	36.22	7.01	0.00983	0.01479
	300	2.24	672	304.76	5.19	7.19	37.29	8.17	0.01754	0.03677
	350	2.24	784	355.56	5.29	7.42	39.27	9.05	0.05089	0.05715
	400	2.24	896	406.35	5.26	7.30	38.42	10.58	0.03344	0.05176
450	2.24	1008	457.14	5.26	7.30	38.42	11.90	0.03344	0.05176	
DATOS ENSAYO CORTE MORTERO 5 A 14 DÍAS										
PESO (g):	207.6									
M5-14	F <sub>cil</sub> (PSI)	A <sub>cil</sub> (in <sup>2</sup> )	F <sub>apl</sub> (lb)	F <sub>apl</sub> (kg)	X (cm)	D (cm)	A <sub>tr</sub> (cm <sup>2</sup> )	σ <sub>corte</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	ε <sub>D</sub> (mm/m)	ε <sub>x</sub> (mm/m)
	0	2.24	0	0.00	5.009	7.11	35.60	0.00	0.00631	0.00100
	200	2.24	448	203.17	5.035	7.06	35.54	5.72	0.00056	0.00620
	250	2.24	560	253.97	5.115	7.15	36.59	6.94	0.01288	0.02218
	300	2.24	672	304.76	5.136	7.21	37.04	8.23	0.02115	0.02638
	350	2.24	784	355.56	5.092	7.29	37.12	9.58	0.03201	0.01759
	400	2.24	896	406.35	5.156	7.20	37.11	10.95	0.01901	0.03038
	450	2.24	1008	457.14	5.094	7.11	36.21	12.62	0.00650	0.01799
	500	2.24	1120	507.94	5.135	7.25	37.21	13.65	0.02583	0.02618
550	2.24	1232	558.73	5.598	7.58	42.43	13.17	0.07299	0.11871	
DATOS ENSAYO CORTE MORTERO 5 A 21 DÍAS										
PESO (g):	208.4									
M5-21	F <sub>cil</sub> (PSI)	A <sub>cil</sub> (in <sup>2</sup> )	F <sub>apl</sub> (lb)	F <sub>apl</sub> (kg)	X (cm)	D (cm)	A <sub>tr</sub> (cm <sup>2</sup> )	σ <sub>corte</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	ε <sub>D</sub> (mm/m)	ε <sub>x</sub> (mm/m)
	0	2.24	0	0.00	4.98	7.09	35.33	0.00	0.00433	0.00480
	200	2.24	448	203.17	5.015	7.11	35.65	5.70	0.00651	0.00220
	250	2.24	560	253.97	5.04	7.17	36.16	7.02	0.01564	0.00719
	300	2.24	672	304.76	5.028	7.14	35.92	8.48	0.01152	0.00480
	350	2.24	784	355.56	5.001	7.21	36.07	9.86	0.02111	0.00060
	400	2.24	896	406.35	5.213	7.31	38.12	10.66	0.03517	0.04177
	450	2.24	1008	457.14	5.087	7.38	37.55	12.17	0.04508	0.01659
	500	2.24	1120	507.94	5.107	7.22	36.88	13.77	0.02252	0.02058
	550	2.24	1232	558.73	5.074	7.26	36.83	15.17	0.02759	0.01399
	575	2.24	1288	584.13	5.239	7.83	41.01	14.24	0.10833	0.04696

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. Identificación de los cubos de ensayo para el mortero 6 a los 7, 14 y 28 días

DATOS ENSAYO CORTE MORTERO 6 A 7 DÍAS										
PESO (g):	206									
M6-7	F <sub>cil</sub> (PSI)	A <sub>cil</sub> (in <sup>2</sup> )	F <sub>apl</sub> (lb)	F <sub>apl</sub> (kg)	X (cm)	D (cm)	A <sub>tr</sub> (cm <sup>2</sup> )	σ <sub>corte</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	ε <sub>D</sub> (mm/mm)	ε <sub>x</sub> (mm/mm)
	0	2.24	0	0.00	4.94	7.03	34.75	0.00	0.00000	0.00000
	150	2.24	336	152.38	5.15	7.25	37.32	4.08	0.03118	0.04168
	200	2.24	448	203.17	5.17	7.30	37.70	5.39	0.03781	0.04552
	300	2.24	672	304.76	5.15	7.29	37.55	8.12	0.03660	0.04248
	350	2.24	784	355.56	5.26	7.41	38.96	9.13	0.05361	0.06433
	400	2.24	896	406.35	5.11	7.32	37.42	10.86	0.04192	0.03358
	500	2.24	1120	507.94	5.08	7.30	37.06	13.71	0.03866	0.02691
	DATOS ENSAYO CORTE MORTERO 6 A 14 DÍAS									
PESO (g):	209.1									
M6-14	F <sub>cil</sub> (PSI)	A <sub>cil</sub> (in <sup>2</sup> )	F <sub>apl</sub> (lb)	F <sub>apl</sub> (kg)	X (cm)	D (cm)	A <sub>tr</sub> (cm <sup>2</sup> )	σ <sub>corte</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	ε <sub>D</sub> (mm/mm)	ε <sub>x</sub> (mm/mm)
	0	2.24	0	0.00	5.037	7.11	35.80	0.00	0.01095	0.01902
	200	2.24	448	203.17	5.082	7.12	36.18	5.62	0.01281	0.02812
	250	2.24	560	253.97	5.05	7.12	35.97	7.06	0.01337	0.02165
	300	2.24	672	304.76	5.068	7.13	36.13	8.43	0.01428	0.02529
	350	2.24	784	355.56	5.07	7.11	36.06	9.86	0.01169	0.02569
	400	2.24	896	406.35	5.115	7.17	36.70	11.07	0.02064	0.03480
	450	2.24	1008	457.14	5.106	7.16	36.56	12.50	0.01873	0.03298
	500	2.24	1120	507.94	5.185	7.20	37.32	13.61	0.02381	0.04896
	550	2.24	1232	558.73	5.167	7.20	37.19	15.02	0.02385	0.04532
	600	2.24	1344	609.52	5.11	7.33	37.45	16.27	0.04264	0.03379
650	2.24	1456	660.32	5.105	7.20	36.77	17.96	0.02473	0.03277	
DATOS ENSAYO CORTE MORTERO 6 A 21 DÍAS										
PESO (g):	212.6									
M6-21	F <sub>cil</sub> (PSI)	A <sub>cil</sub> (in <sup>2</sup> )	F <sub>apl</sub> (lb)	F <sub>apl</sub> (kg)	X (cm)	D (cm)	A <sub>tr</sub> (cm <sup>2</sup> )	σ <sub>corte</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	ε <sub>D</sub> (mm/mm)	ε <sub>x</sub> (mm/mm)
	0	2.24	0	0.00	5.235	7.27	38.04	0.00	0.03377	0.05907
	200	2.24	448	203.17	5.12	7.24	37.07	5.48	0.02996	0.03581
	250	2.24	560	253.97	5.137	7.27	37.33	6.80	0.03368	0.03925
	300	2.24	672	304.76	5.052	7.18	36.27	8.40	0.02142	0.02205
	350	2.24	784	355.56	5.075	7.13	36.20	9.82	0.01459	0.02670
	400	2.24	896	406.35	5.101	7.19	36.67	11.08	0.02262	0.03196
	450	2.24	1008	457.14	5.076	7.22	36.63	12.48	0.02666	0.02691
	500	2.24	1120	507.94	5.055	7.16	36.17	14.04	0.01799	0.02266
	550	2.24	1232	558.73	5.079	7.21	36.61	15.26	0.02534	0.02751
	600	2.24	1344	609.52	5.049	7.14	36.04	16.91	0.01538	0.02144
	650	2.24	1456	660.32	5.056	7.13	36.03	18.33	0.01367	0.02286
700	2.24	1568	711.11	5.068	7.18	36.40	19.53	0.02182	0.02529	
750	2.24	1680	761.90	5.38	7.75	41.72	18.26	0.10318	0.08841	

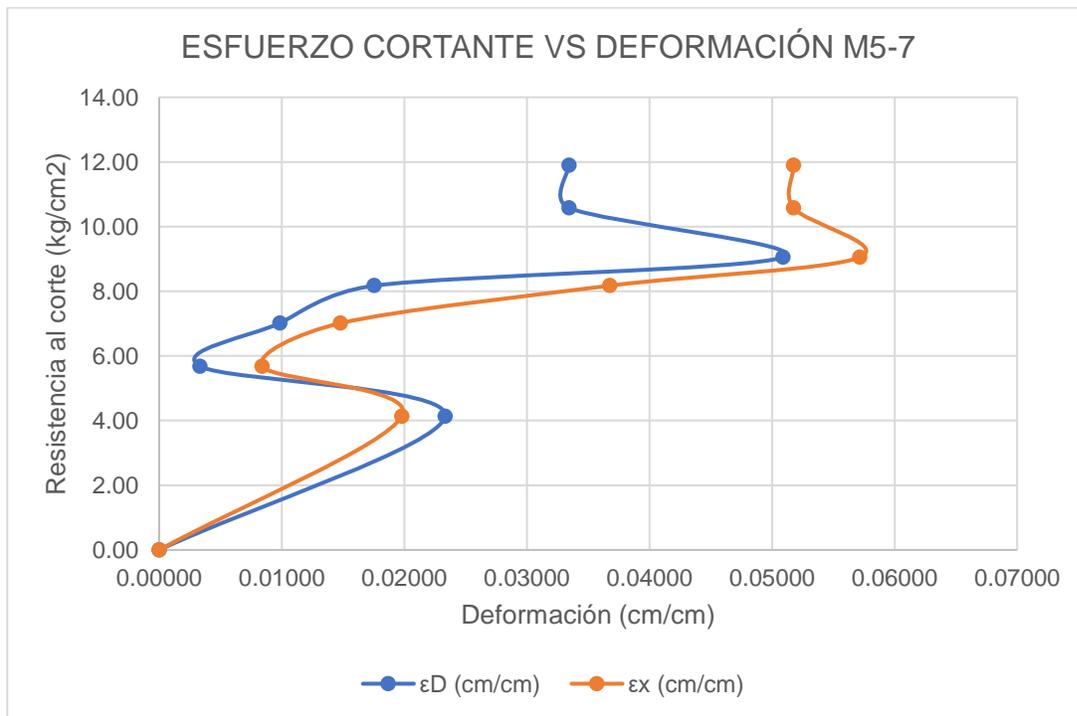
Fuente: elaboración propia.

### 5.3.4.2. Gráfica esfuerzo cortante vs deformación

Se tabuló la información obtenida en los ensayos y se realizaron gráficas relacionando el esfuerzo a corte como ordenadas y la deformación unitaria en la diagonal y en “x” como abscisas.

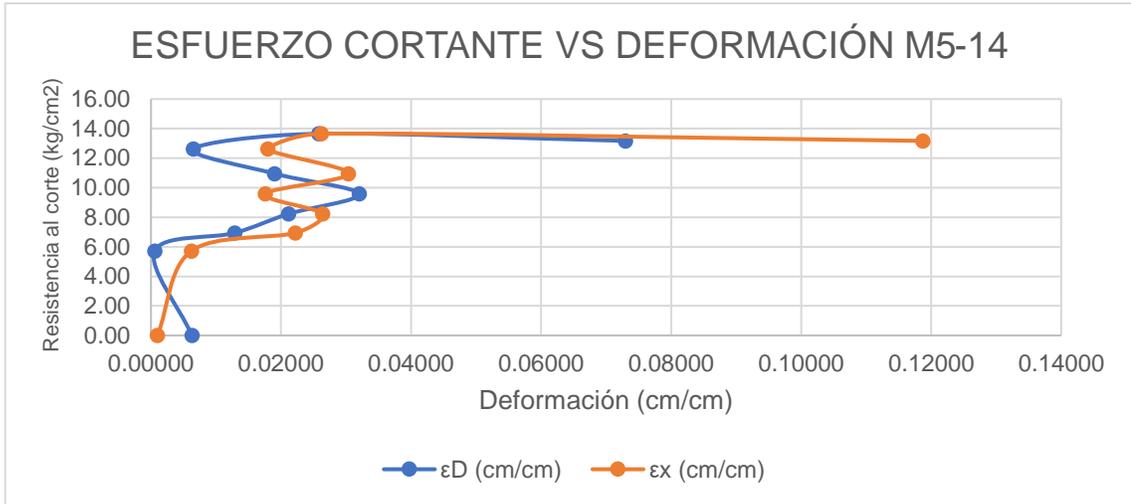
- Mortero tipo 5

Figura 54. Gráfica esfuerzo cortante vs deformación mortero 5 – 7 días



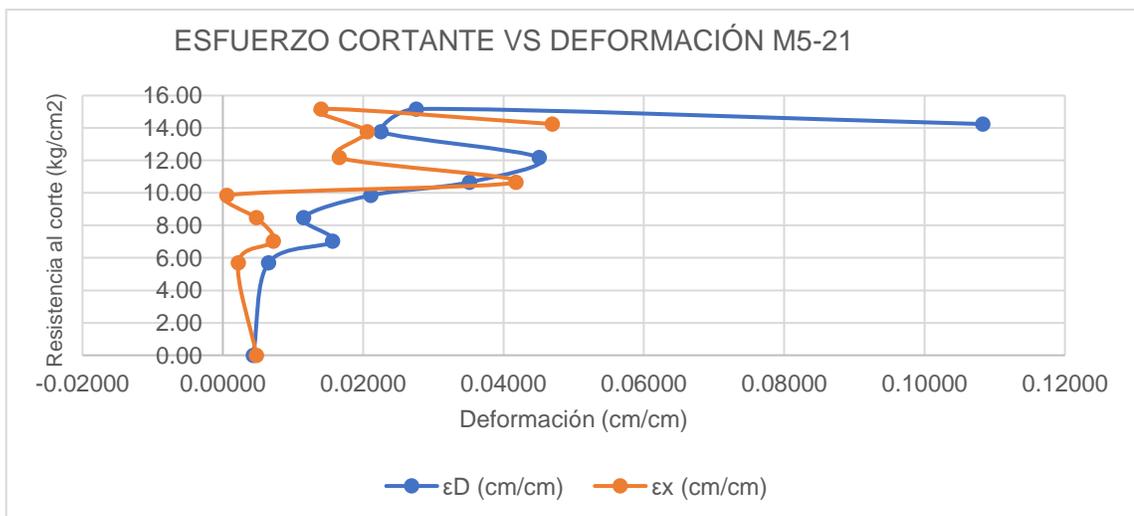
Fuente: elaboración propia.

Figura 55. **Gráfica esfuerzo cortante vs deformación mortero 5 – 14 días**



Fuente: elaboración propia.

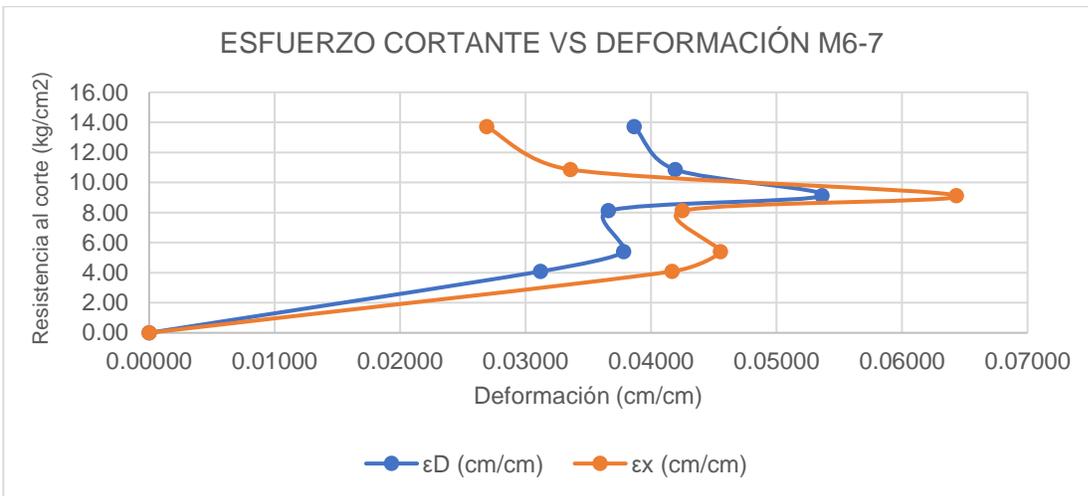
Figura 56. **Gráfica esfuerzo cortante vs deformación mortero 5 – 21 días**



Fuente: elaboración propia.

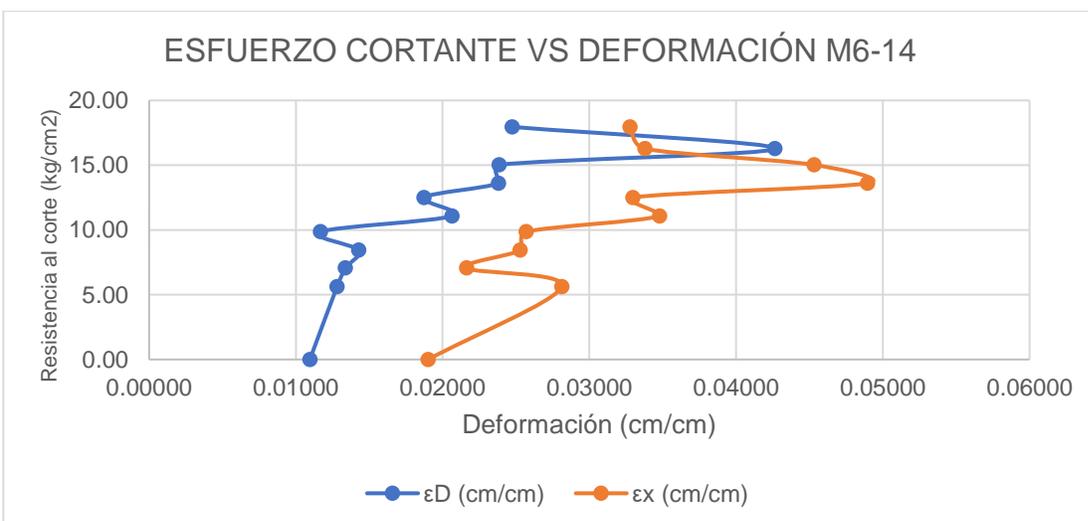
- Mortero tipo 6

Figura 57. **Gráfica esfuerzo cortante vs deformación mortero 6 – 7 días**



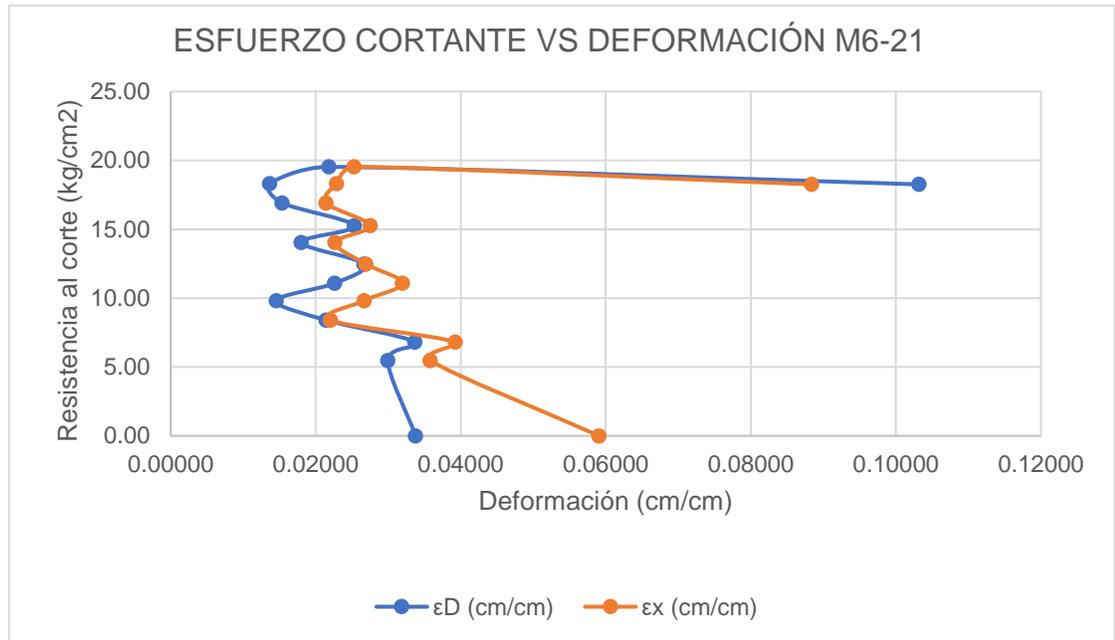
Fuente: elaboración propia.

Figura 58. **Gráfica esfuerzo cortante vs deformación mortero 6 – 14 días**



Fuente: elaboración propia.

Figura 59. **Gráfica esfuerzo cortante vs deformación mortero 6 – 21 días**



Fuente: elaboración propia.

### 5.3.5. Resistencia a la tracción o adherencia en morteros con caucho granulado medio y grueso

Se realizaron 3 ensayos de resistencia, descritos en la sección 4.3.12 a los morteros 5 y 6 debido a sus buenos resultados en el ensayo a compresión y corte, para ello se evaluaron 2 métodos de aplicación de los morteros en una pared de block de concreto: Método de aplicación untado con una espátula de albañil, y método de aplicación lanzado para determinar cuál mortero tiene mayor adherencia y con qué método de aplicación presenta los mejores resultados. También, se analizaron las fallas para poder clasificarlas de acuerdo con la norma NTG 41101 H1.

Figura 60. **Marco de metal, polea y malla de protección**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

Figura 61. **Dinamómetro, mica y cable de acero**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

Figura 62. **Contrapeso de concreto y mica**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

Figura 63. **Placas metálicas con argolla**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

Figura 64. **Limpieza y humectación de la superficie**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

Figura 65. **Preparación de los morteros 5 y 6**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

Figura 66. **Aplicación de mortero lanzada y untada**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

Figura 67. **Identificación de las muestras de ensayo**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

### 5.3.5.1. Datos obtenidos en ensayo de adherencia

Durante el ensayo se recolectaron los siguientes datos:

- Carga en libras
- Área de contacto entre el mortero y la platina en pulgadas cuadradas
- Tipo de falla presentada

Tabla XXIV. Datos obtenidos durante el ensayo de adherencia

DATOS ENSAYO U5					
No.	Carga (lb)	Área de contacto in <sup>2</sup>			Tipo de falla
		x (in)	y (in)	Área (in <sup>2</sup> )	
1	100	2.071	2.051	4.247621	C
2	50	2.438	2.031	4.951578	E
3	175	2.510	2.034	5.10534	C
DATOS ENSAYO L5					
No.	Carga (lb)	Área de contacto in <sup>2</sup>			Tipo de falla
		x (in)	y (in)	Área (in <sup>2</sup> )	
1	150	2.465	2.001	4.932465	C
2	400	2.526	2.031	5.130306	D
3	250	2.483	2.017	5.008211	A
DATOS ENSAYO U6					
No.	Carga (lb)	Área de contacto in <sup>2</sup>			Tipo de falla
		x (in)	y (in)	Área (in <sup>2</sup> )	
1	450	2.455	1.191	2.923905	B
2	175	2.309	2.072	4.784248	E
3	175	2.430	2.041	4.95963	C
DATOS ENSAYO L6					
No.	Carga (lb)	Área de contacto in <sup>2</sup>			Tipo de falla
		x (in)	y (in)	Área (in <sup>2</sup> )	
1	275	2.486	2.058	5.116188	C
2	75	2.573	2.081	5.354413	A
3	312.5	2.444	2.001	4.890444	D

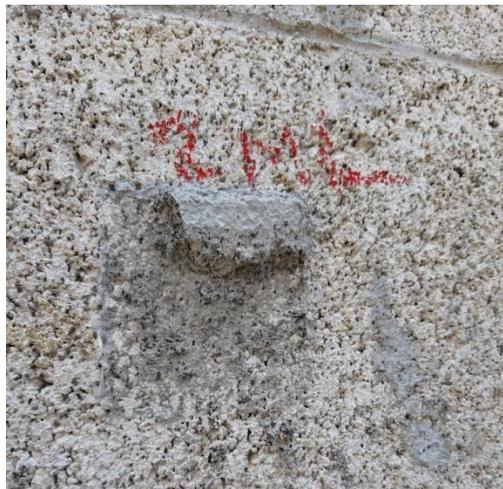
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Descripción de los tipos de fallas**

<b>FALLA</b>	<b>Descripción</b>
A	Falla adhesiva en la interfaz entre el mortero y el soporte
B	Falla adhesiva en la interfaz entre el mortero y la platina
C	Falla adhesiva en el interior del mortero
D	Falla cohesiva en el soporte
E	Falla cohesiva en la platina

Fuente: elaboración propia.

Figura 68. **Falla tipo A en muestra L6-2**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

Figura 69. **Falla tipo B en muestra U6-1**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

Figura 70. **Falla tipo C en muestra U5-1**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

**Figura 71. Falla tipo D en muestra L5-2**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

**Figura 72. Falla tipo E en muestra U5-2**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

### 5.3.5.2. Factor de relación entre el área de la muestra del mortero y el área de la platina.

Se determinó un factor de relación entre el área total de la muestra del mortero y el área de la platina para poder obtener el esfuerzo de adherencia del mortero:

$$f_n = \frac{A_{mn}/A_{platn}}{\sum A_m/A_{plat}} + 1$$

Donde:

- $f_n$  = factor de relación
- $A_{mn}$  = área del mortero
- $A_{plat}$  = área de la platina
- $\sum A_m/A_{plat}$  = sumatoria de la relación área mortero y área platina

Tabla XXVI. Factor de relación área mortero-platina

FACTOR DE RELACIÓN ÁREA MORTERO-PLATINA				
MORTERO	$A_{mn}$ (cm <sup>2</sup> )	$A_{platn}$ (cm <sup>2</sup> )	$A_m/A_{platn}$	factor
GU 1	49	27.4039516	1.78806329	1.09160749
GU 2	49	31.9456006	1.53385753	1.07858382
GU 3	49	32.9376115	1.487661	1.07621704
GL 1	49	31.8222912	1.53980113	1.07888833
GL 2	49	33.0986822	1.48042148	1.07584614
GL 3	49	32.3109741	1.51651262	1.07769519
MU 1	49	18.8638655	2.59755881	1.13308022
MU 2	49	30.8660544	1.58750449	1.08133230
MU 3	49	31.9975489	1.53136730	1.07845624
ML 1	49	33.0075985	1.48450667	1.07605544
ML 2	49	34.5445309	1.41845898	1.07267163
ML 3	49	31.5511885	1.55303183	1.07956617
			$\sum$ 19.5187451	

Fuente: elaboración propia.

### 5.3.5.3. Determinación del esfuerzo de adherencia

Para determinar el esfuerzo a la adherencia se relaciona la carga obtenida durante el ensayo y el área del mortero afectado por el factor de relación  $A_m/A_{plat}$ .

$$R_{adh} = \frac{F}{A_{mortero}} * f$$

Donde:

F = carga en kg.

Amortero = área del mortero en cm<sup>2</sup>.

f = factor de relación.

Tabla XXVII. **Determinación del esfuerzo de adherencia en mortero 5**

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA ADHERENCIA EN MORTERO U5						
No.	Carga (Lb)	Carga (Kg)	A <sub>mortero</sub> (cm <sup>2</sup> )	factor	R <sub>adh</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	Falla
1	100	45.359237	49	1.09160749	1.010499652	C
2	50	22.6796185	49	1.07858382	0.499221827	E
3	175	79.37866475	49	1.07621704	1.743442279	C
				<b>PROMEDIO</b>	<b>1.08438792</b>	
DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA ADHERENCIA EN MORTERO L5						
No.	Carga (Lb)	Carga (Kg)	A <sub>mortero</sub> (cm <sup>2</sup> )	factor	R <sub>adh</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	Falla
1	150	68.0388555	49	1.07888833	1.498088305	C
2	400	181.436948	49	1.07584614	3.983637555	D
3	250	113.3980925	49	1.07769519	2.494052631	A
				<b>PROMEDIO</b>	<b>2.65859283</b>	

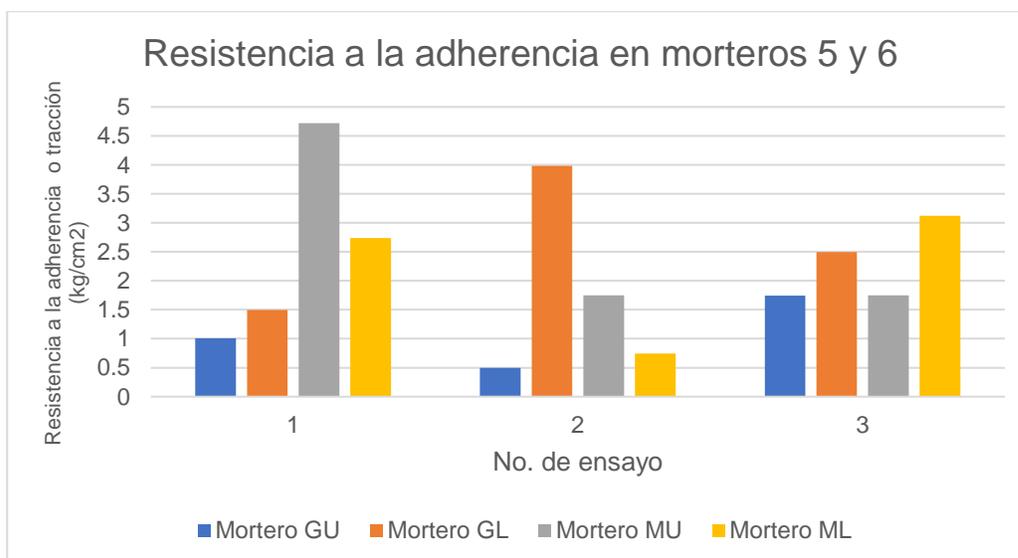
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Determinación del esfuerzo de adherencia en mortero 6**

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA ADHERENCIA EN MORTERO U6						
No.	Carga (Lb)	Carga (Kg)	A <sub>mortero</sub> (cm <sup>2</sup> )	factor	R <sub>adh</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	Falla
1	450	204.1165665	49	1.13308022	4.720009045	B
2	175	79.37866475	49	1.0813323	1.751728865	E
3	175	79.37866475	49	1.07845624	1.747069716	C
<b>PROMEDIO</b>					<b>2.739602542</b>	
DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA ADHERENCIA EN MORTERO L6						
No.	Carga (Lb)	Carga (Kg)	A <sub>mortero</sub> (cm <sup>2</sup> )	factor	R <sub>adh</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	Falla
1	275	124.7379018	49	1.07605544	2.739283617	C
2	75	34.01942775	49	1.07267163	0.74472806	A
3	312.5	141.7476156	49	1.07956617	3.122978179	D
<b>PROMEDIO</b>					<b>2.202329952</b>	

Fuente: elaboración propia.

Figura 73. Gráfica esfuerzo de adherencia en morteros 5 y 6



Fuente: elaboración propia.

### **5.3.6. Ensayo de impermeabilización en morteros, según método S.R.**

Se realizaron 4 fases de ensayo de impermeabilización, donde se buscaba determinar la pérdida de agua en contenedores de block revestido de los morteros con caucho reciclado, considerando una pérdida por evaporación real con base en la envolvente térmica producida por los materiales.

#### **5.3.6.1. Determinación de la evapotranspiración potencial diaria (mm/día)**

Para poder determinar la evapotranspiración potencial en los elementos de estudio se utilizó la fórmula de Hargreaves y Samani, 1985.

$$ET_o = 0.0135(t_{med} + 17.78)R_s$$

Donde:

ET<sub>o</sub> = evapotranspiración potencial diaria (mm/día)

t<sub>med</sub> = temperatura media (°C)

R<sub>s</sub> = radiación solar incidente, convertida en mm/día.

Para determinar la radiación solar incidente, Samani propone utilizar la siguiente fórmula:

$$R_s = R_o * KT * (t_{max} - t_{min})^{0.5}$$

Donde:

R<sub>s</sub> = radiación solar incidente

R<sub>o</sub> = radiación solar extraterrestre

KT = coeficiente

tmax = temperatura diaria máxima

tmin = temperatura diaria mínima

Los valores de la radiación solar extraterrestre se obtuvieron de la tabla de Allen et al (1998) que se encuentra en función de la latitud y del mes y el valor del Coeficiente KT se obtuvo a partir de la recomendación de Hargreaves, que considera KT=0.162 para regiones del interior y KT=0.19 para regiones costeras. Se determinó un valor de 0.17 para realizar las respectivas evaluaciones.

### **5.3.6.2. Determinación del porcentaje de evapotranspiración real con base en la envolvente térmica**

Para determinar la evapotranspiración real se consideró la resistencia térmica de los materiales utilizados en los elementos de ensayo (mampostería, mortero de cemento de 1 cm de espesor y lámina galvanizada de 2 mm de espesor).

$$ET_R = ET_o * R$$

Donde:

ETR = evapotranspiración real (mm/día)

ETo = evapotranspiración potencial (mm/día)

R = factor de resistencia térmica de los materiales.

Para poder determinar el factor de resistencia térmica R se considera:

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

Donde:

R = resistencia térmica de los materiales (K\*m2/W)

e = espesor del material (m)

$\lambda$  = coeficiente de conductividad térmica del material (W/k\*m)

Tabla XXIX. **Datos obtenidos para la resistencia térmica de los materiales**

<b>RESISTENCIA TERMICA DE LOS MATERIALES</b>			
<b>Material</b>	<b>e (m)</b>	<b><math>\lambda</math> (W/k*m)</b>	<b>R<sub>n</sub> (K*m<sup>2</sup>/W)</b>
Mampostería	0.15	0.420	0.35714286
Mortero	0.01	1.200	0.008333333
lámina galvanizada	0.002	0.018	0.111111111
<b>TOTAL (R)</b>			<b>0.4765873</b>

Fuente: elaboración propia.

### **5.3.6.3. Determinación de la permeabilidad de los morteros**

Para determinar la permeabilidad de los morteros se determina la pérdida por permeabilidad y también el porcentaje de absorción del mortero.

$$\nabla_{permeabilidad} = \nabla_{total} - \nabla_{ETR}$$

Donde:

$\nabla_{permeabilidad}$  = pérdida por permeabilidad en cm.

$\nabla_{total}$  = pérdida de altura de columna de agua total en cm.

$\nabla_{ETR}$  = pérdida debido a la evapotranspiración real en cm.

$$\%Absorción = \frac{Vol\ absorbido}{Vol\ inicial} * 100$$

Donde:

%Absorción = porcentaje de absorción del mortero.

Volumen absorbido = volumen de agua absorbido en cm<sup>3</sup>.

Volumen inicial = volumen de agua inicial en cm<sup>3</sup>.

#### **5.3.6.4. Ensayo de impermeabilización en morteros fase 1**

En la primera fase del ensayo, se evaluó el comportamiento de los morteros 1, 2, 3 y 4 al revestir blocks en sus caras internas y llenarlos a determinada altura con agua, para que, después de un tiempo, se tomara la disminución de altura del espejo de agua y se evaluarán las caras del block para identificar fugas o humedad.

Figura 74. **Elaboración de los blocks revestidos de mortero**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).

Colección particular. Guatemala.

Figura 75. **Ensayo de impermeabilización en blocks revestidos de morteros 1, 2, 3 y 4**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

Tabla XXX. **Datos obtenidos en ensayo de impermeabilización fase 1 para determinar evapotranspiración real**

<b>ENSAYO DE IMPERMABILIDAD FASE 1</b>	
FECHA DE ENSAYO:	21/04/2021
HORA DE INICIO:	09:42
HORA DE FINALIZACIÓN:	11:20
TEMPERATURA MAX °C:	25
TEMPERATURA MIN °C:	18
TEMPERATURA ENS °C:	24
KT	0.17
LATITUD USAC:	14°38'58" N
Ro mm/día	15.6
<b>Evapotranspiración del elemento</b>	
Rs (mm/día)	7.02
Eto (mm/día)	3.96
EtR (mm/día)	1.9
EtR (mm/hora)	0.1
<b>EtR (cm/min)</b>	<b>0.00013098</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Duración del ensayo de impermeabilización fase 1**

Tipo de mortero	Hora de inicio	Hora de finalización	Duración del ensayo (hr)	Duración del ensayo (min)
1	10:10	11:18	01:08	68.00
2	10:10	11:18	01:08	68.00
3	10:10	11:18	01:08	68.00
4	10:10	11:19	01:09	69.00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Dimensiones de las muestras de ensayo fase 1**

Tipo de mortero	Ancho (cm)	Largo (cm)	Área de ensayo (cm <sup>2</sup> )	Altura inicial (cm)	Volumen inicial (cm <sup>3</sup> )
1	11.30	16.10	181.9	13.5	2456.1
2	11.00	16.50	181.5	13.0	2359.5
3	10.90	16.50	179.9	12.5	2248.1
4	11.30	16.00	180.8	13.5	2440.8

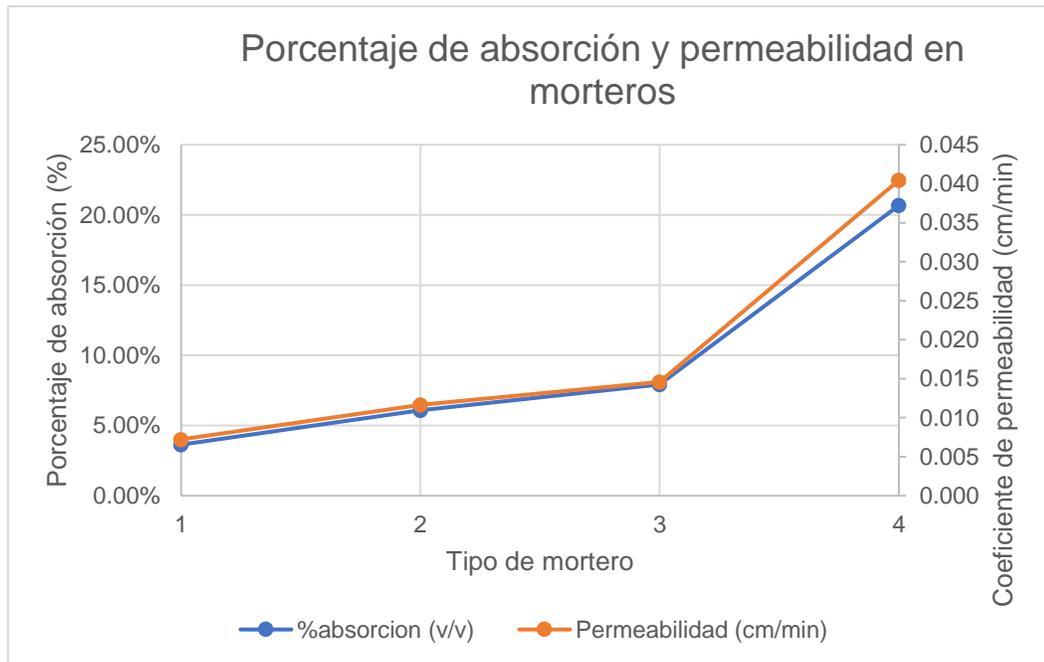
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Porcentaje de absorción y permeabilidad en morteros 1, 2, 3 y 4**

Tipo de mortero	Pérdida total (cm)	Pérdida por evaporación (cm)	Pérdida debida a la permeabilidad (cm)	Volumen absorbido (cm <sup>3</sup> )	Porcentaje de absorción (v/v)	Permeabilidad (cm/min)
1	0.5	0.0089	0.491	89.345	3.638 %	0.007
2	0.8	0.0089	0.791	143.583	6.085 %	0.012
3	1.0	0.0089	0.991	178.248	7.929 %	0.015
4	2.8	0.0090	2.791	504.606	20.67 %	0.040

Fuente: elaboración propia.

Figura 76. **Gráfica porcentaje de absorción y permeabilidad para morteros 1, 2, 3 y 4**



Fuente: elaboración propia.

### 5.3.6.5. **Ensayo de impermeabilización en morteros fase 2**

En la segunda fase de los ensayos de impermeabilización se analizaron los morteros con caucho tamizado, separado por caucho medio y grueso. Para ello, se elaboraron prismas de block revistiendo las paredes internas de una de sus perforaciones con los morteros de análisis y, a su vez, utilizando los morteros como mortero de pega. El proceso de análisis es igual que el de la fase 1, se llenan de agua los tubos formados con el mortero y se mide la pérdida de altura del espejo de agua durante determinado tiempo.

Figura 77. **Prismas para ensayo de impermeabilización en morteros 5, 6, 7 y 8**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

Tabla XXXIV. **Datos obtenidos en ensayo de impermeabilización fase 2 para determinar la evapotranspiración**

<b>ENSAYO DE IMPERMABILIDAD FASE 2 (MORTEROS CON CAUCHO TAMIZADO)</b>	
FECHA DE ENSAYO:	19/05/2021
HORA DE INICIO:	10:49
HORA DE FINALIZACIÓN:	11:08
TEMPERATURA MAX °C:	26
TEMPERATURA MIN °C:	17
TEMPERATURA ENS °C:	25
KT	0.17
LATITUD USAC:	14°38'58" N
Ro mm/día	15.7
<b>Evapotranspiración del elemento</b>	
Rs (mm/día)	8.01
Eto (mm/día)	4.62
EtR (mm/día)	2.2
EtR (mm/hora)	0.09
<b>EtR (cm/min)</b>	<b>0.000153047</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. Duración del ensayo de impermeabilización fase 2

Tipo de mortero	Hora de inicio	Hora de finalización	Duración del ensayo (hr)	Duración del ensayo (min)
5	10:54	11:07	00:13	13.00
6	10:50	10:54	00:04	4.00
7	10:58	11:07	00:09	9.00
8	10:56	11:07	00:11	11.00

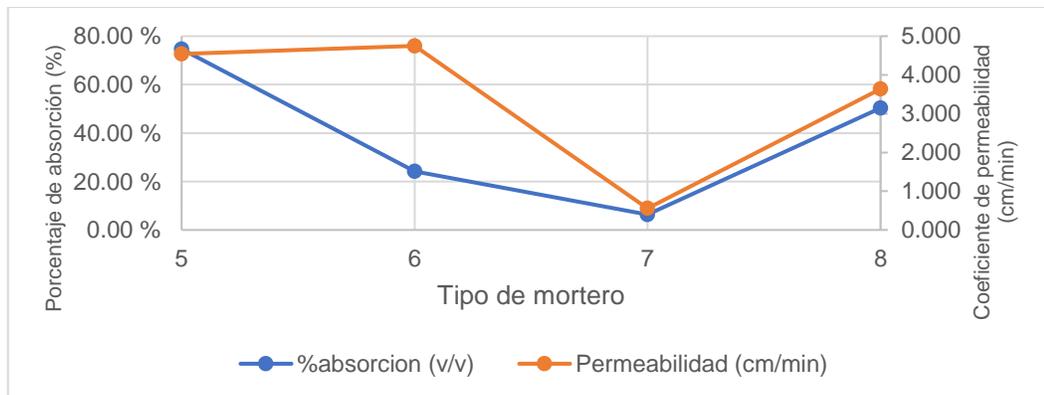
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. Porcentaje de absorción y permeabilidad en morteros 5, 6, 7 y 8

Tipo de mortero	Altura inicial (cm)	Pérdida total (cm)	Pérdida por evaporación (cm)	Pérdida debida a la permeabilidad (cm)	Porcentaje de absorción (v/v)	Permeabilidad (cm/min)
5	79.0	59.0	0.002	58.998	74.68 %	4.538
6	78.5	19.0	0.001	18.999	24.20 %	4.750
7	78.6	5.0	0.001	4.999	6.36 %	0.555
8	79.5	40.0	0.002	39.998	50.31 %	3.636

Fuente: elaboración propia.

Figura 78. Porcentaje de absorción y permeabilidad en morteros 5, 6, 7 y 8



Fuente: elaboración propia.

### 5.3.6.6. Ensayo de impermeabilización en morteros fase 3

En esta fase se volvieron a evaluar los morteros 5, 6, 7 y 8 puesto que en la fase 2 se presentaron muchos errores en la elaboración de los prismas, como un mal pegado de los blocks y mucho agrietamiento en el revestimiento, provocado por un mal curado del mortero.

Figura 79. **Agrietamiento en el revestimiento y fugas en la unión de los prismas de ensayo utilizados en la fase 2**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).

Colección particular. Guatemala.

Por lo tanto, para la fase 3 se repitió el proceso, pero con mano de obra calificada que elaboró tubos de blocks revestidos con los morteros a evaluar para poder determinar la pérdida de altura del espejo de agua.

Figura 80. **Tubos de ensayo de impermeabilización fase 3**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

Tabla XXXVII. **Datos obtenidos en ensayo de impermeabilización fase 3 para determinar la evapotranspiración**

<b>ENSAYO DE IMPERMABILIDAD FASE 3 (MORTEROS CON CAUCHO TAMIZADO)</b>	
FECHA DE ENSAYO:	3/06/2021
HORA DE INICIO:	14:35
HORA DE FINALIZACIÓN:	17:20
TEMPERATURA MAX °C:	25
TEMPERATURA MIN °C:	17
TEMPERATURA ENS °C:	19
KT	0.17
LATITUD USAC:	14°38'58" N
Ro mm/día	15.6
<b>Evapotranspiración del elemento</b>	
Rs (mm/día)	7.50
Eto (mm/día)	3.72
EtR (mm/día)	1.78
EtR (mm/hora)	0.07
EtR (cm/min)	0.000123266

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Duración del ensayo de impermeabilización fase 3**

Tipo de mortero	Hora de inicio	Hora de finalización	Duración del ensayo (hr)	Duración del ensayo (min)
5	14:35	17:15	02:40	160.00
6	14:46	17:15	02:29	149.00
7	14:52	15:42	00:50	50.00
8	14:52	15:43	00:51	51.00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. **Dimensiones de las muestras de ensayo fase 3**

Tipo de mortero	Ancho (cm)	Largo (cm)	Área de ensayo (cm <sup>2</sup> )	Altura inicial (cm)	Volumen inicial (cm <sup>3</sup> )
5	11.00	10.00	110.0	73.5	8085.0
6	10.30	10.00	103.0	73.5	7570.5
7	10.00	10.00	100.0	73.5	7350.0
8	10.00	10.00	100.0	73.0	7300.0

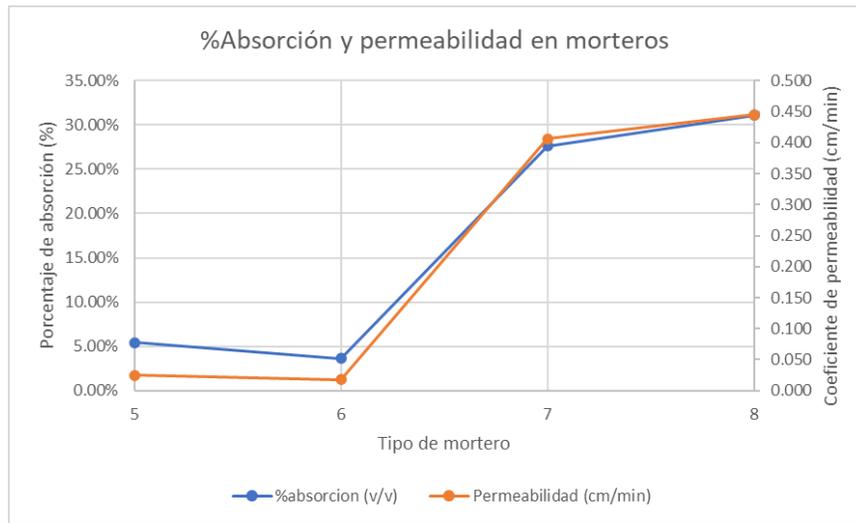
Fuente: elaboración propia.

Tabla XL. **Porcentaje de absorción y permeabilidad en morteros 5, 6, 7 y 8 fase 3**

Tipo de mortero	Pérdida total (cm)	Pérdida por evaporación (cm)	Pérdida debida a la permeabilidad (cm)	Volumen absorbido (cm <sup>3</sup> )	Porcentaje de absorción (v/v)	Permeabilidad (cm/min)
5	4.0	0.020	3.980	437.831	5.42 %	0.025
6	2.7	0.018	2.682	276.208	3.65 %	0.018
7	20.3	0.006	20.294	2029.383	27.61 %	0.406
8	22.7	0.006	22.694	2269.371	31.09 %	0.445

Fuente: elaboración propia.

Figura 81. **Gráfica porcentaje de absorción y permeabilidad en morteros 5, 6, 7 y 8 fase 3**



Fuente: elaboración propia.

### 5.3.6.7. **Ensayo de impermeabilización en morteros fase 4**

Para la última fase del ensayo de impermeabilización se realizó un ensayo a gran escala con el mortero que presentó los mejores resultados en los ensayos de compresión, adherencia y de impermeabilización en las primeras fases, este mortero fue, en efecto, el mortero 6.

Se realizó un tanque de block con base de concreto 1:2:3, el cual se revistió interiormente del mortero 6 y se llenó de agua a una altura conocida, este tanque se cerró con lámina galvanizada y se realizó el mismo procedimiento que en las fases anteriores, con la diferencia que el tiempo de ensayo varió desde 1 día, hasta 4 meses, obteniendo resultados de absorción, impermeabilidad y pH del agua.

Figura 82. **Elaboración del tanque revestido de mortero 6 para ensayo de impermeabilización**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

Figura 83. **Ensayo de impermeabilización fase 4**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

Tabla XLI. **Duración de los ensayos de impermeabilización en la fase 4**

DÍAS DE ENSAYO				HORA INICIO REVISION:	HORA FINAL REVISION:
ENSAYO	INICIO	FINAL	días		
ENSAYO 1:	26/05/2021	26/05/2021	1	10:02	11:57
ENSAYO 2:	26/05/2021	1/06/2021	6	12:14	12:15
ENSAYO 3:	9/06/2021	17/06/2021	8	11:43	11:44
ENSAYO 4:	17/06/2021	17/11/2021	153	10:00	10:46
ENSAYO 5:	17/11/2021	18/11/2021	1	12:00	12:01
ENSAYO 6:	18/11/2021	23/11/2021	5	11:48	11:48
KT	0.17				
LATITUD USAC: 14°38'58" N					

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLII. **Temperaturas promedio durante los ensayos de impermeabilización fase 4**

ENSAYO	TEMP. MAX:	TEMP. MIN:	TEMP. ENSAYO:
ENSAYO 1:	25	18	24
ENSAYO 2:	27	16	25
ENSAYO 3:	26	16	23
ENSAYO 4:	-	-	-
ENSAYO 5:	25	16	24
ENSAYO 6:	23	16	21

Fuente: elaboración propia.

El ensayo 4 fue realizado desde el mes de junio hasta el mes de noviembre, se consideraron las temperaturas promedio de cada mes durante este periodo, al igual que el factor de reducción debido a la envolvente térmica de los materiales se ve afectado en la absorción, considerando que el viento generó un efecto del punto de rocío dentro del tanque, con base en los datos

obtenidos en los ensayos anteriores, se consideró un 30 % de reducción debido a este efecto.

Tabla XLIII. **Temperaturas promedio durante el ensayo 4 de la fase 4 de impermeabilización**

<b>TEMPERATURAS PROMEDIO DE JUNIO A NOVIEMBRE</b>			
<b>MES</b>	<b>MAXIMA</b>	<b>MINIMA</b>	<b>MEDIA</b>
JUNIO	25	17	21
JULIO	24	17	20.5
AGOSTO	24	17	20.5
SEPTIEMBRE	24	17	20.5
OCTUBRE	24	17	20.5
NOVIEMBRE	23	16	19.5

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIV. **Determinación de EtR y pérdida por evapotranspiración para el ensayo 4 de impermeabilización fase 4**

<b>ENSAYO DE IMPERMEABILIZACION 4 DE JUNIO A NOVIEMBRE</b>									
<b>MES</b>	<b>Ro mm/día</b>	<b>Rs mm/día</b>	<b>Eto mm/día</b>	<b>EtR mm/día</b>	<b>EtR mm/hora</b>	<b>EtR cm/min</b>	<b>DÍAS</b>	<b>Min.</b>	<b>Pérdida por evap. (cm)</b>
JUN	15.6	7.50	3.93	1.87	0.077981	0.000129969	13	18720	2.433021269
JUL	15.6	7.02	3.63	1.73	0.072004	0.000120007	31	44640	5.35713262
AGO	15.5	6.97	3.60	1.72	0.071542	0.000119238	31	44640	5.322792026
SEPT	15	6.75	3.49	1.66	0.069235	0.000115392	30	43200	4.984924894
OCT	13.8	6.21	3.21	1.53	0.063696	0.00010616	31	44640	4.739001933
NOV	12.5	5.62	2.83	1.35	0.056188	9.36478E-05	17	24480	2.292498259
<b>TOTAL</b>						<b>0.000684415</b>	<b>153</b>	<b>220320</b>	<b>25.12937</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLV. **Determinación de EtR y pérdida por evapotranspiración para los ensayos 1, 2, 3 y 5 de impermeabilización fase 4**

DETERMINACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN PARA ENSAYO DE IMPERMEABILIZACIÓN FASE 4								
ENSAYO	Ro mm/día	Rs mm/día	Eto mm/día	EtR mm/día	EtR mm/hora	EtR cm/min	Min.	Perdida por evap. (cm)
1	15.7	7.06	3.98	1.90	0.079092	0.000131	115	0.015159
2	15.6	8.80	5.08	2.42	0.100873	0.000168	8657	1.455432
3	15.6	8.39	4.62	2.20	0.091682	0.000152	11483	1.754647
4	-	-	-	-	-	0.000684	-	25.12937
5	12.5	6.38	3.60	1.71	0.071403	0.000119	1514	0.180172
6	12.5	5.62	2.94	1.40	0.058449	0.000097	7187	0.700128

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVI. **Dimensiones del tanque de ensayo y volumen de agua (cm<sup>3</sup>)**

ENSAYO	Ancho (cm)	Largo (cm)	Área de ensayo (cm <sup>2</sup> )	Altura inicial (cm)	Volumen inicial (cm <sup>3</sup> )
1	42	51	2142	32.5	69615
2	42	51	2142	27.5	58905
3	42	51	2142	33.5	71757
4	42	51	2142	31.5	67473
5	42	51	2142	30	64260
6	42	51	2142	30	64260

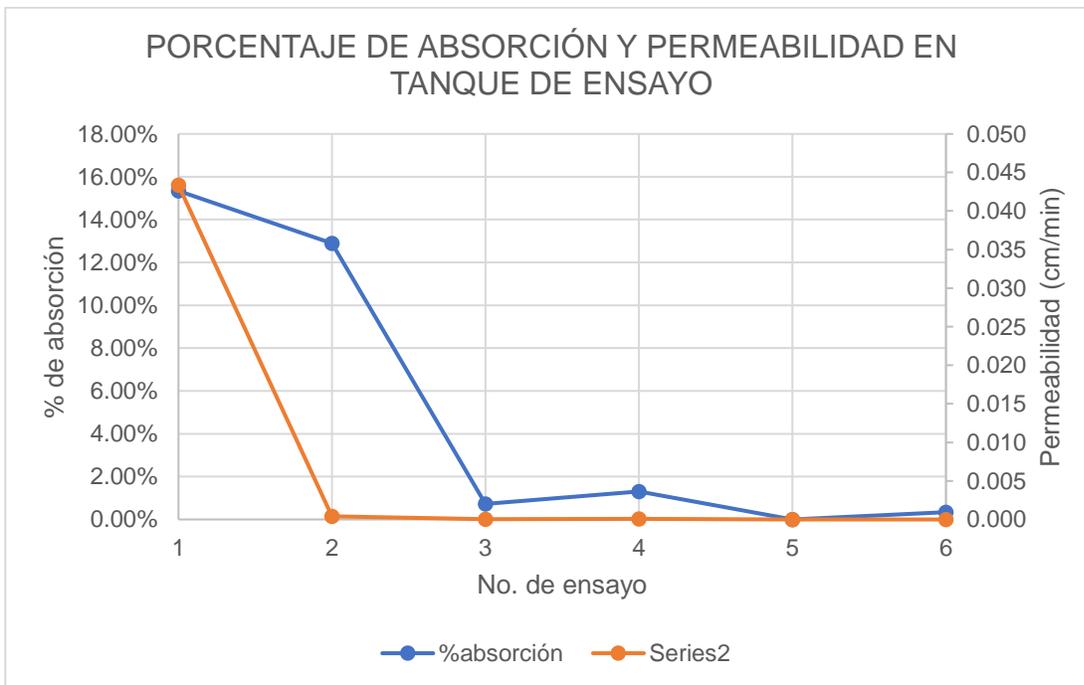
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVII. **Porcentaje de absorción y permeabilidad del mortero 6, fase 4**

ENSAYO	Pérdida total (cm)	Pérdida por EtR (cm)	Pérdida debida a la permeabilidad (cm)	Volumen absorbido (cm <sup>3</sup> )	Porcentaje de absorción (v/v)	Permeabilidad (cm/min)	minutos de ensayo
1	5	0.015	4.985	10677.529	15.34 %	0.043	115
2	5	1.455	3.545	7592.465	12.89 %	4.094E-04	8657
3	2	1.755	0.245	525.545	0.73 %	2.136E-05	11483
4	26.5	25.129	1.371	2935.887	1.31 %	6.766E-05	20255
5	0.18	0.180	0.000	0.000	0.00 %	0.000	1514
6	0.8	0.700	0.100	213.927	0.33 %	1.390E-05	7187
PROMEDIO					5.10 %	0.007	49211

Fuente: elaboración propia.

Figura 84. **Gráfica porcentaje de absorción y permeabilidad en tanque de ensayo de impermeabilización, fase 4**



Fuente: elaboración propia.

#### **5.3.6.7.1. Determinación del pH del agua contenida en el tanque de ensayo**

En el ensayo 4 de la fase 4 para determinar la impermeabilización del mortero 6 se midió el pH del agua, considerando que estuvo 3 meses en completo reposo. Para ello, se utilizó una tira indicadora universal de pH “Merck” la cual se sumergió durante 5 segundos en el agua estancada y, después de 30 segundos, se comparó la colorimetría obtenida con la escala colorimétrica universal, determinando un pH entre 8 y 9.

**Figura 85. Ensayo para determinar el pH de la muestra de agua para el ensayo 4 de impermeabilización, fase 4**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

Figura 86. **Determinación del pH de la muestra de agua para el ensayo 4 de impermeabilización, fase 4**



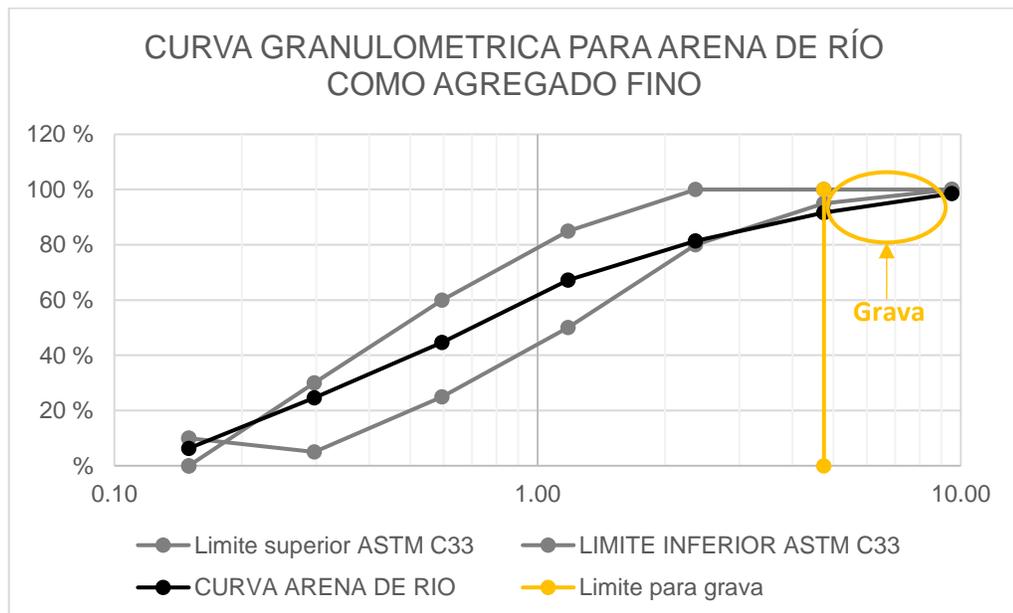
Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1. Determinación de la granulometría a utilizar en el agregado fino y el caucho granulado

Con los resultados obtenidos en el análisis granulométrico de la arena de río se determinó que su granulometría está dentro de los límites establecidos por la norma ASTM C33, considerando que todos los granos arriba del tamiz #4 se especifican como grava y no deben ser utilizados dentro de la mezcla del mortero.

Figura 87. Límite de la granulometría del agregado fino para utilizar en los morteros de ensayo



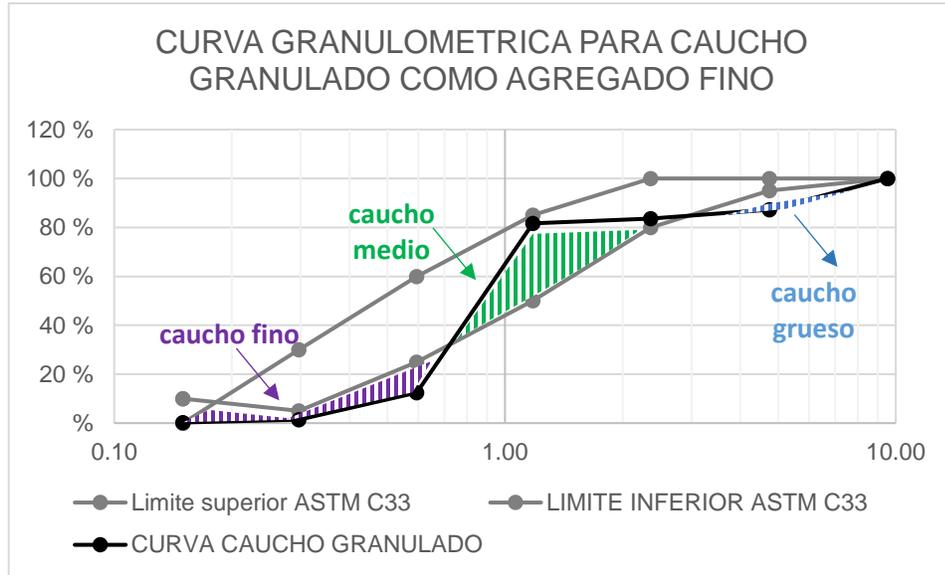
Fuente: elaboración propia.

Al comparar la curva granulométrica del caucho granulado con los límites establecidos por la norma ASTM C33 se encontró que se divide en 3 secciones, las cuales se utilizaron para identificar 3 granulometrías distintas en el caucho: Fina, media y gruesa.

- Granulometría fina: Caucho que pasa el tamiz no. 30 hasta el no. 100
- Granulometría media: Caucho que pasa el tamiz no. 8 y queda retenido en el tamiz no. 30.
- Granulometría gruesa: Caucho que queda retenido en el tamiz no. 8 hasta el tamiz 3/8".

Se consideró no utilizar la granulometría fina debido a que esta podría causar los mismos efectos que las arcillas causan en la elaboración de los morteros, también se decidió considerar que la granulometría media sería la que pasa el tamiz no. 16 y queda retenida en el tamiz no. 30 para considerar como granulometría gruesa aquel caucho que queda retenido en el tamiz no. 16 hasta el no. 4 y respetar que los granos mayores al tamiz no. 4 son considerados como grava y no pueden ser utilizados en la elaboración de morteros.

Figura 88. **Determinación de las 3 granulometrías presentadas en el caucho granulado**



Fuente: elaboración propia.

## 6.2. Ensayo de morteros sometidos a compresión

Se analizaron los morteros sometidos a compresión a 7, 14 y 28 días y se obtuvo la gráfica correspondiente a cada ensayo, donde se identifica el valor de  $f'_m$  que es su resistencia media a la compresión, así como su zona de Resiliencia.

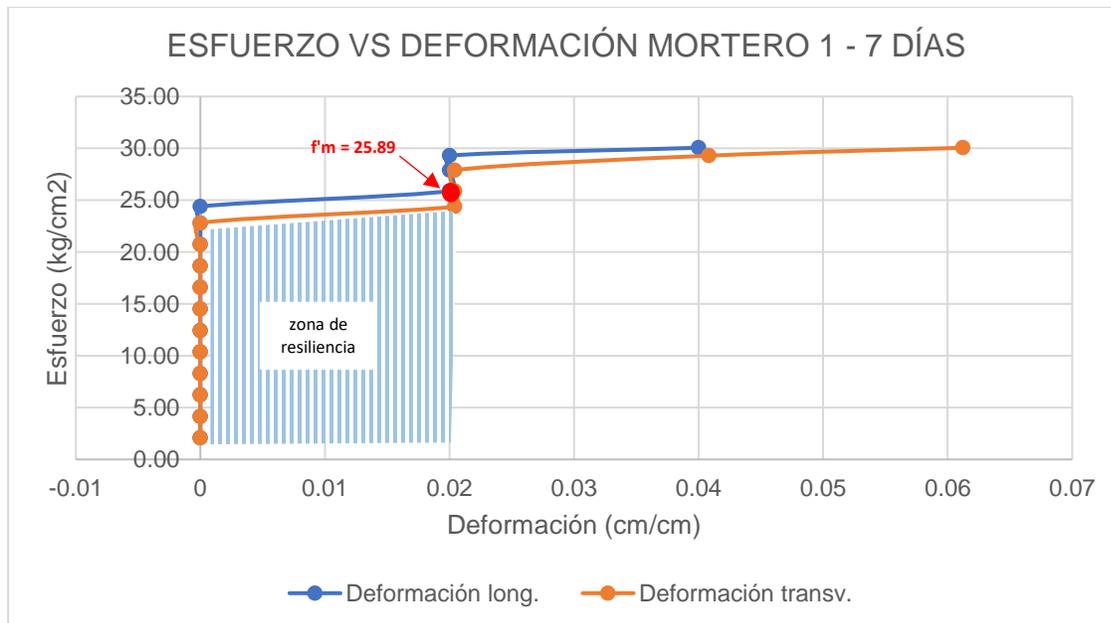
### 6.2.1. Determinación de $f'_m$ y zona de Resiliencia para los morteros sometidos a compresión

Al realizar un análisis en todas las gráficas obtenidas de los ensayos de resistencia a compresión en los morteros se identificó que para la deformación unitaria 0.02 los morteros presentaban la transición de la zona elástica a la zona plástica. Considerando que el caucho provoca un aumento en la Resiliencia de

los morteros gracias a sus propiedades elásticas, se determinaron los valores de diseño  $f'_m$  para  $\epsilon_x = 0.02$  y la zona de Resiliencia de los elementos abarca desde  $\epsilon_x = 0.0005$  a  $\epsilon_x = 0.02$ .

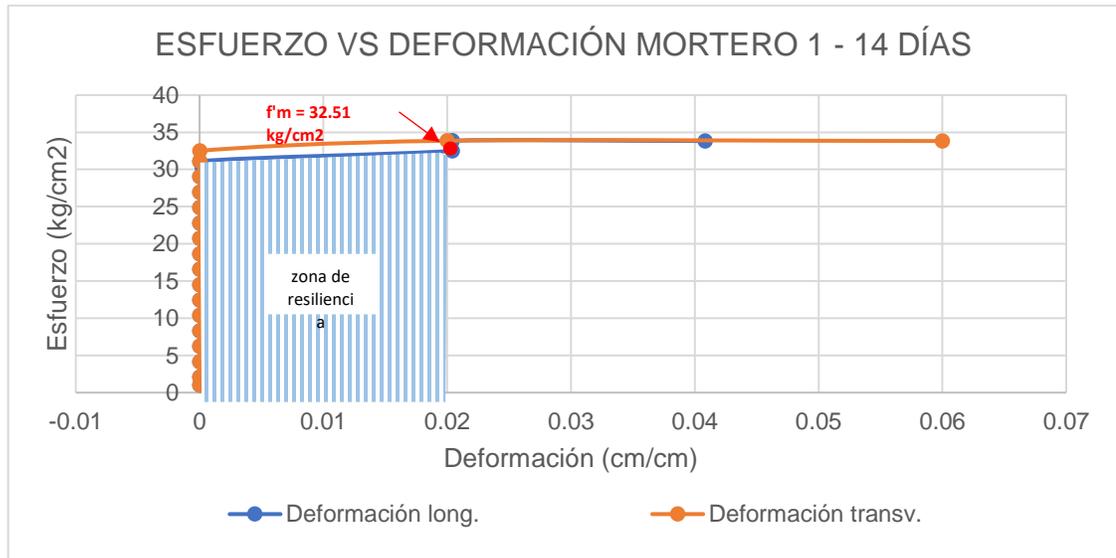
- Mortero 1

Figura 89.  $f'_m$  y zona de Resiliencia para mortero 1 - 7 días



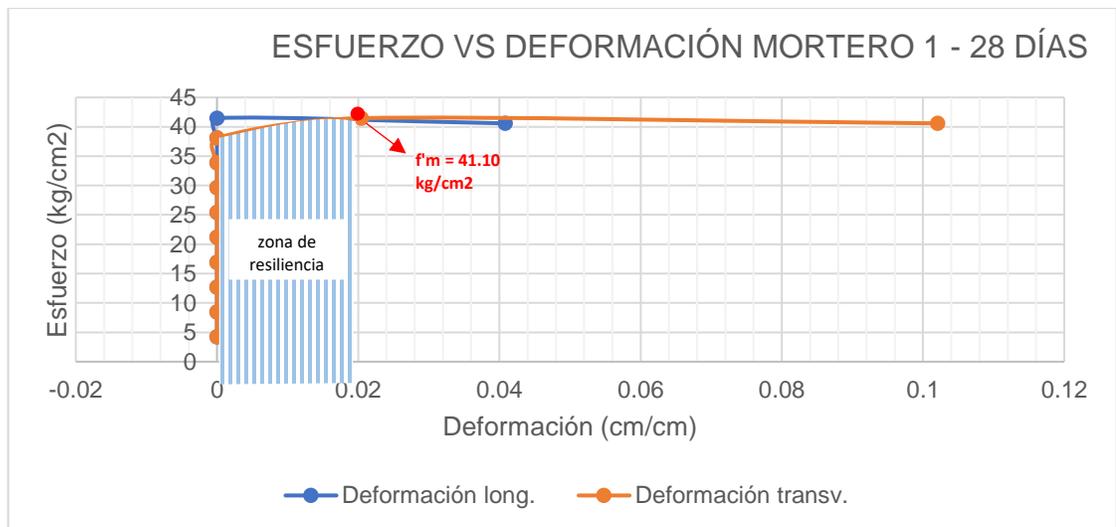
Fuente: elaboración propia.

Figura 90.  $f'_m$  y zona de Resiliencia para mortero 1 – 14 días



Fuente: elaboración propia.

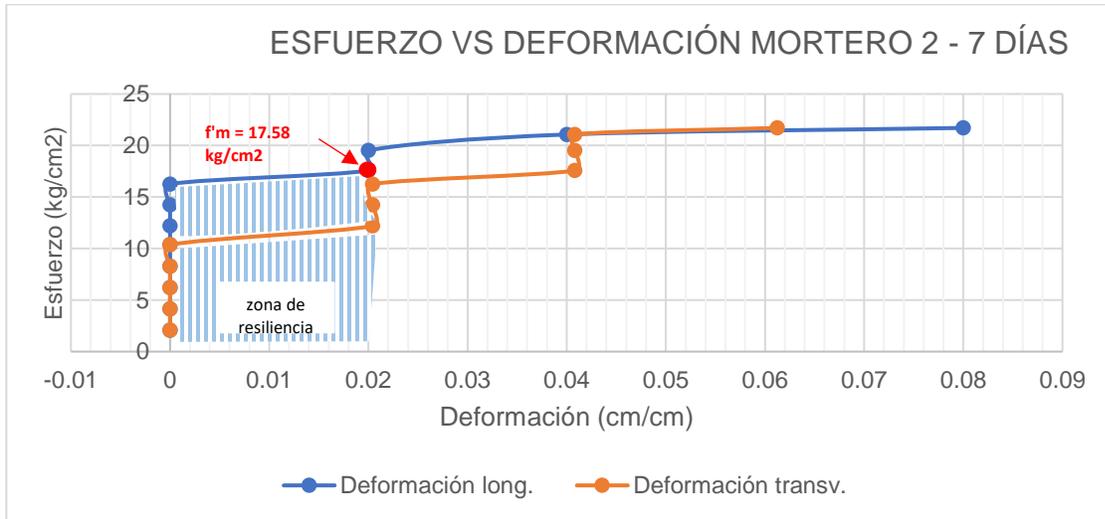
Figura 91.  $f'_m$  y zona de Resiliencia para mortero 1 – 28 días



Fuente: elaboración propia.

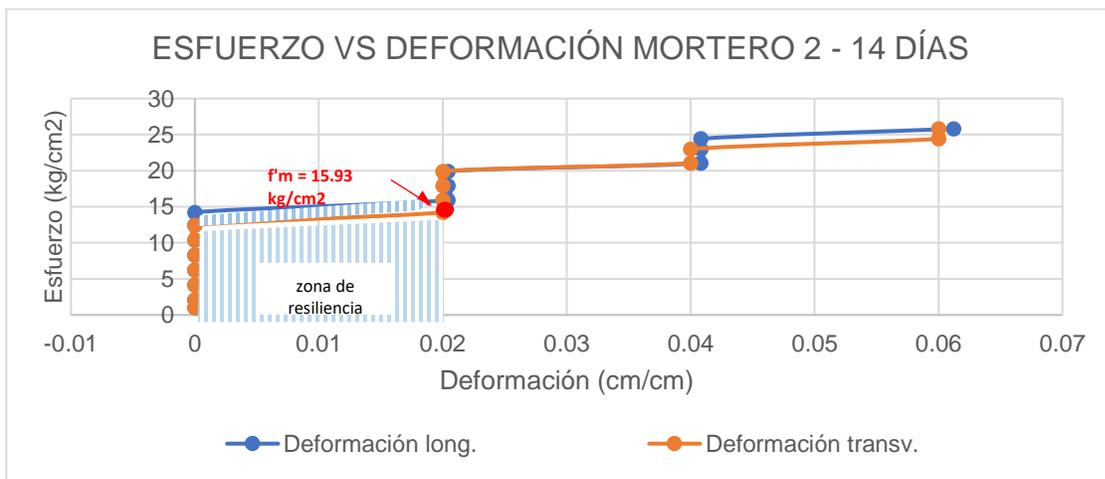
- Mortero 2

Figura 92.  $f'_m$  y zona de Resiliencia para mortero 2 – 7 días



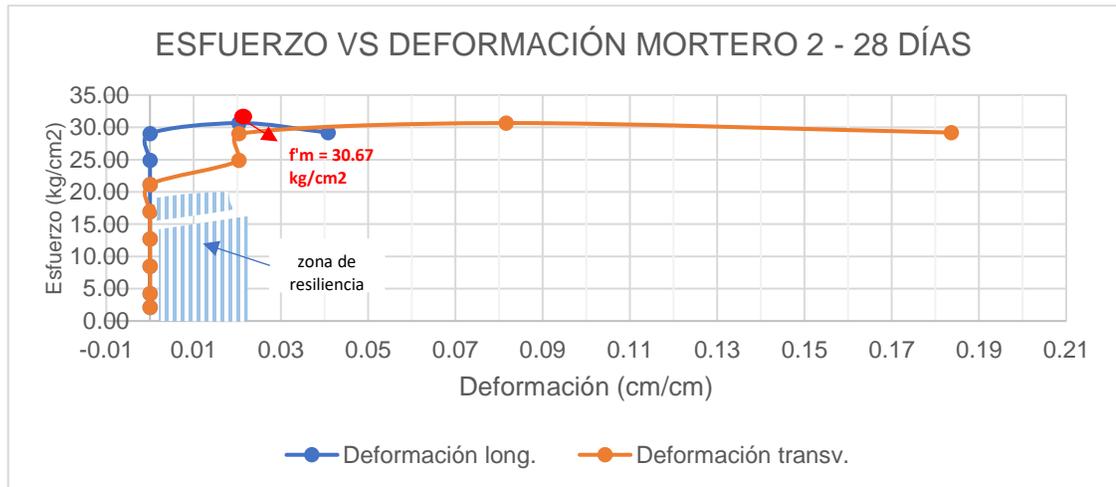
Fuente: elaboración propia.

Figura 93.  $f'_m$  y zona de Resiliencia para mortero 2 – 14 días



Fuente: elaboración propia.

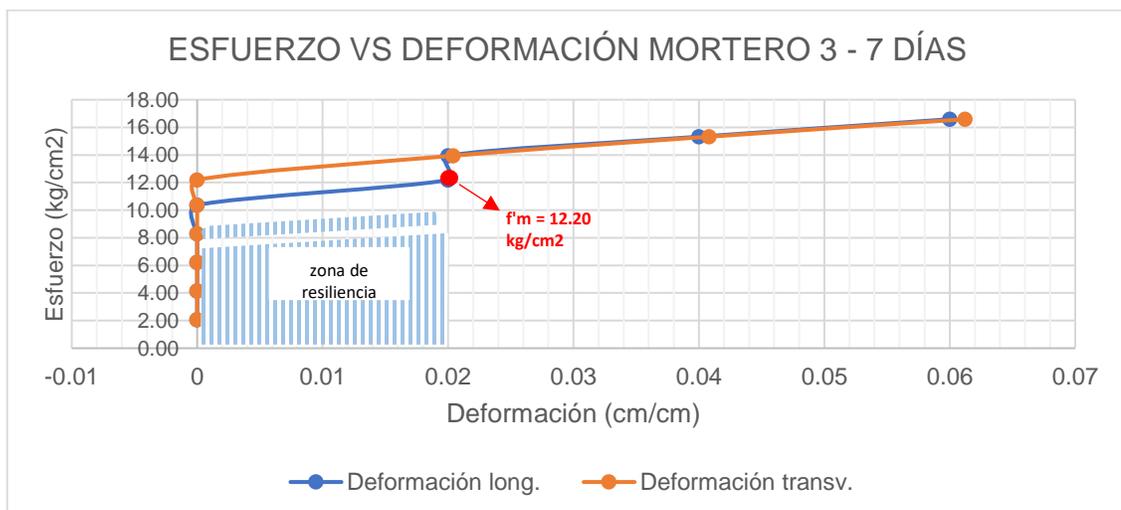
Figura 94.  $f'_m$  y zona de Resiliencia para mortero 2 – 28 días



Fuente: elaboración propia.

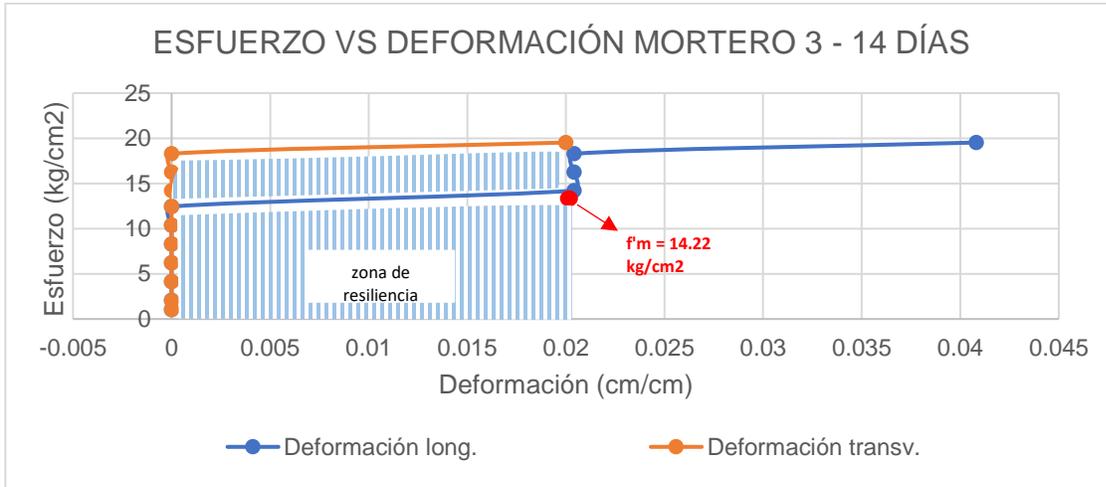
- Mortero 3

Figura 95.  $f'_m$  y zona de Resiliencia para mortero 3 – 7 días



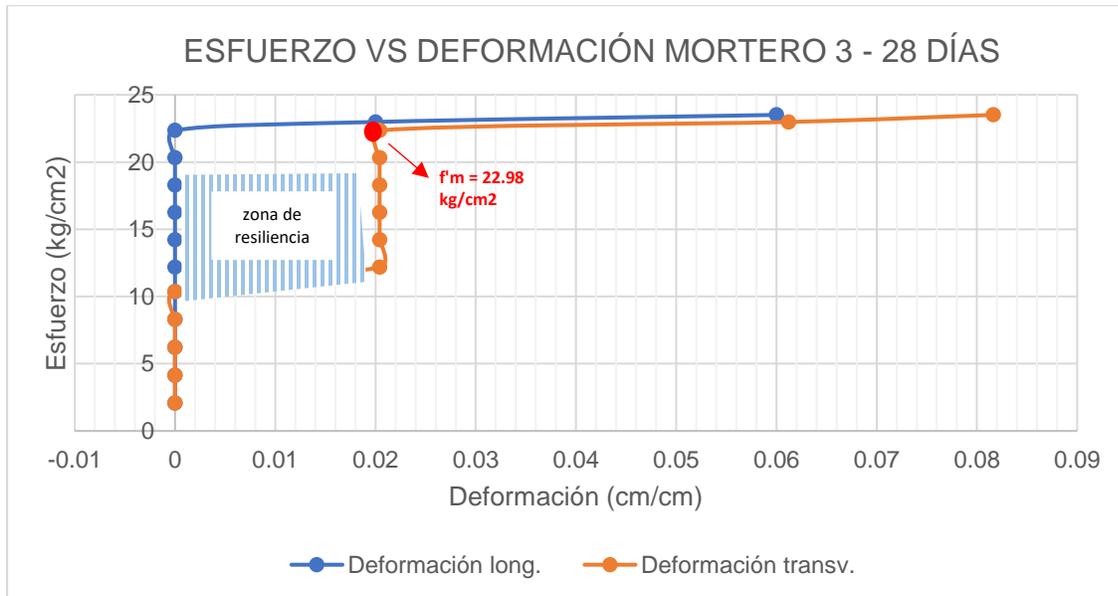
Fuente: elaboración propia.

Figura 96.  $f'_m$  y zona de Resiliencia para mortero 3 – 14 días



Fuente: elaboración propia.

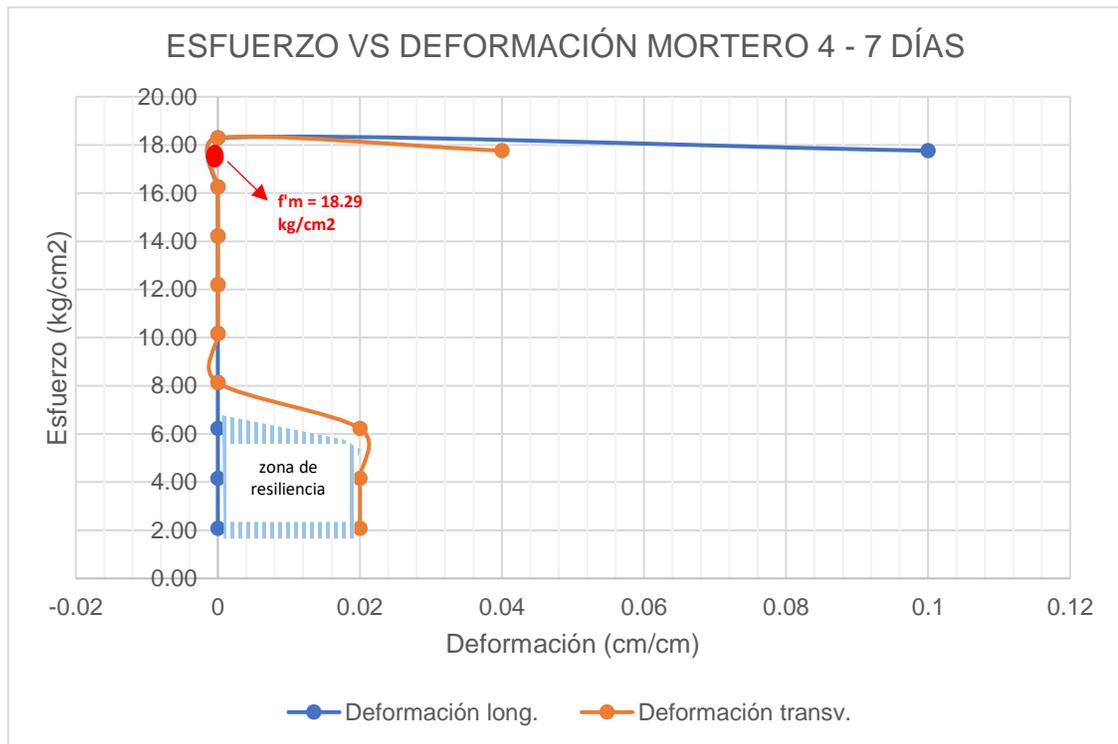
Figura 97.  $f'_m$  y zona de Resiliencia para mortero 3 – 28 días



Fuente: elaboración propia.

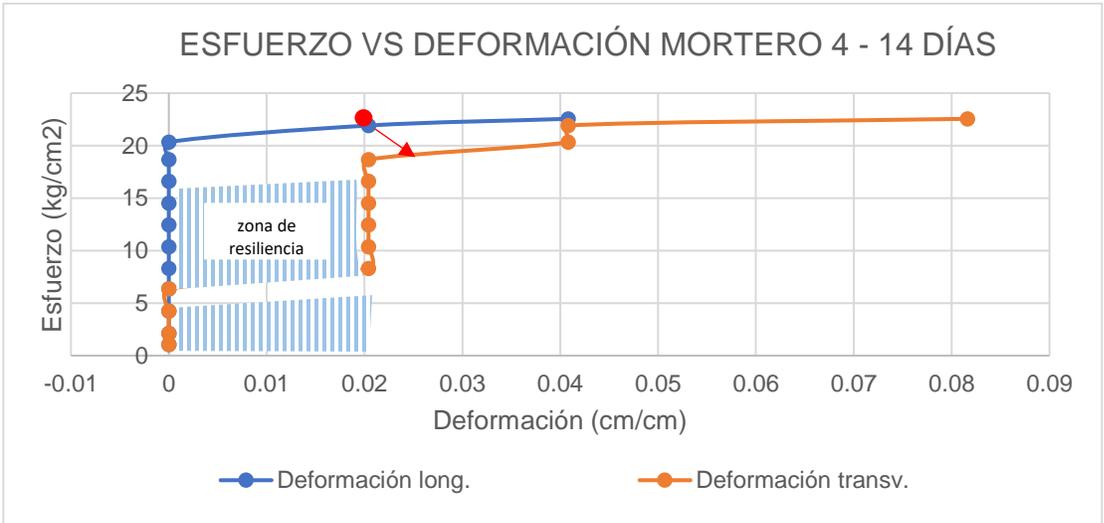
- Mortero 4: en el mortero 4 – 7 días se presentó la transición de la zona elástica a plástica de manera abrupta, por lo que para esta edad se consideró  $f'_m$  para  $\epsilon_x = 0.00$  antes de su ruptura.

Figura 98.  $f'_m$  y zona de Resiliencia para mortero 4 – 7 días



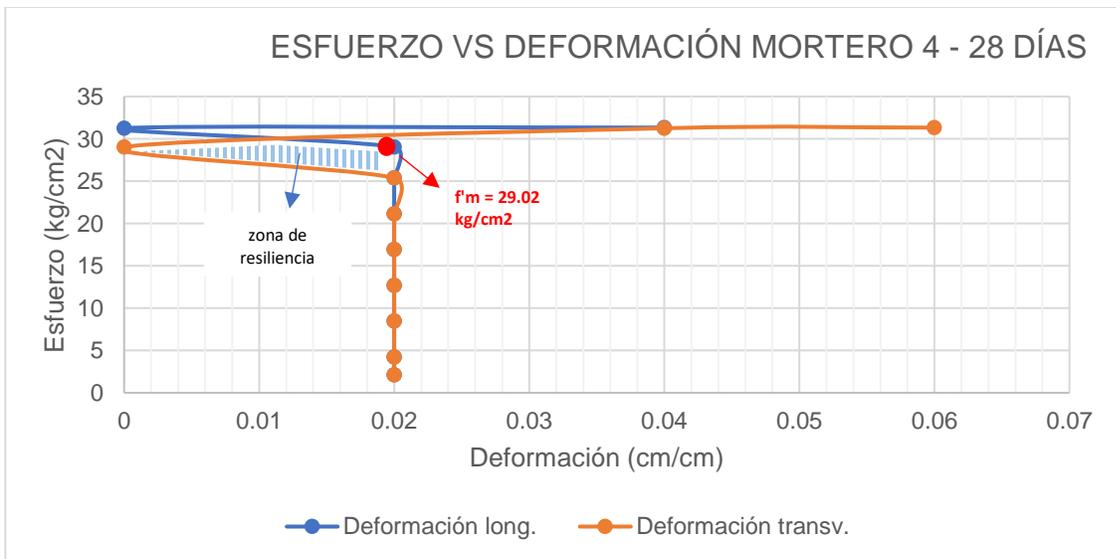
Fuente: elaboración propia.

Figura 99.  $f'_m$  y zona de Resiliencia para mortero 4 – 14 días



Fuente: elaboración propia.

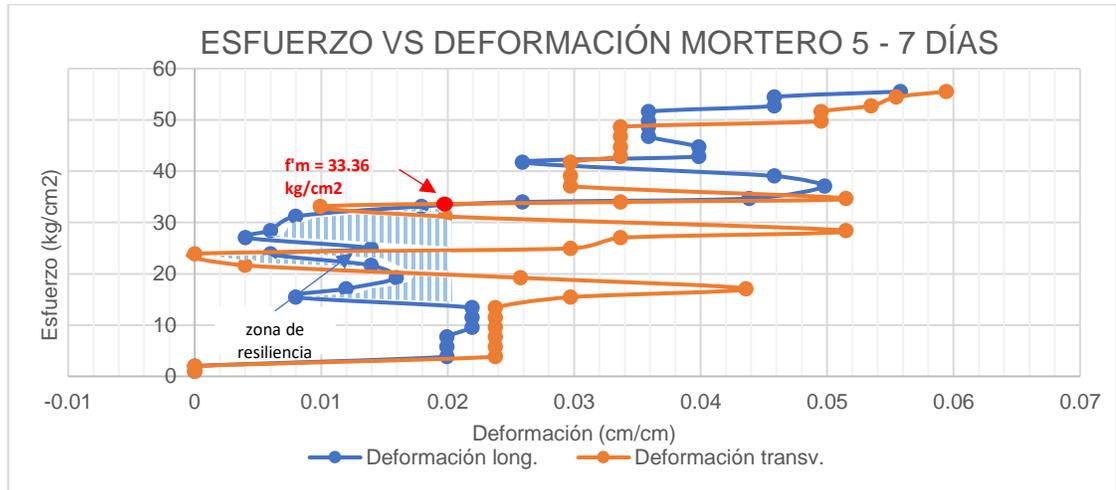
Figura 100.  $f'_m$  y zona de Resiliencia para mortero 4 – 28 días



Fuente: elaboración propia.

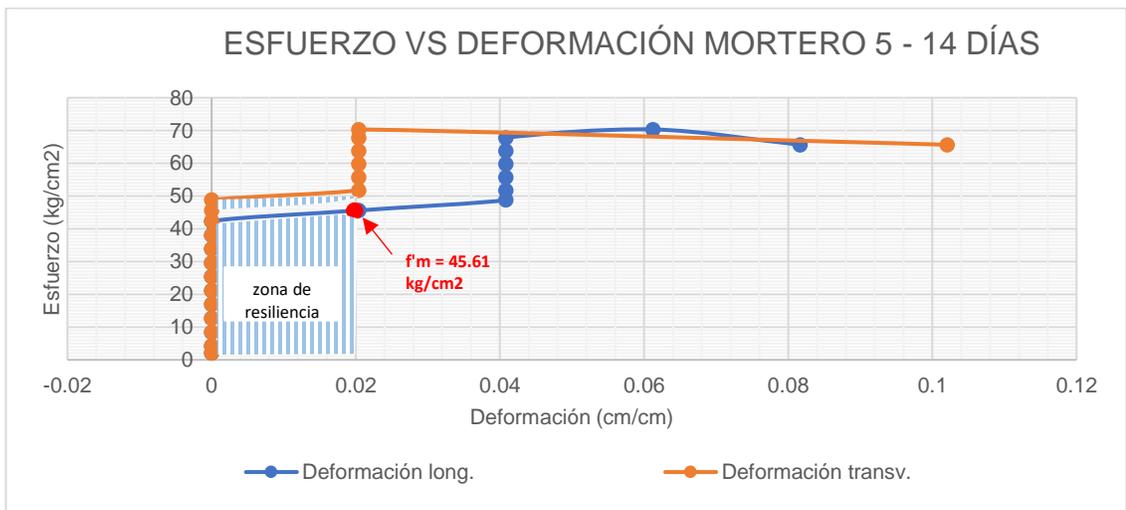
- Mortero 5

Figura 101. **f'm y zona de Resiliencia para mortero 5 – 7 días**



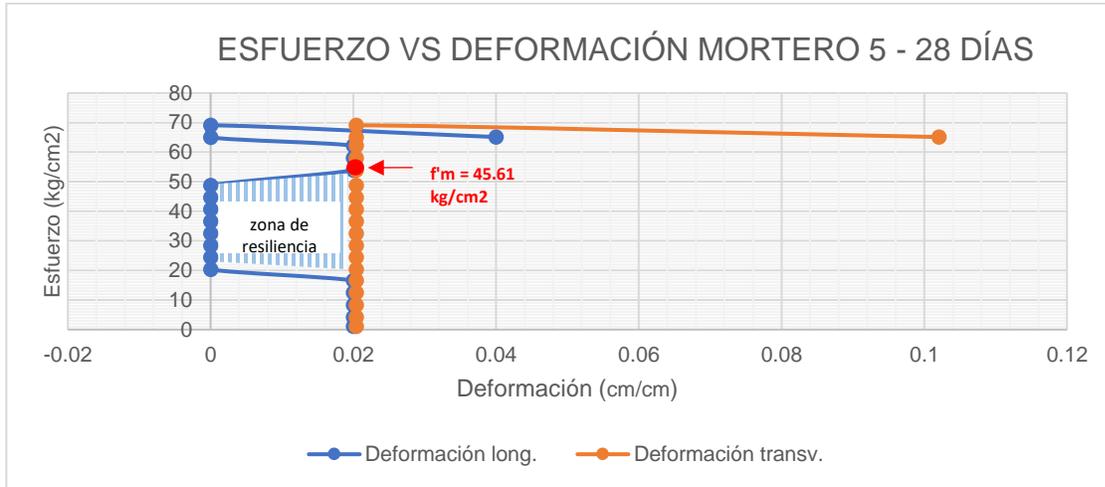
Fuente: elaboración propia.

Figura 102. **f'm y zona de Resiliencia para mortero 5 – 14 días**



Fuente: elaboración propia.

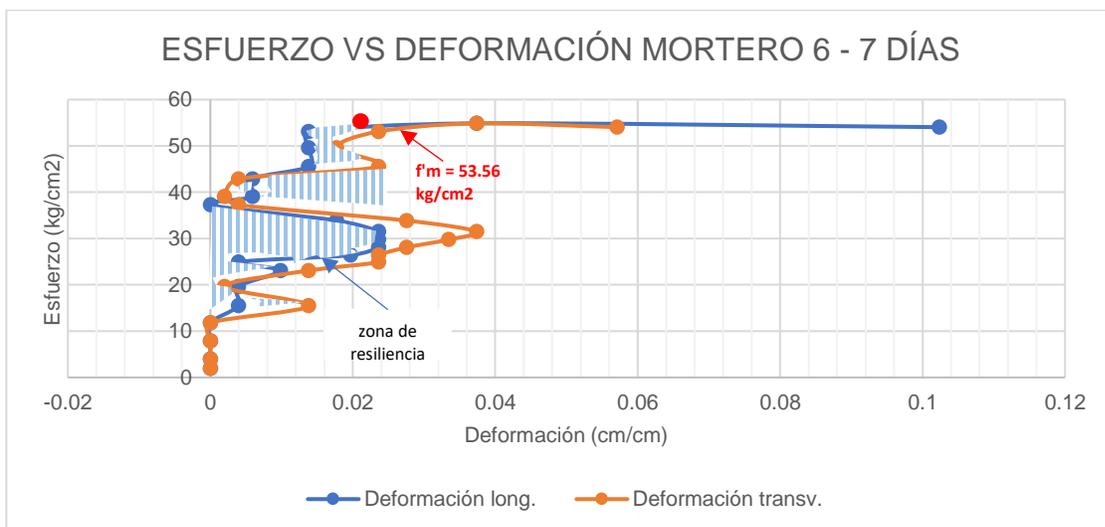
Figura 103. **f'm y zona de Resiliencia para mortero 5 – 28 días**



Fuente: elaboración propia.

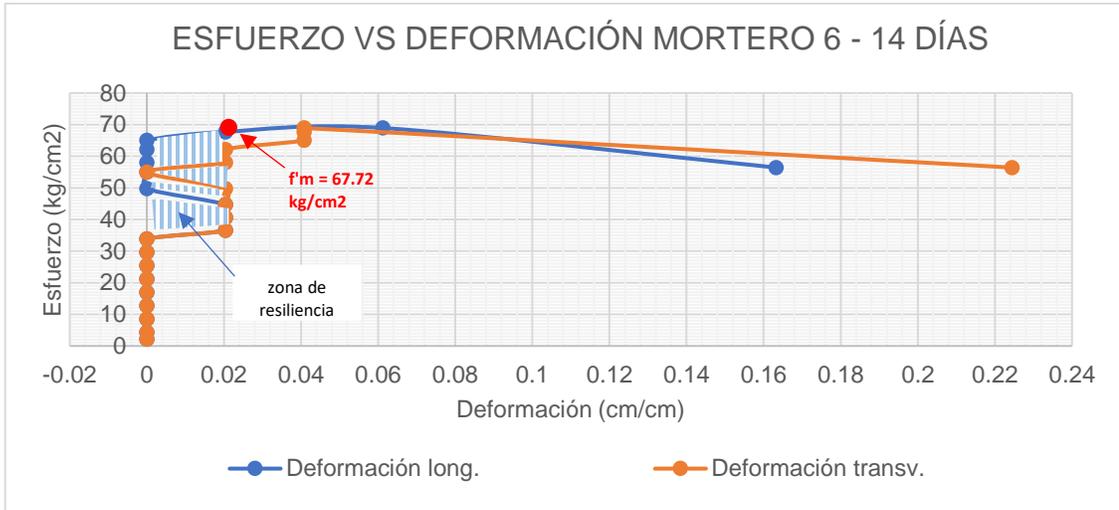
- Mortero 6

Figura 104. **f'm y zona de Resiliencia para mortero 6 – 7 días**



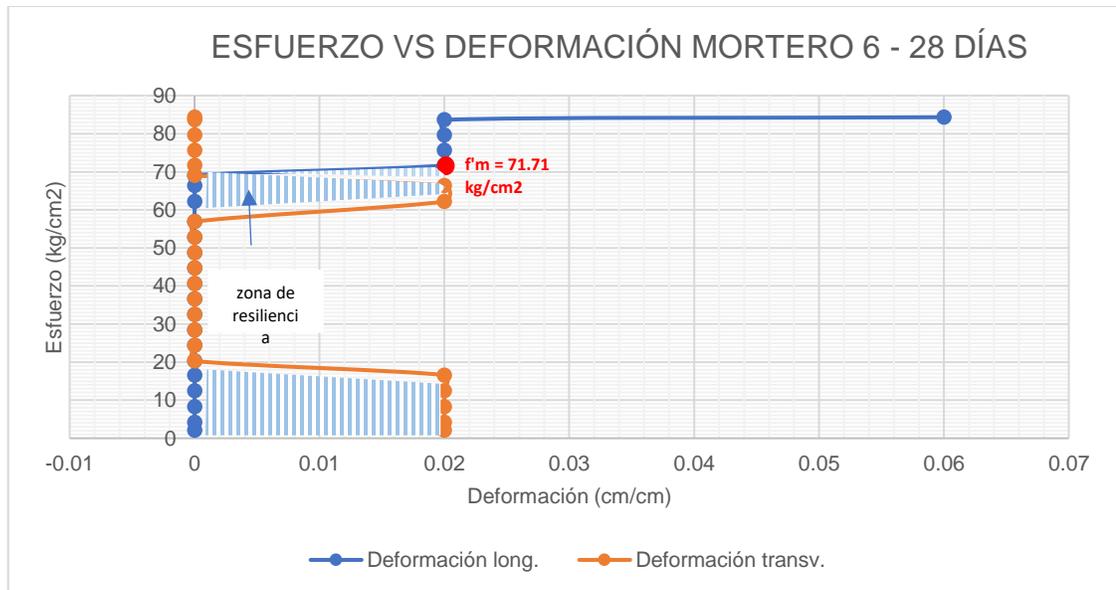
Fuente: elaboración propia.

Figura 105.  $f'm$  y zona de Resiliencia para mortero 6 – 14 días



Fuente: elaboración propia.

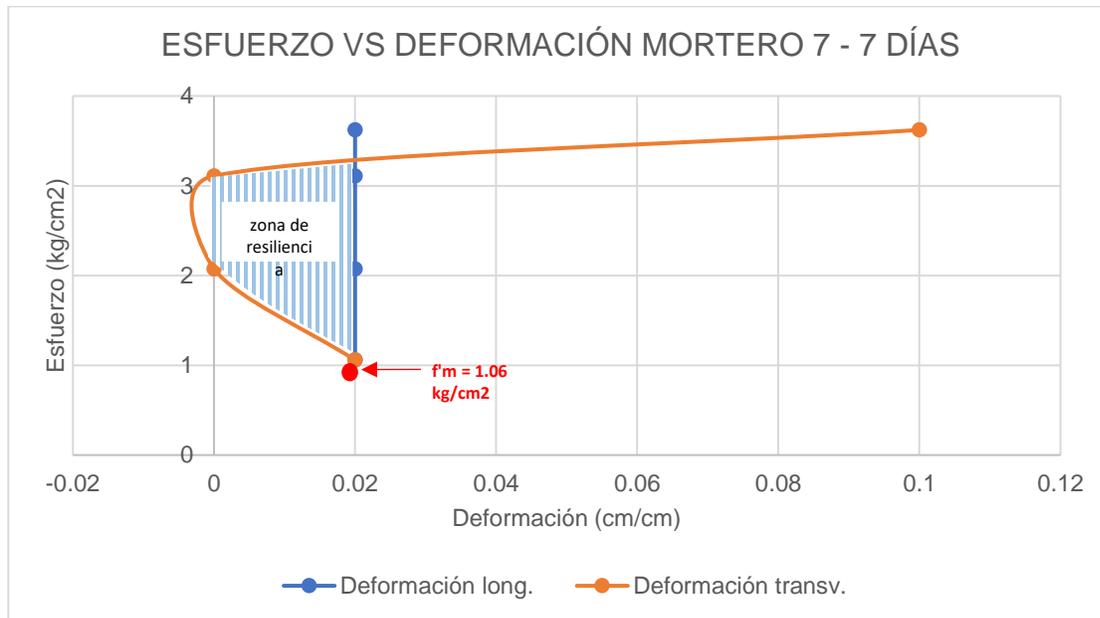
Figura 106.  $f'm$  y zona de Resiliencia para mortero 6 – 28 días



Fuente: elaboración propia.

- Mortero 7

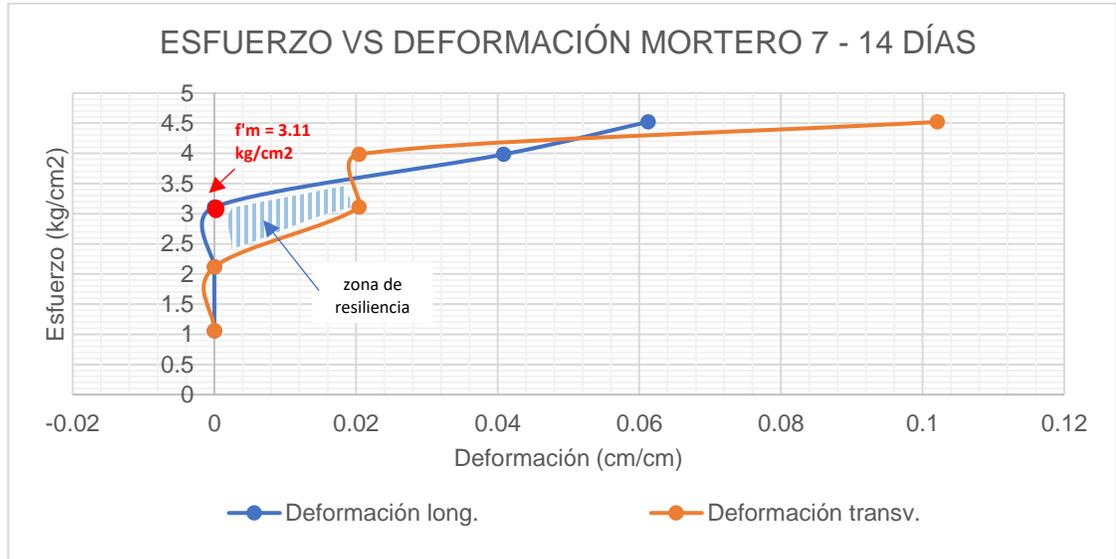
Figura 107.  $f'_m$  y zona de Resiliencia para mortero 7 – 7 días



Fuente: elaboración propia.

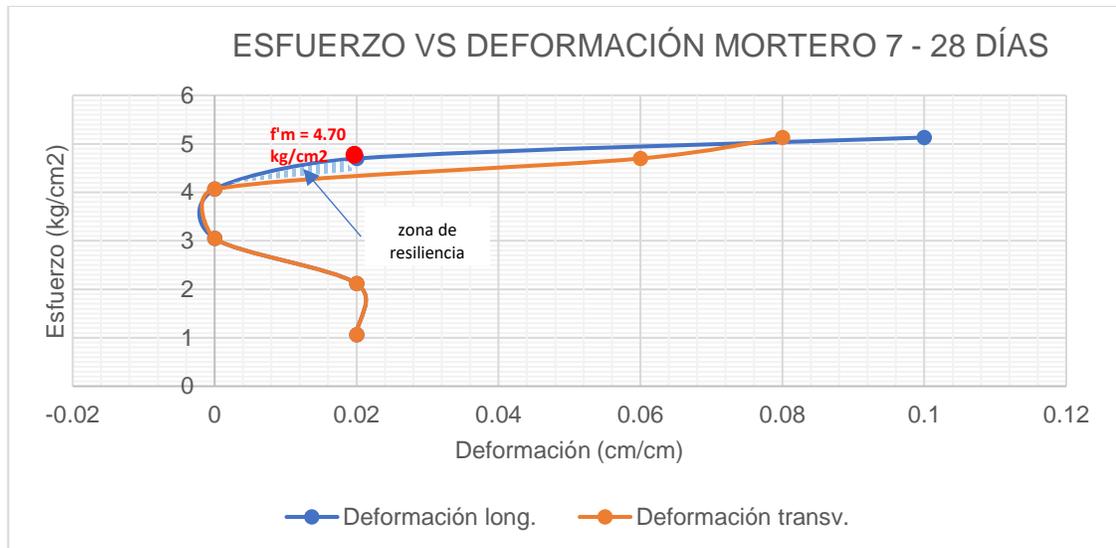
Para el mortero 7- 14 días se presentó el mismo caso que el mortero 4 – 7 días, pues hubo una falla abrupta que provocó el valor de  $f'_m$  en  $\epsilon_x = 0.00$ .

Figura 108.  $f'_m$  y zona de Resiliencia para mortero 7 – 14 días



Fuente: elaboración propia.

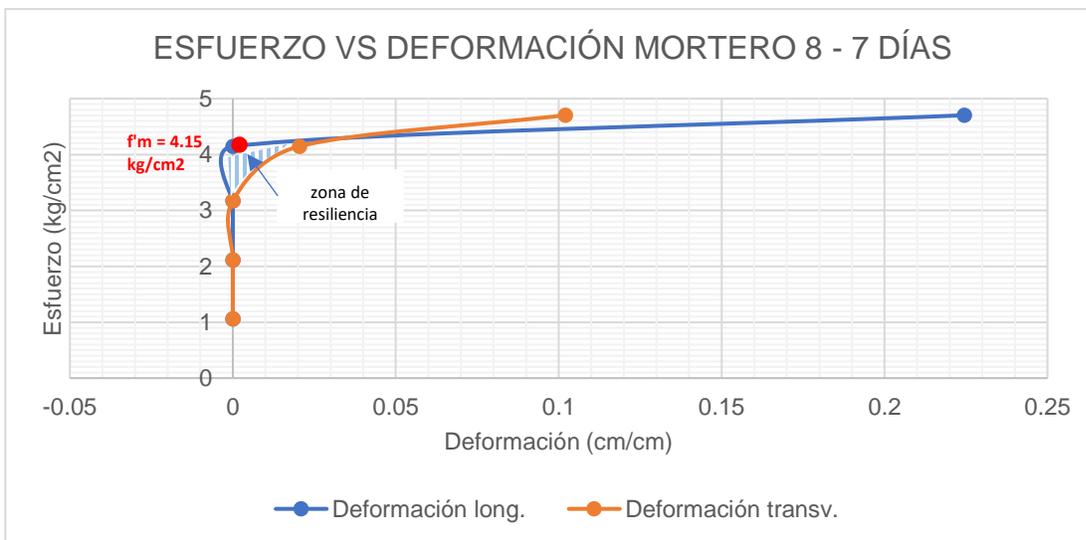
Figura 109.  $f'_m$  y zona de Resiliencia para mortero 7 – 28 días



Fuente: elaboración propia.

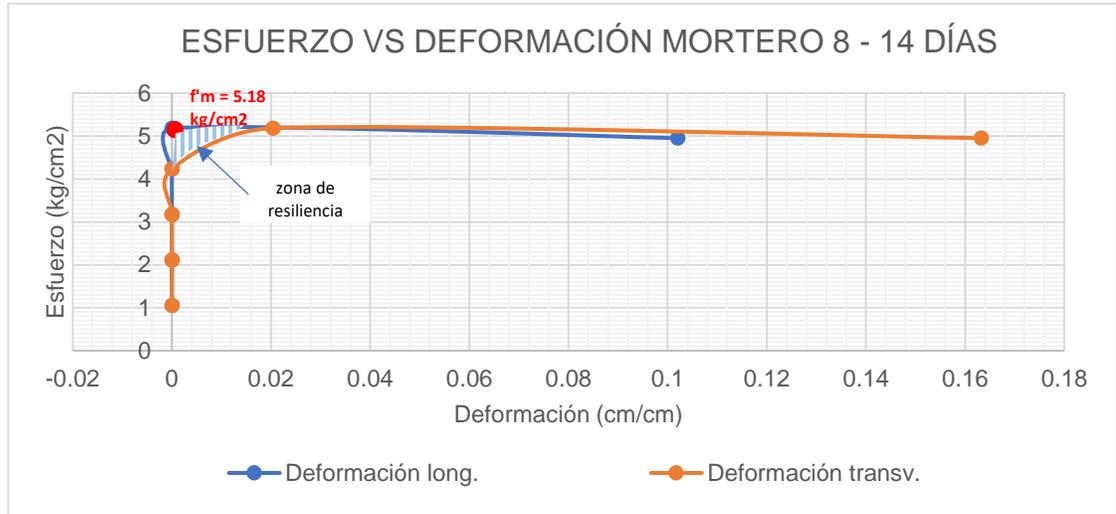
- Mortero 8: el mortero 8 a los 7 y 14 días presentaron  $f'm$  en  $\epsilon_x = 0.00$  y el mortero 8 a los 28 días presentó la primera deformación al primer momento de aplicar la carga, por lo que la deformación mínima obtenida fue 0.02 en x, y se consideró  $f'm$  para la última carga presentada en  $\epsilon_x = 0.02$

Figura 110.  **$f'm$  y zona de Resiliencia para mortero 8 – 7 días**



Fuente: elaboración propia.

Figura 111.  $f'_m$  y zona de Resiliencia para mortero 8 – 14 días



Fuente: elaboración propia.

Figura 112.  $f'_m$  y zona de Resiliencia para mortero 8 – 28 días



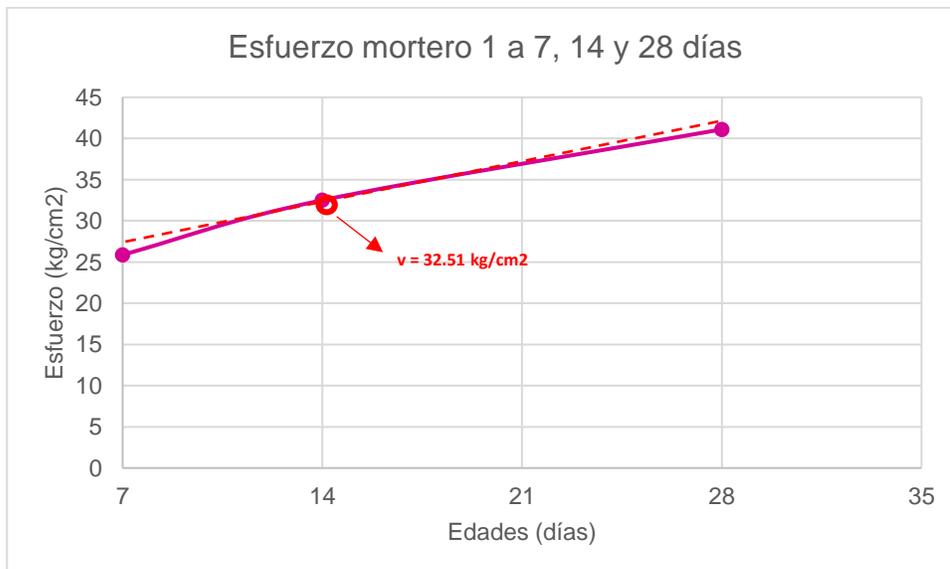
Fuente: elaboración propia.

El mortero 8 a los 28 días, no presentó zona de Resiliencia, desde el inicio del ensayo presentó una deformación de 0.02 longitudinalmente y su falla fue abrupta, llegando hasta una deformación longitudinal de 0.06.

### 6.2.2. $f'_m$ vs edades en morteros sometidos a compresión y determinación de módulo de Poisson

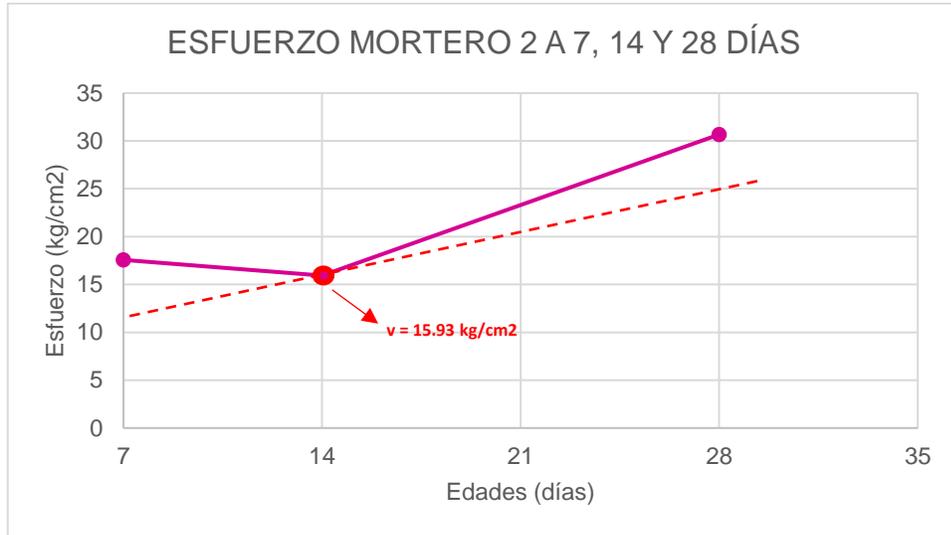
Se realizaron gráficas de  $f'_m$  vs edades en los morteros sometidos a compresión para poder obtener el valor de  $F'_m$  que sería a la edad de 28 días en cada mortero, aparte se determinó el valor del módulo de Poisson trazando una tangente a la gráfica y ubicando el punto tangencial que equivale al valor de Poisson, en la mayoría de los morteros este valor se presentó a los 14 días, exceptuando el mortero 4 que presentó el valor a los 15 días debido al poco incremento del valor  $f'_m$  entre las edades.

Figura 113.  $f'_m$  vs edades y módulo de Poisson para mortero 1



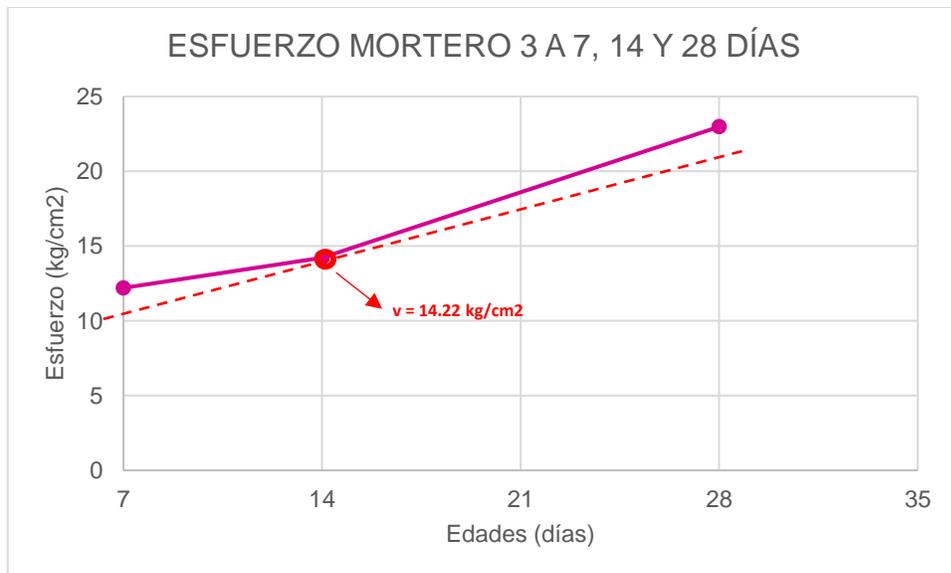
Fuente: elaboración propia.

Figura 114.  $f'_m$  vs edades y módulo de Poisson para mortero 2



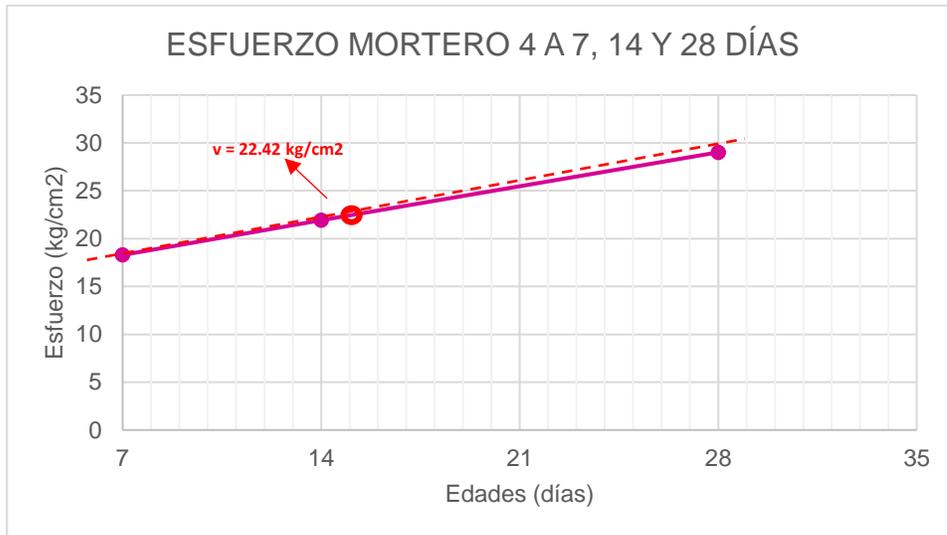
Fuente: elaboración propia.

Figura 115.  $f'_m$  vs edades y módulo de Poisson para mortero 3



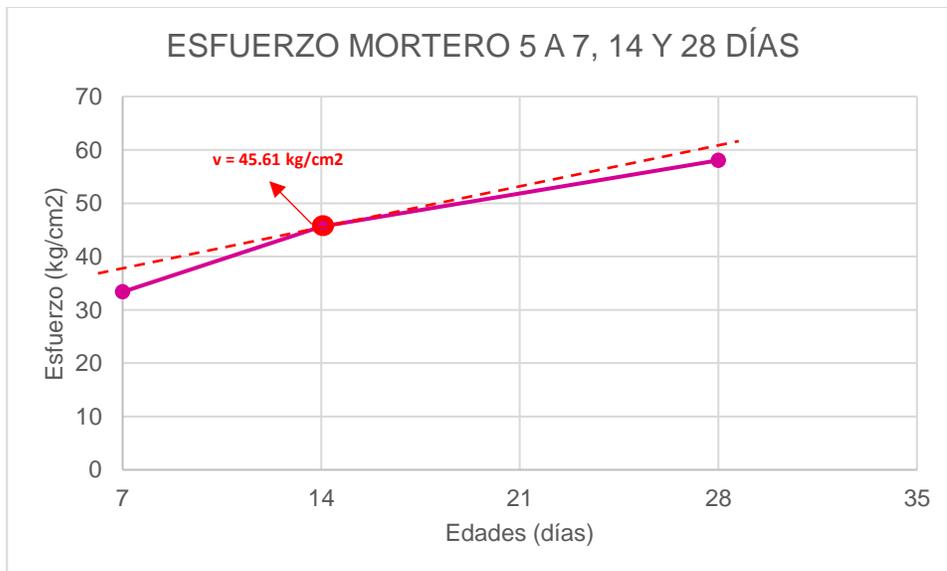
Fuente: elaboración propia.

Figura 116.  $f'_m$  vs edades y módulo de Poisson para mortero 4



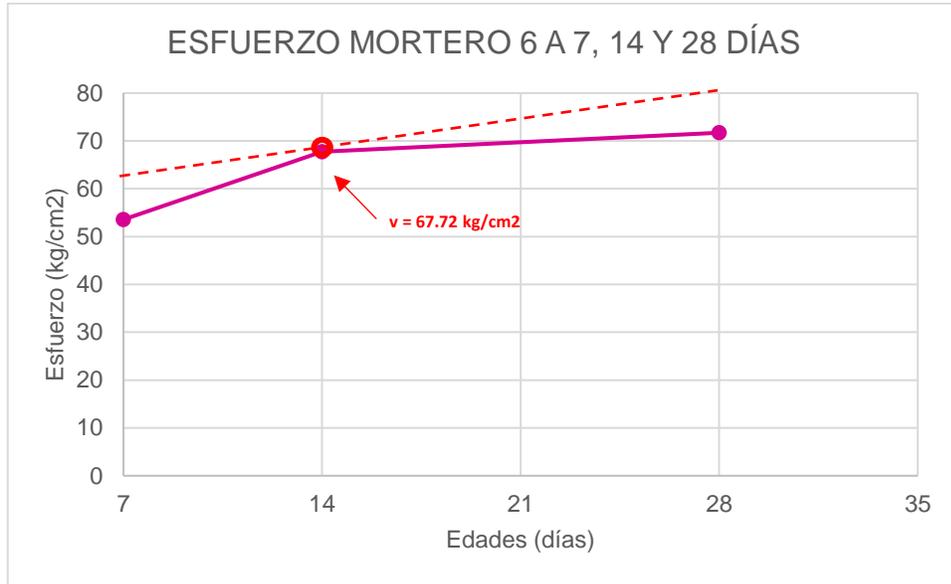
Fuente: elaboración propia.

Figura 117.  $f'_m$  vs edades y módulo de Poisson para mortero 5



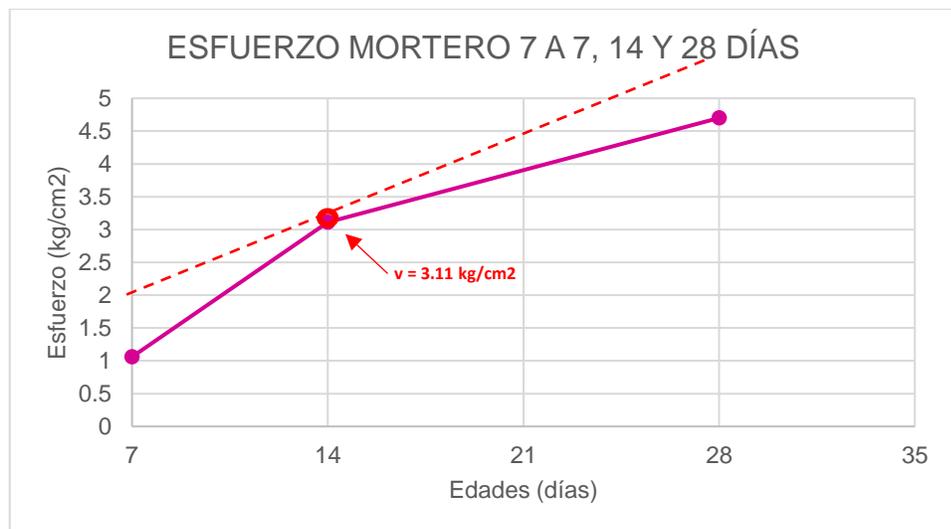
Fuente: elaboración propia.

Figura 118.  $f'_m$  vs edades y módulo de Poisson para mortero 6



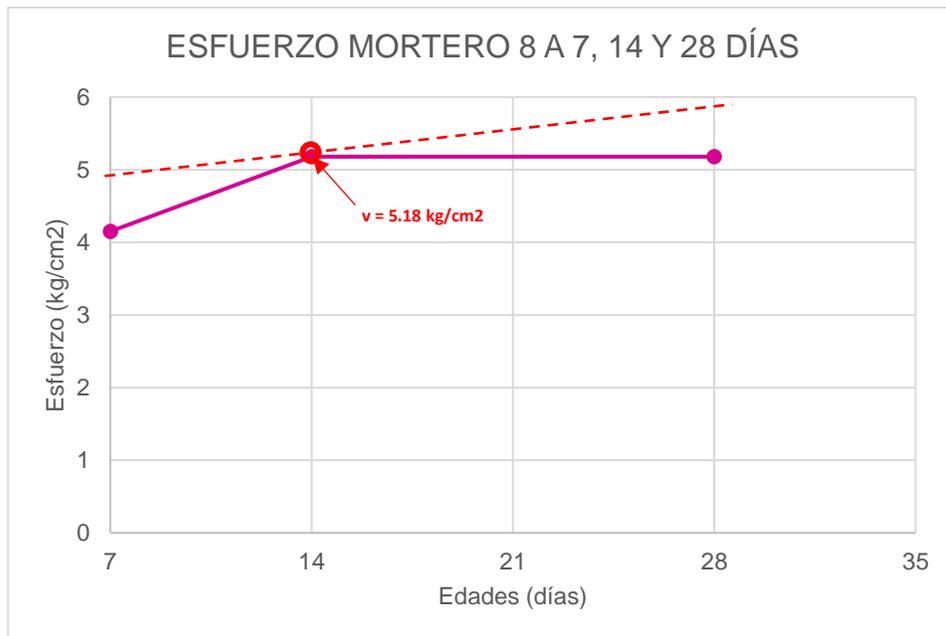
Fuente: elaboración propia.

Figura 119.  $f'_m$  vs edades y módulo de Poisson para mortero 7



Fuente: elaboración propia.

Figura 120. **f'm vs edades y módulo de Poisson para mortero 8**



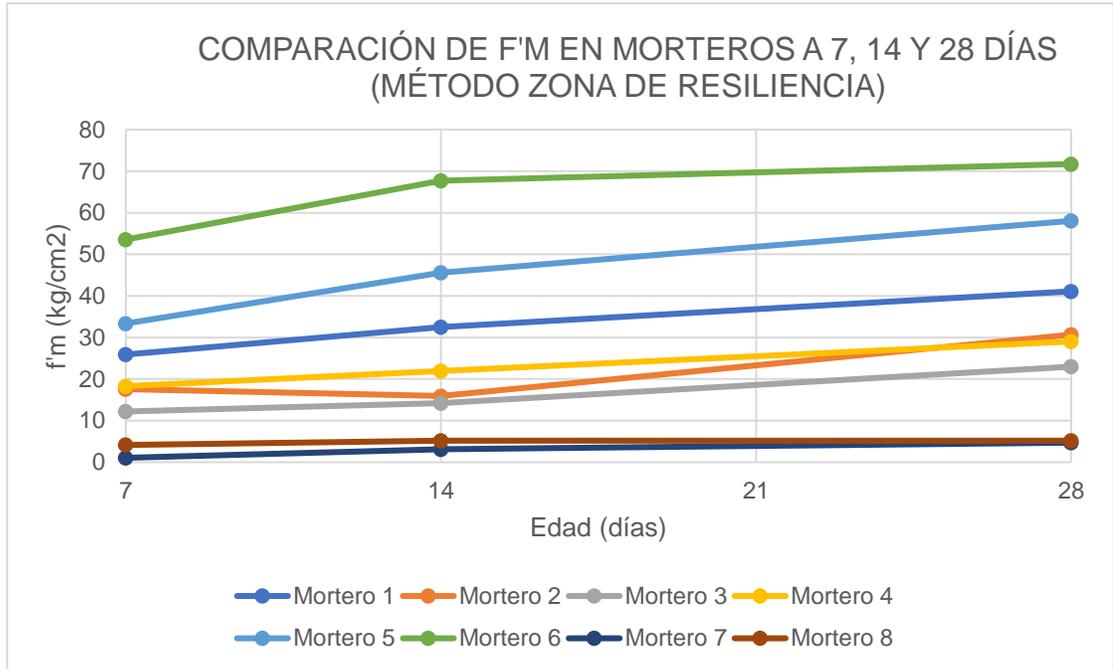
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVIII. **Comparación de f'm vs edades entre morteros sometidos a compresión**

<b>f'm VS EDADES EN MORTEROS A COMPRESION</b>			
<b>MORTERO</b>	<b>EDADES</b>		
	<b>7 días</b>	<b>14 días</b>	<b>28 días</b>
Mortero 1	25.89	32.51	41.1
Mortero 2	17.58	15.93	30.67
Mortero 3	12.2	14.22	22.98
Mortero 4	18.29	21.91	29.02
Mortero 5	33.36	45.61	58.04
Mortero 6	53.56	67.72	71.71
Mortero 7	1.06	3.11	4.7
Mortero 8	4.15	5.18	5.18

Fuente: elaboración propia.

Figura 121. **Gráfica comparativa de f'm vs edades entre morteros sometidos a compresión**



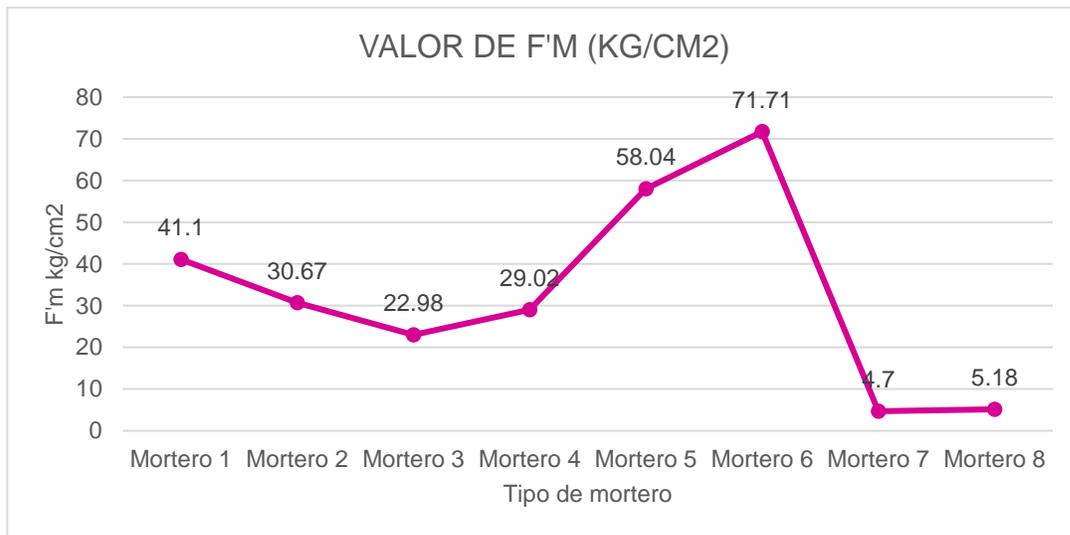
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIX. **Valor F'm para morteros con caucho granulado**

VALOR DE F'M	
MORTERO	F'M (kg/cm <sup>2</sup> )
Mortero 1	41.1
Mortero 2	30.67
Mortero 3	22.98
Mortero 4	29.02
Mortero 5	58.04
Mortero 6	71.71
Mortero 7	4.7
Mortero 8	5.18

Fuente: elaboración propia.

Figura 122. **Comparación de F'm entre morteros con caucho granulado**



Fuente: elaboración propia.

Con la gráfica comparativa de F'm se puede observar que el no tamizar el caucho da resultados de resistencia a la compresión bajos y no presenta una gran diferencia entre ellos, mientras que los morteros de cemento con caucho tamizado presentan los mejores resultados. Los morteros de cal con caucho no presentan resultados favorables debido a la diferencia química entre el caucho y la cal.

Tabla L. **Módulo de Poisson “ $\nu$ ” según método de tangente en morteros a compresión**

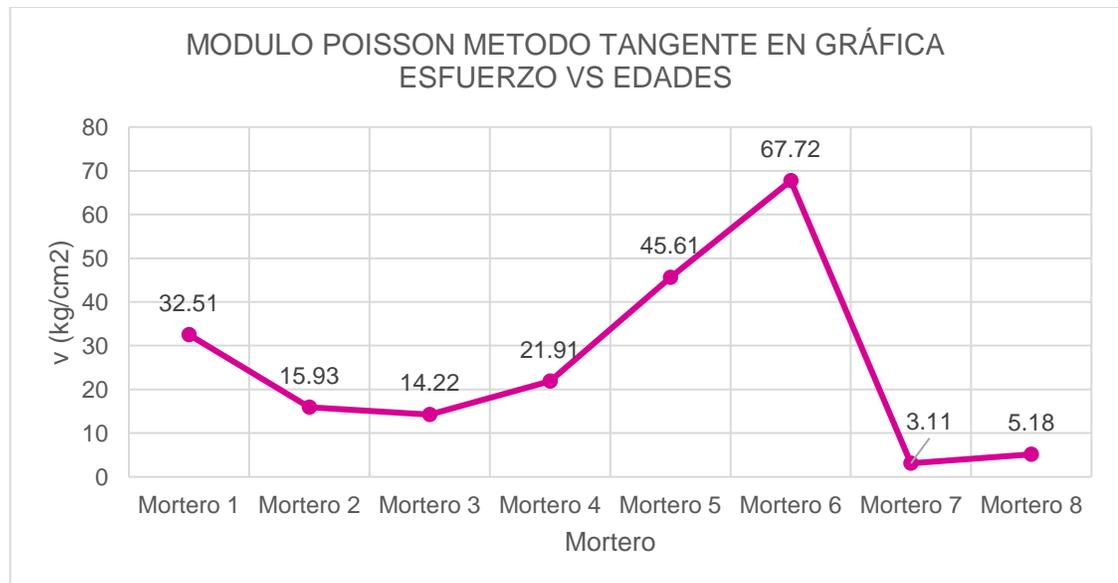
MORTERO	$\nu$ (kg/cm <sup>2</sup> )
Mortero 1	32.51
Mortero 2	15.93
Mortero 3	14.22
Mortero 4	21.91

Continuación de la tabla XLIX.

Mortero 5	45.61
Mortero 6	67.72
Mortero 7	3.11
Mortero 8	5.18

Fuente: elaboración propia.

Figura 123. **Comparación del módulo de Poisson entre morteros sometidos a compresión**



Fuente: elaboración propia.

El valor de Poisson concuerda con los resultados obtenidos de la resistencia a compresión, presentando un incremento en los morteros de cemento con caucho tamizado y un bajo resultado en los morteros de cal y caucho, comprobando así la mala relación química entre estos 2 elementos.

### 6.2.3. Determinación del valor phi $\Phi$ para morteros a compresión

Para poder determinar el valor de diseño a compresión se determinó el factor de reducción  $\Phi$  (especificado en ACI 318-19, sección 21.2.1), como la relación del módulo de Poisson  $\nu$  con  $F'm$ , obteniendo resultados entre 0.5 a 1. Para determinar un valor  $\Phi$  general para morteros con adición de caucho granulado se realiza el promedio de los valores obtenidos y se espera que el valor obtenido para elementos sometidos a fuerza axial se encuentre entre 0.65 a 0.90

Tabla LI. Factor de reducción  $\Phi$  para morteros sometidos a compresión

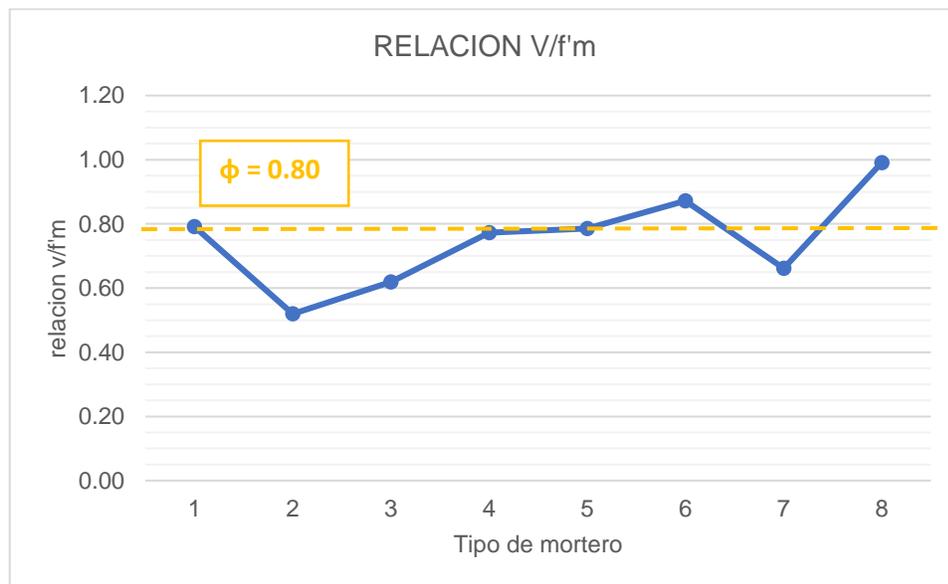
DETERMINACION DEL FACTOR DE REDUCCION PARA ESFUERZOS A COMPRESION CON MORTEROS DE CAUCHO RECICLADO	
MORTERO	RELACION $\nu/f'm$
1	0.79
2	0.519571666
3	0.6188
4	0.772408964
5	0.79
6	0.871794872
7	0.661702128
8	0.991211583
promedio	0.7515251

Fuente: elaboración propia.

Los morteros 2, 3 y 8 quedan fuera del rango esperado para el factor de reducción, se puede adjudicar a que el incremento de la resistencia a compresión no fue de manera proporcional a la resiliencia de los elementos. Al realizar el promedio de los resultados se obtiene  $\Phi = 0.75$  pero, para poder considerar un

valor certero y en términos de factor de reducción se considerará  $\phi = 0.80$  para el valor de diseño en compresión.

Figura 124. **Valor  $\Phi$  para morteros con caucho granulado sometidos a carga axial**



Fuente: elaboración propia.

#### 6.2.4. **Relación del peso unitario con el esfuerzo a compresión y sus edades correspondientes**

Durante el ensayo a compresión se obtuvo el peso de los elementos, se relacionó el peso unitario de los elementos con su esfuerzo a compresión en sus respectivas edades de ensayo para poder comprender el avance de la distribución de las partículas del agregado fino (arena de río y caucho), y el grado de plasticidad del mortero. Una mayor relación entre el peso unitario y el esfuerzo a compresión permiten deducir que el agregado fino en el mortero produce una

mayor plasticidad y, por lo tanto, una resistencia a la compresión mayor. Una menor relación entre el peso unitario y el esfuerzo a compresión demuestra la porosidad del elemento y como este se comportará de manera frágil ante la aplicación de carga axial.

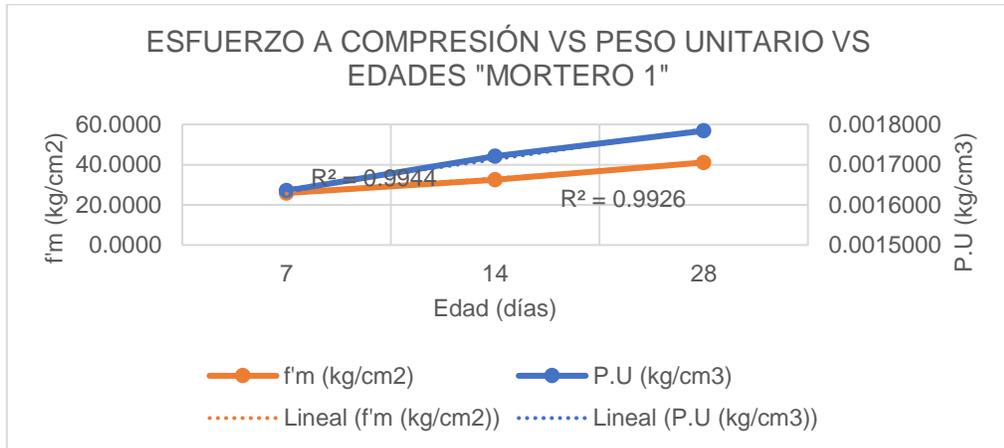
Tabla LII. **Peso unitario de los elementos**

PESO UNITARIO DE LOS ELEMENTOS						
No	ELEMEN TO	VOLUMEN (cm <sup>3</sup> )	PESO (g)	PESO UNIT (g/cm <sup>3</sup> )	PESO UNIT (kg/cm <sup>3</sup> )	f'm (kg/cm <sup>2</sup> )
1	17	122.5	200.3	1.635102041	0.0016351	25.89
2	114	122.5	210.8	1.720816327	0.0017208	32.51
3	128	120.05	214.2	1.78425656	0.0017843	41.10
4	27	122.5	188.5	1.53877551	0.0015388	17.58
5	214	120.05	200.6	1.670970429	0.0016710	15.93
6	228	120.05	200.8	1.672636401	0.0016726	30.67
7	37	120.05	185.8	1.547688463	0.0015477	12.20
8	314	122.5	196.6	1.604897959	0.0016049	14.22
9	328	120.05	200.5	1.670137443	0.0016701	22.98
10	47	125	209.3	1.6744	0.0016744	18.29
11	414	120.05	214.2	1.78425656	0.0017843	21.91
12	428	125	214.5	1.716	0.0017160	29.02
13	57	126.755	216.6	1.708808331	0.0017088	33.36
14	514	117.649	221.3	1.881018963	0.0018810	45.61
15	528	122.5	223.1	1.82122449	0.0018212	58.04
16	67	129.032	205.2	1.590303181	0.0015903	53.56
17	614	117.649	211.1	1.794320394	0.0017943	67.72
18	628	125	214.7	1.7176	0.0017176	71.71
19	77	120.05	149.2	1.242815494	0.0012428	1.06
20	714	120.05	139.2	1.159516868	0.0011595	3.11
21	728	122.5	143.1	1.168163265	0.0011682	4.70
22	87	120.05	161.2	1.342773844	0.0013428	4.15
23	814	120.05	152.6	1.271137026	0.0012711	5.18
24	828	125	154.7	1.2376	0.0012376	5.18

Fuente: elaboración propia.

- Mortero 1

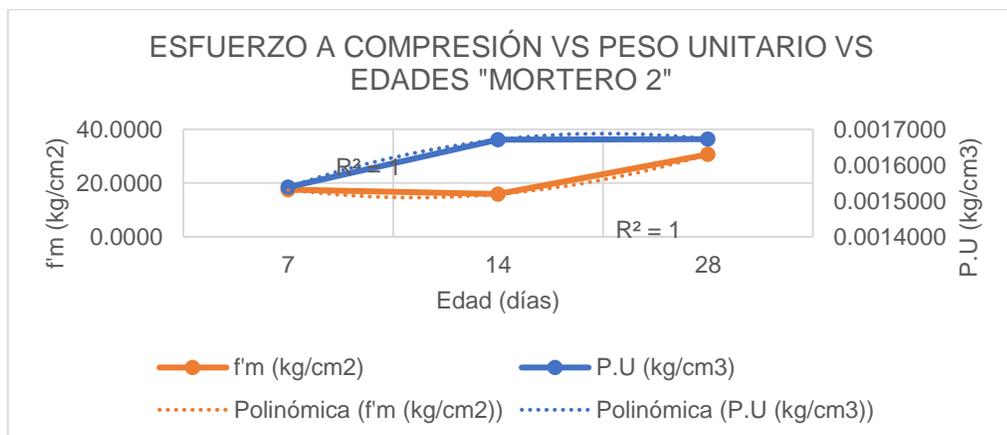
Figura 125. **f'm vs P.U vs edad para mortero 1**



Fuente: elaboración propia.

- Mortero 2

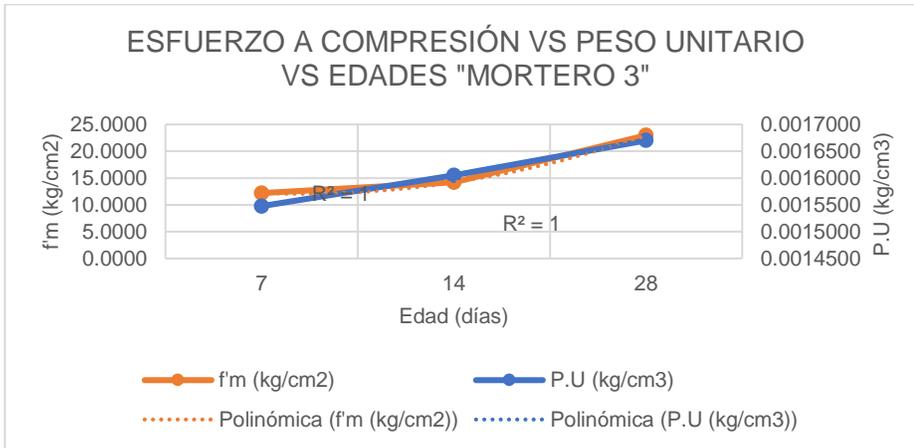
Figura 126. **f'm vs P.U vs edad para mortero 2**



Fuente: elaboración propia.

- Mortero 3

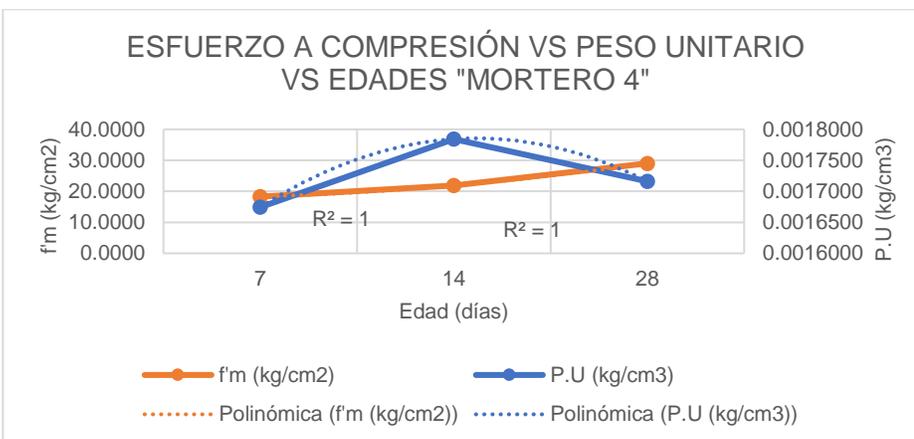
Figura 127. **f'm vs P.U vs edad para mortero 3**



Fuente: elaboración propia.

- Mortero 4

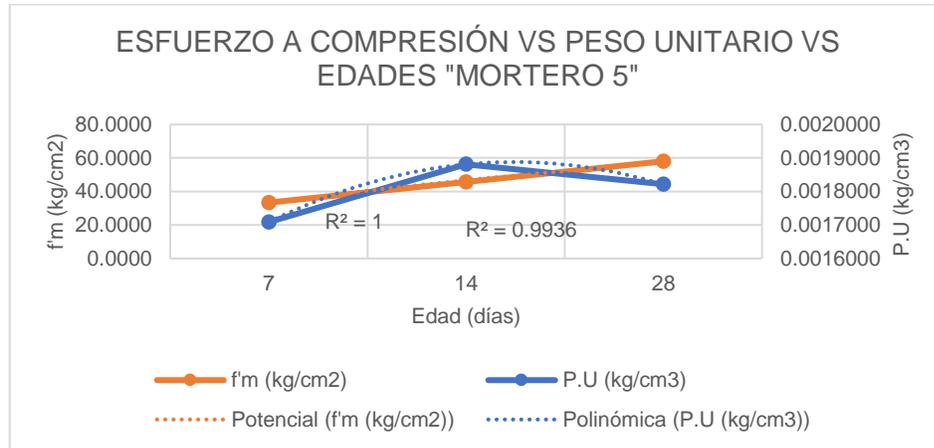
Figura 128. **f'm vs P.U vs edad para mortero 4**



Fuente: elaboración propia.

- Mortero 5

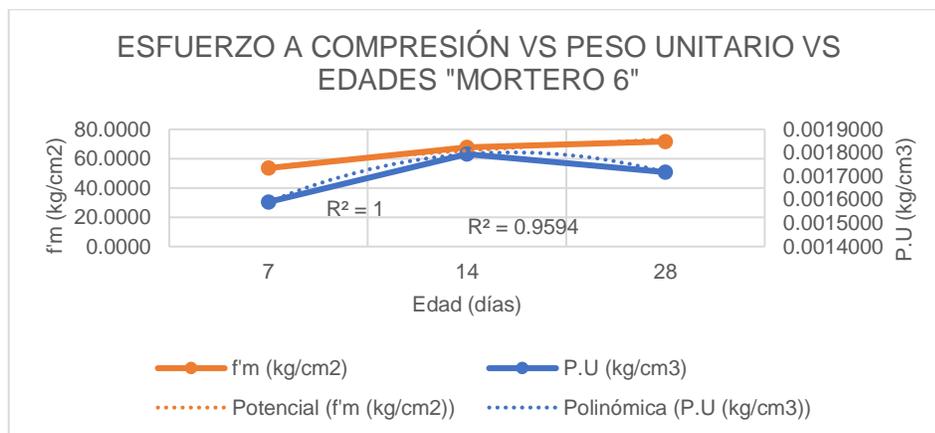
Figura 129. **f'm vs P.U vs edad para mortero 5**



Fuente: elaboración propia.

- Mortero 6:

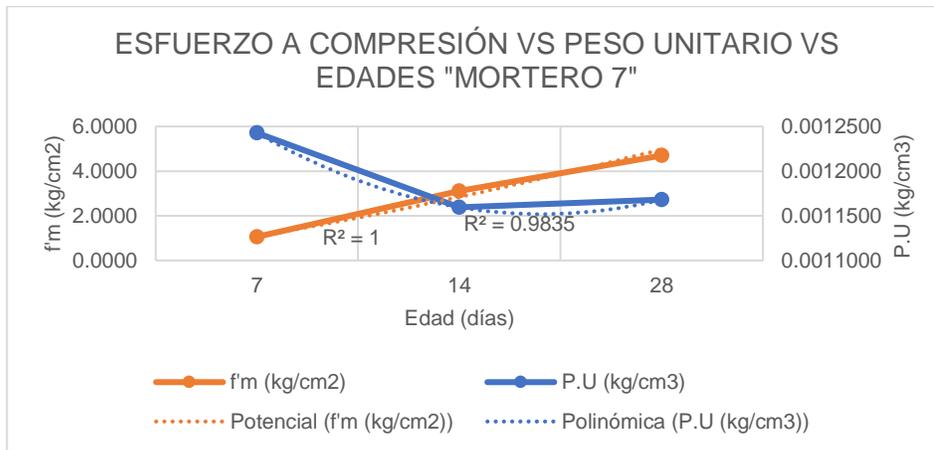
Figura 130. **f'm vs P.U vs edad para mortero 6**



Fuente: elaboración propia.

- Mortero 7

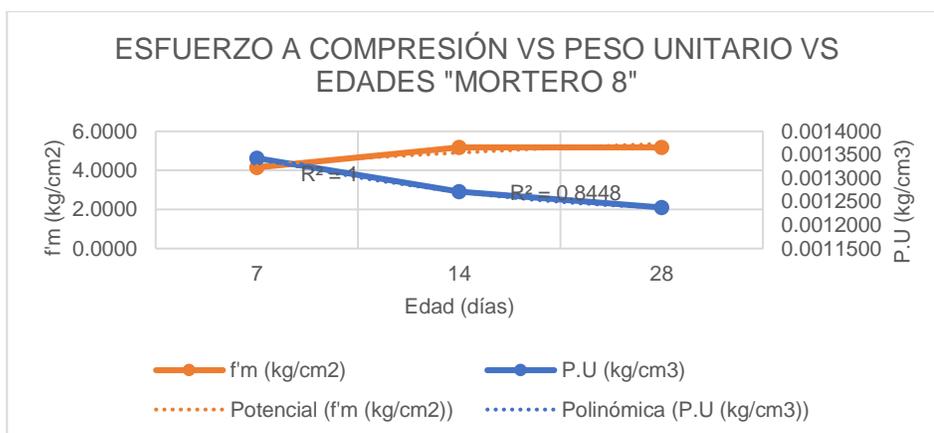
Figura 131. **f'm vs P.U vs edad para mortero 7**



Fuente: elaboración propia.

- Mortero 8

Figura 132. **f'm vs P.U vs edad para mortero 8**



Fuente: elaboración propia.

Tabla LIII. **Observaciones de las gráficas  $f'm$  vs P.U vs edad**

MORTERO	OBSERVACIONES
1	Se observa como a lo largo de los días la relación entre la densidad y el esfuerzo a compresión crece, intersecando aproximadamente en el día 21.
2	Se observa amplia discrepancia entre los datos en el día 14 mientras que en el día 28 la relación entre el esfuerzo a compresión y el peso unitario del mortero es 1
3	Relación constante a lo largo de los días, teniendo su pico en los días 12 y 21 aproximadamente.
4	Al igual que en el mortero 2 existe gran discrepancia entre el esfuerzo y el peso Unitario, se podría acreditar a esto el bajo comportamiento a la resistencia a la compresión del elemento.
5	Si bien hay una mayor relación entre los valores, se presenta el mismo comportamiento que en el mortero 2 y 4, teniendo discrepancia entre el P.U y $f'm$ en el día 14, mientras que en los días 12 y 21 es cuando presenta una buena relación. Se puede observar gráficamente la resiliencia del elemento al presentar una regresión en la deformación durante su fase elasto-plástica.
6	En las edades analizadas no presenta alguna tendencia que relacione el P.U con $f'm$ , a pesar de ser el mortero con la mayor resistencia a compresión. Se puede observar gráficamente la resiliencia del elemento al presentar una regresión en la deformación durante su fase elasto-plástica, en este se ve aún más marcado que en el mortero 5 debido al tamaño de las fibras.
7	Se esperaba un bajo comportamiento que relacione el Peso unitario con el esfuerzo a compresión, pues el mortero no presento valores óptimos.
8	Al igual que el mortero anterior, presenta una regresión entre la relación P.U y $f'm$ , es posible que la cal sea la causante de este comportamiento.

Fuente: elaboración propia.

### 6.3. Ensayo de morteros a corte

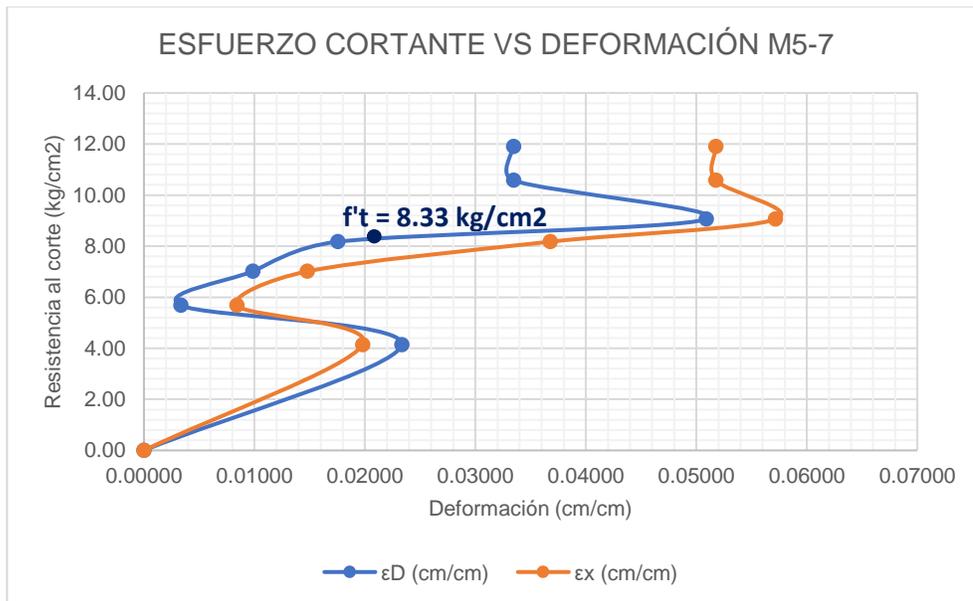
Es un método de análisis de esfuerzos cortantes, implementado en el Centro de Investigaciones de Ingeniería, donde se busca obtener una falla a  $45^\circ$  en el espécimen para obtener un equivalente del esfuerzo cortante a tracción.

### 6.3.1. Determinación de $f'_t$ para morteros 5 y 6 sometidos a corte

Para determinar el valor del esfuerzo cortante en los morteros 5 y 6 se analizaron las gráficas obtenidas de esfuerzo cortante vs deformación y se determinó que, al igual que en el esfuerzo a compresión,  $f'_t$  se presenta para ambos morteros en  $\epsilon_x = 0.02$  para las edades de 7, 14 y 21 días.

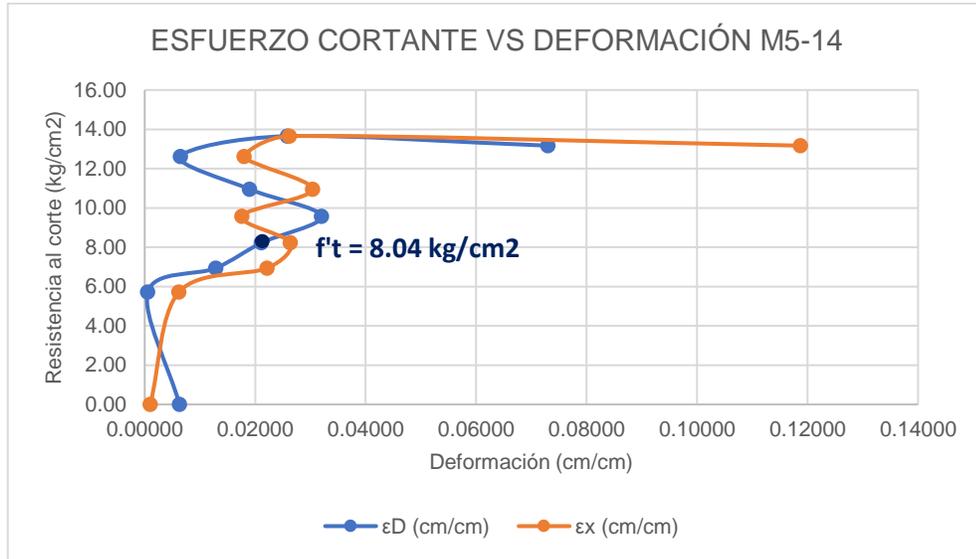
- Mortero 5

Figura 133.  $f'_t$  para mortero 5 – 7 días



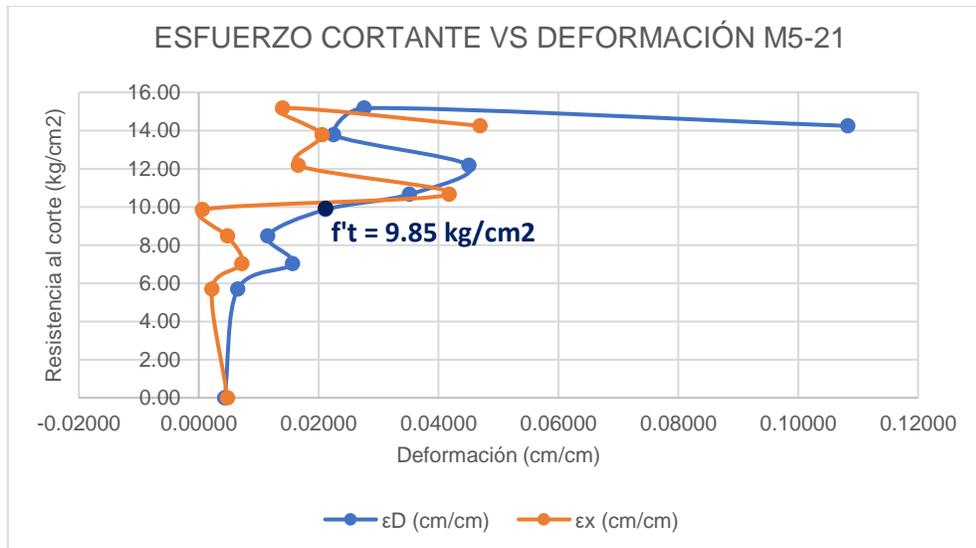
Fuente: elaboración propia.

Figura 134. **f't para mortero 5 – 14 días**



Fuente: elaboración propia.

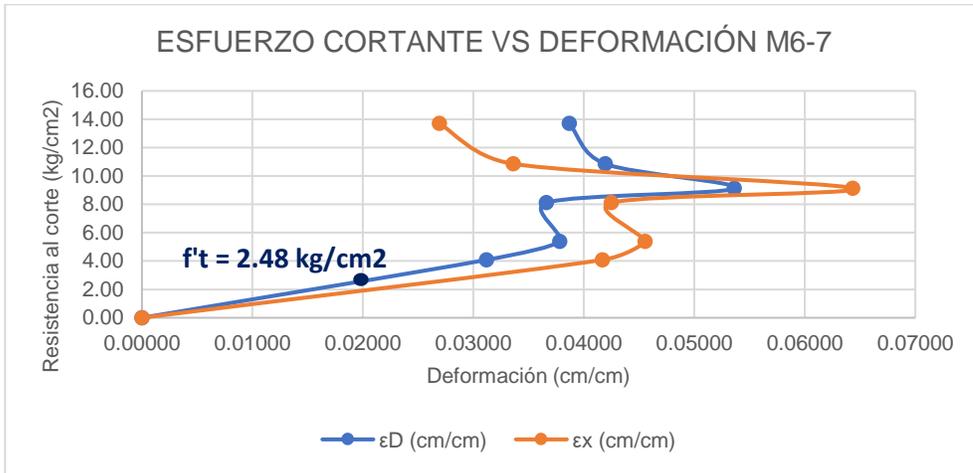
Figura 135. **f't para mortero 5 – 21 días**



Fuente: elaboración propia.

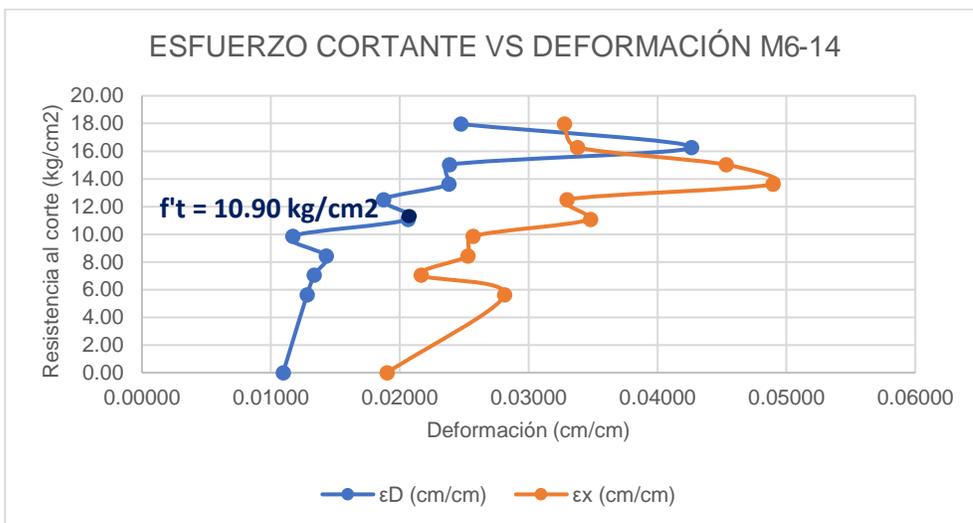
- Mortero 6

Figura 136.  $f't$  para mortero 6 – 7 días



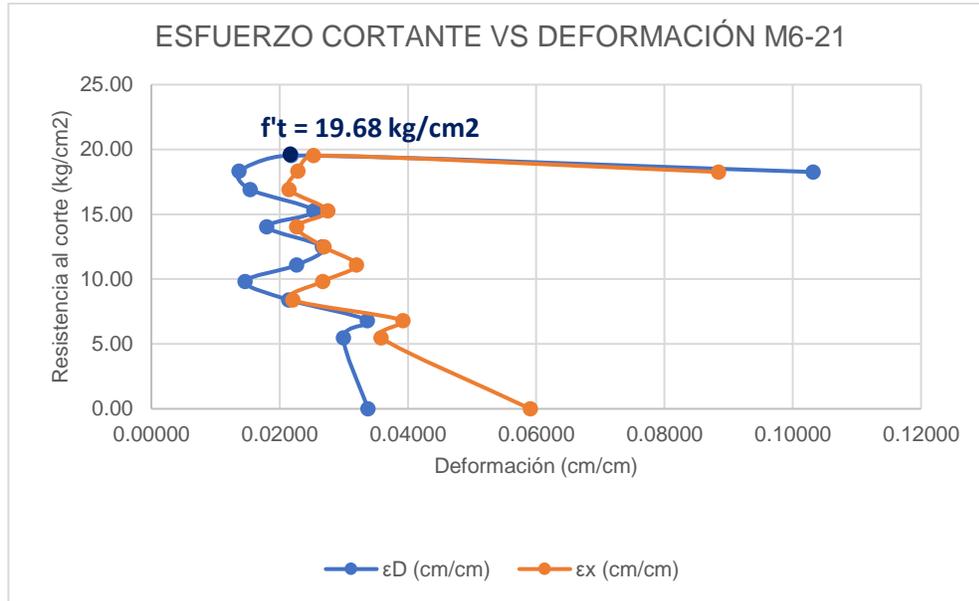
Fuente: elaboración propia.

Figura 137.  $f't$  para mortero 6 – 14 días



Fuente: elaboración propia.

Figura 138.  $f'_t$  para mortero 6 – 21 días



Fuente: elaboración propia.

### 6.3.2. Determinación de $F'_t$ en morteros a los 28 días

Los resultados obtenidos para el ensayo a corte son respectivamente para 7, 14 y 21 días, se determinó el valor de la resistencia a corte de los morteros,  $F'_t$  a los 28 días por medio de interpolación lineal. Para ello se utilizó el incremento porcentual del valor de resistencia a la compresión en los morteros para determinar el porcentaje de resistencia a los 21 días y realizar la interpolación con los valores de corte.

Tabla LIV. **Determinación del porcentaje para 21 días del ensayo a corte en morteros con base en la resistencia a compresión para mortero 5 por medio de interpolación lineal**

<b>Ensayo a compresión mortero 5</b>		
<b>Días</b>	<b>f'm</b>	<b>Porcentaje</b>
7	33.361338	56.895 %
14	45.6106252	77.786 %
28	58.04988662	99 %
<b>Ensayo a corte mortero 5</b>		
14	77.786 %	
<b>21</b>	<b>88.393 %</b>	
28	99 %	

Fuente: elaboración propia.

Tabla LV. **Valores f't para mortero 5**

<b>Días</b>	<b>f't (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
7	8.32884
14	8.05
21	9.84848
<b>28</b>	<b>11.14171</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla LVI. **Determinación del porcentaje para 21 días del ensayo a corte en morteros con base en la resistencia a compresión para mortero 6 por medio de interpolación lineal**

<b>Ensayo a compresión mortero 6</b>		
<b>Días</b>	<b>f'm</b>	<b>Porcentaje</b>
7	53.56	73.943 %
14	67.72	93.492 %
28	71.71	99 %
<b>Ensayo a corte mortero 6</b>		
14		93.492 %
<b>21</b>		<b>96.246 %</b>
28		99 %

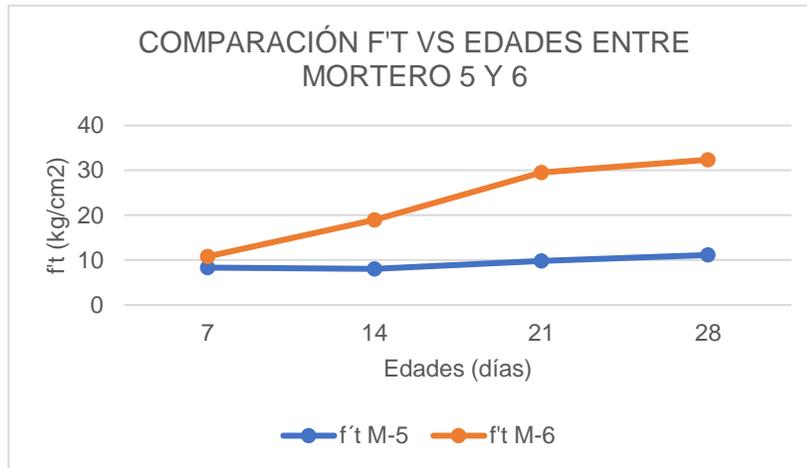
Fuente: elaboración propia.

Tabla LVII. **Valores f't para mortero 6**

<b>Días</b>	<b>f't (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
7	2.47692
14	10.90526
21	19.68
<b>28</b>	<b>21.24035</b>

Fuente: elaboración propia.

Figura 139. **Comparación de  $f't$  vs edades entre morteros 5 y 6**



Fuente: elaboración propia.

### 6.3.3. **Obtención de $\phi$ para morteros sometidos a fuerzas cortantes**

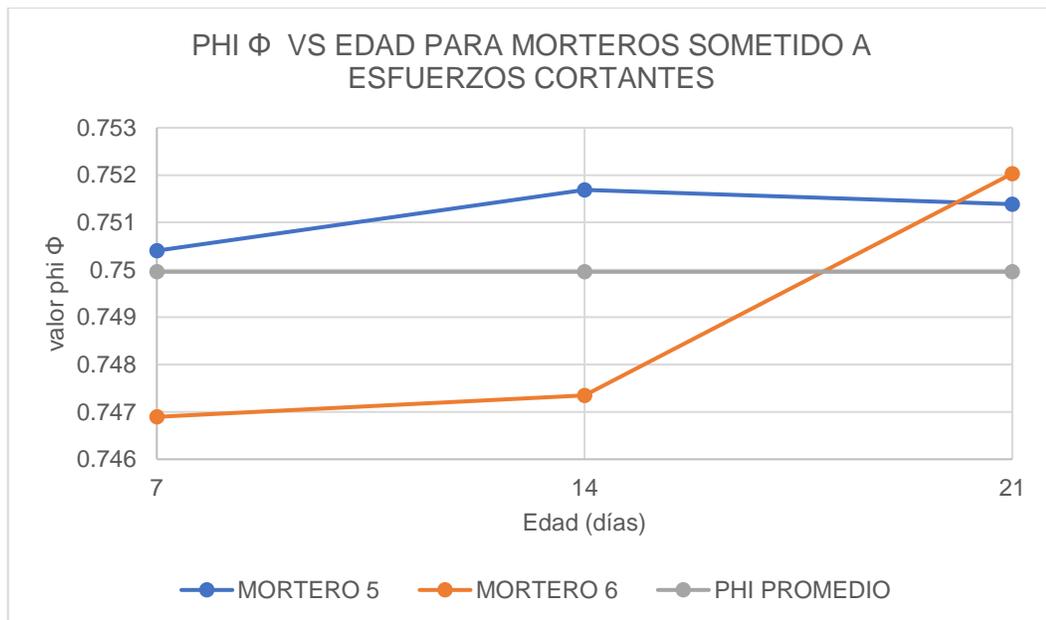
Para poder determinar el valor de diseño a corte se determinó el factor de reducción  $\Phi$  (especificado en ACI 318-19, sección 21.2.1), como la correlación entre la deformación diagonal y la deformación transversal, ubicando gráficamente el punto donde se pierde esta correlación de los valores, obteniendo un valor  $f't_n$  el cual, al relacionarlo con  $f't$ , da un valor  $\Phi$  aproximado a 0.75 para los morteros con caucho granulado sometidos a esfuerzos cortantes.

Tabla LVIII. **Valor phi para morteros con caucho granulado sometidos a fuerzas cortantes**

MORTERO 5			
DIAS	f'tn kg/cm2	f't kg/cm2	$\Phi$
7	6.25	8.32884	0.75040462
14	6.05	8.04855096	0.7516881
21	7.4	9.84848	0.75138499
MORTERO 6			
DIAS	f'tn kg/cm2	f't kg/cm2	$\Phi$
7	1.85	2.47692	0.74689534
14	8.15	10.90526	0.74734578
21	14.8	19.68	0.75203252
PROMEDIO			0.74995856

Fuente: elaboración propia.

Figura 140. **Phi vs edad para morteros sometidos a esfuerzos cortantes**



Fuente: elaboración propia.

## 6.4. Ensayo de adherencia

El ensayo de adherencia se realizó utilizando 2 métodos de aplicación del mortero de revestimiento: Aplicación lanzada y aplicación untada, esto se hizo con el fin de comprobar si la metodología de aplicación podía afectar la adherencia del mortero, se observa que las fibras de caucho largas presentan una mayor adherencia con la aplicación lanzada mientras que las fibras de caucho medio presentan una mayor adherencia con la aplicación untada, aunque no presenta gran diferencia respecto a la aplicación lanzada.

### 6.4.1. Comparación de esfuerzo de adherencia entre morteros 5 y 6 lanzados y untados

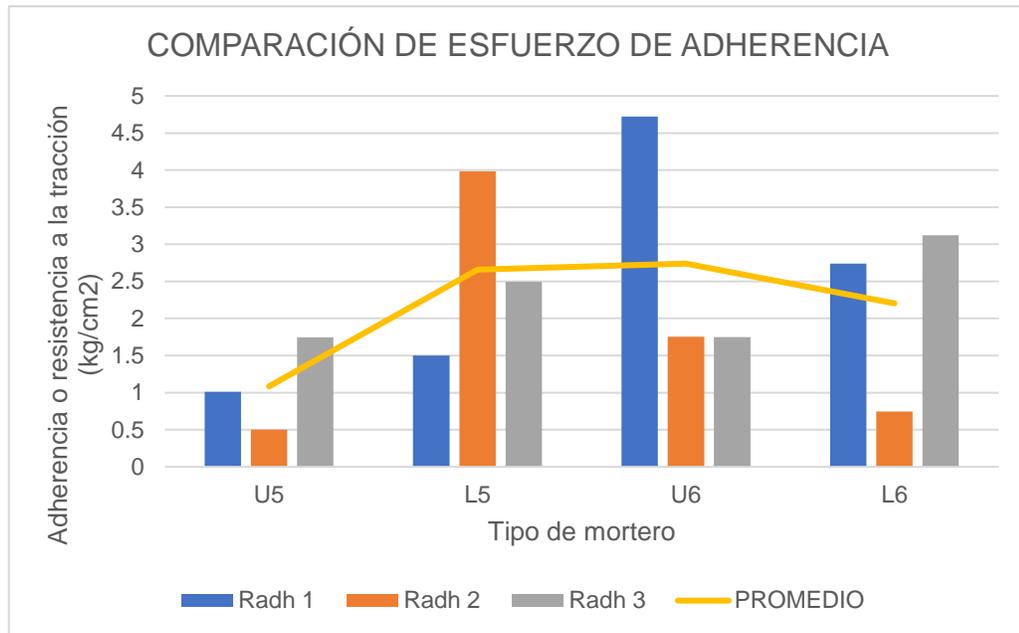
Se realizó una comparación entre los resultados de adherencia de los ensayos realizados para los morteros 5 y 6 tanto en su aplicación lanzada como untada, y al realizar el promedio de los resultados se obtiene que el mortero 6 untado presenta la mayor adherencia y el mortero 5 untado fue el que presentó la menor adherencia, aunque, en general, todos los morteros presentaron resultados bastante cercanos respecto a adherencia, variando entre ellos debido a los tipos de fallas presentadas.

Tabla LIX. **Comparación de resultados de adherencia entre morteros 5 y 6 (aplicación lanzada y untada)**

MORTERO	Radh 1	Radh 2	Radh 3	PROMEDIO
U5	1.010499652	0.49922183	1.74344228	<b>1.08438792</b>
L5	1.498088305	3.98363755	2.49405263	<b>2.65859283</b>
U6	4.720009045	1.75172886	1.74706972	<b>2.739602542</b>
L6	2.739283617	0.74472806	3.12297818	<b>2.202329952</b>

Fuente: elaboración propia.

Figura 141. **Gráfica comparativa de resultados de adherencia entre morteros 5 y 6**



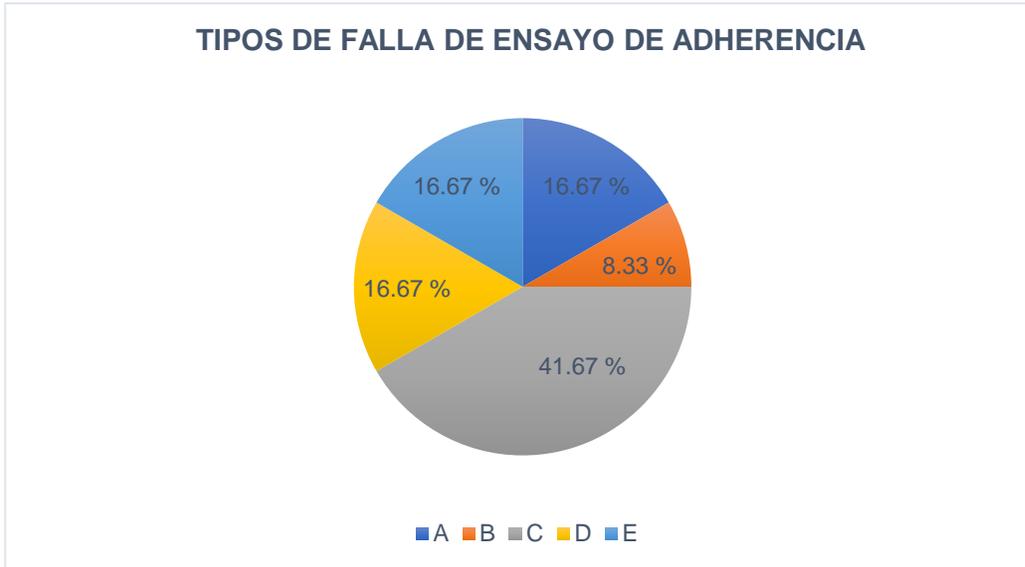
Fuente: elaboración propia.

En la gráfica 154 se puede observar bastante discrepancia entre los ensayos realizados a cada mortero, esto se debe a que cada mortero presentó diferentes fallas durante el ensayo. Aun así, el mortero 6 presenta 2 valores iguales, porque en estos ensayos ambas muestras soportaron la misma carga.

#### 6.4.2. Tipos de fallas presentadas durante el ensayo de adherencia

Durante los ensayos, el tipo de falla que más se presentó fue la falla tipo C (falla adhesiva en el interior del mortero), presentándose 5 veces; y la falla que menos se presentó fue la falla tipo B (falla adhesiva en la interfaz entre el mortero y la platina), presentándose 1 vez.

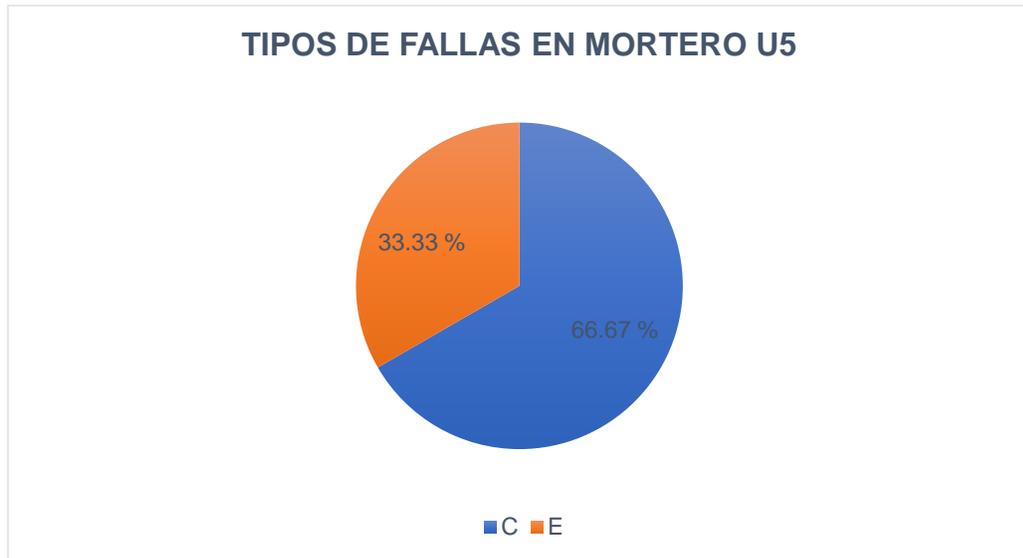
Figura 142. **Tipos de fallas presentadas durante el ensayo de adherencia**



Fuente: elaboración propia.

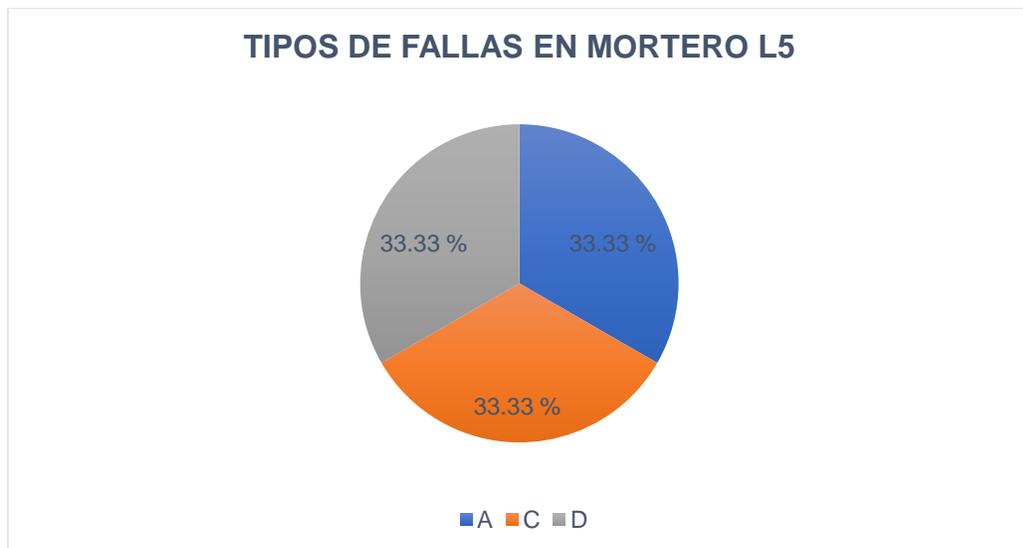
Al analizar individualmente cada mortero, se observa que tanto el mortero L5, U6 y L6 presentaron en cada ensayo una falla distinta, mientras que el mortero U5 tuvo dos fallas tipo C y una falla tipo E. Al presentar una misma falla 2 veces aumenta la probabilidad que el mortero U5 fallará siempre adhesivamente en el interior de este, y por ello es el mortero que presenta el valor de adherencia más bajo.

Figura 143. **Fallas presentadas en mortero U5**



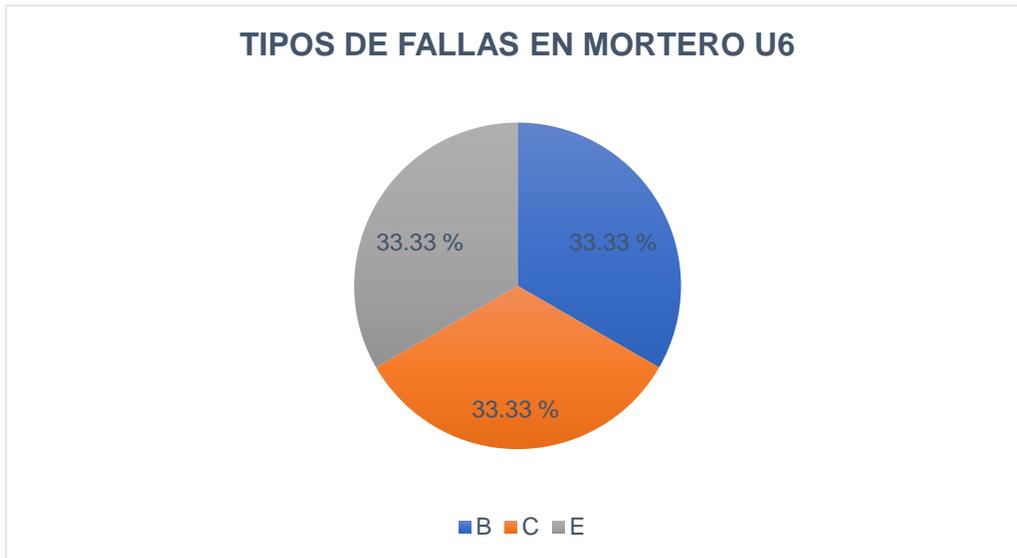
Fuente: elaboración propia.

Figura 144. **Fallas presentadas en mortero L5**



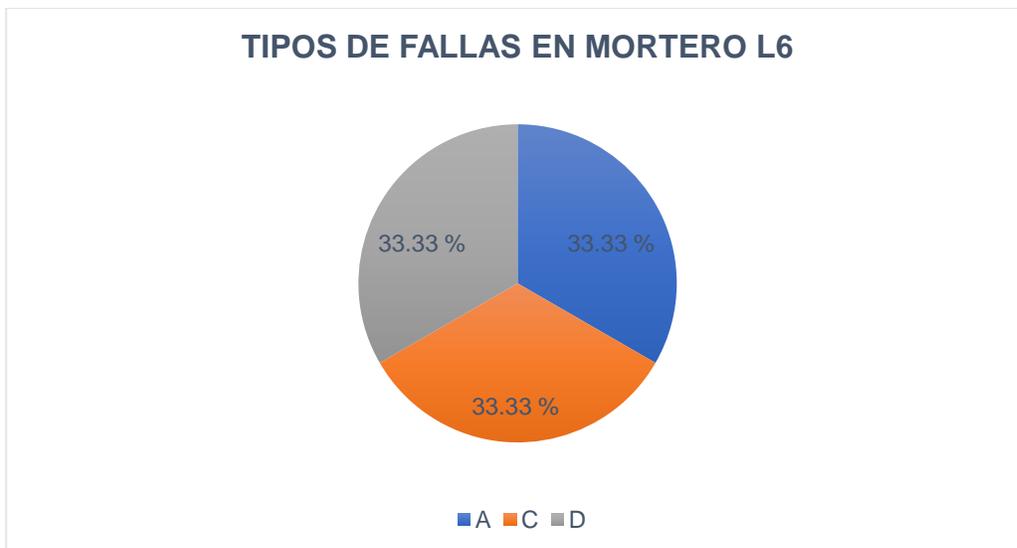
Fuente: elaboración propia.

Figura 145. **Fallas presentadas en mortero U6**



Fuente: elaboración propia.

Figura 146. **Fallas presentadas en mortero L6**



Fuente: elaboración propia.

### 6.4.3. Círculos de Mohr para determinar el esfuerzo de diseño de adherencia

Como se realizaron 3 ensayos de adherencia por cada mortero, se obtuvo la envolvente de Mohr para cada mortero y así determinar el valor de diseño con la tangente obtenida que interseca el eje “y”. También se obtiene el ángulo de fricción interna de los elementos que permite evaluar la capacidad de adherencia de los morteros.

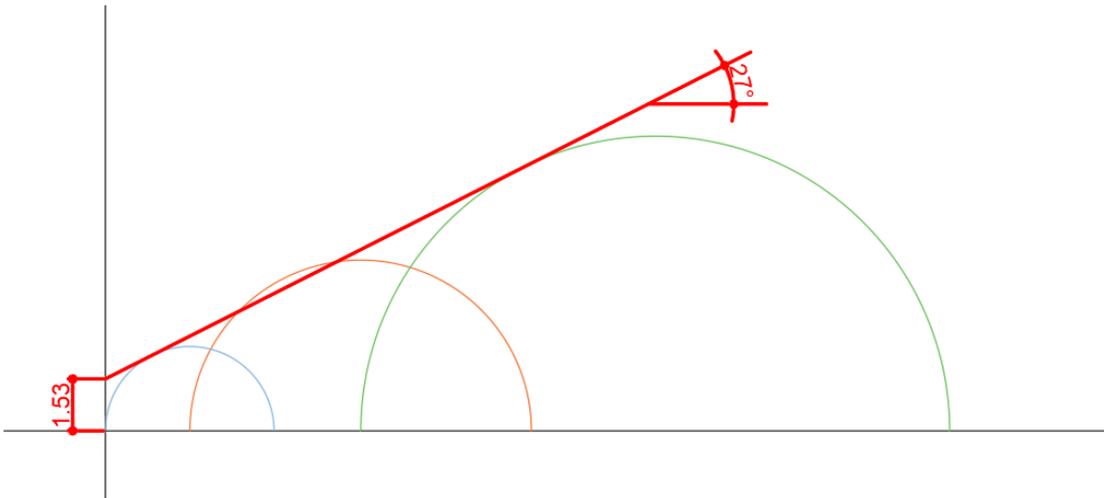
En el análisis se obtiene que el mortero 6 untado es quién presenta la mayor adherencia, mientras que el mortero 5 untado es quién presenta el menor valor de adherencia. El ángulo de fricción interna para todos los morteros se encuentra entre los 23° - 27°. El mortero 6 lanzado presentó un valor muy bajo comparado con los otros 2 valores obtenidos, por lo que se tuvo que hacer un ajuste considerando el valor más bajo y el valor más alto de adherencia obtenido en los ensayos.

Tabla LX. **Esfuerzo de diseño de adherencia para morteros 5 y 6**

MORTERO	$T_{max}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_x$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Adh (kg/cm <sup>2</sup> )	$\Phi^\circ$
GU 1	0.505249826	1.01049965	1.53	27
GU 2	0.249610914	0.49922183		
GU 3	0.87172114	1.74344228		
GL 1	0.749044152	1.4980883	4.99	23
GL 2	1.991818777	3.98363755		
GL 3	1.247026315	2.49405263		
MU 1	2.360004522	4.72000904	5.29	27
MU 2	0.875864432	1.75172886		
MU 3	0.873534858	1.74706972		
ML 1	1.369641808	2.73928362	2.38	25
ML 2	0.37236403	0.74472806		
ML 3	1.56148909	3.12297818		

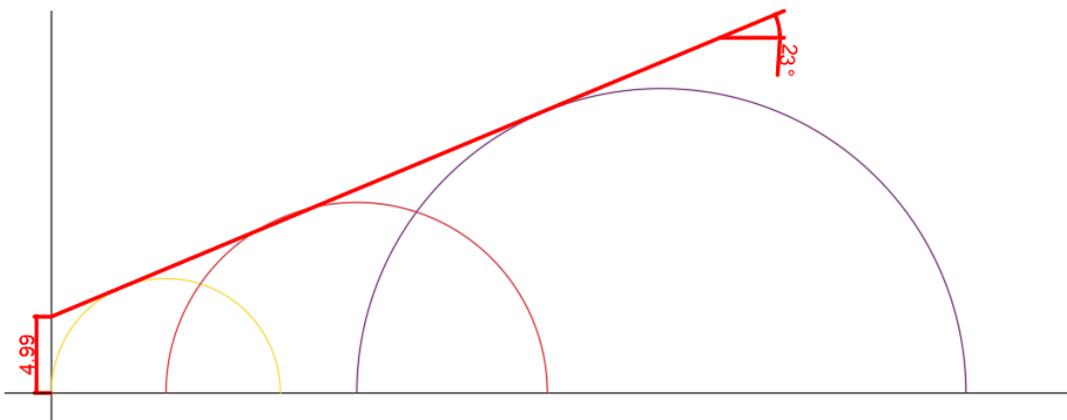
Fuente: elaboración propia.

Figura 147. **Envolvente de Mohr para Mortero U5**



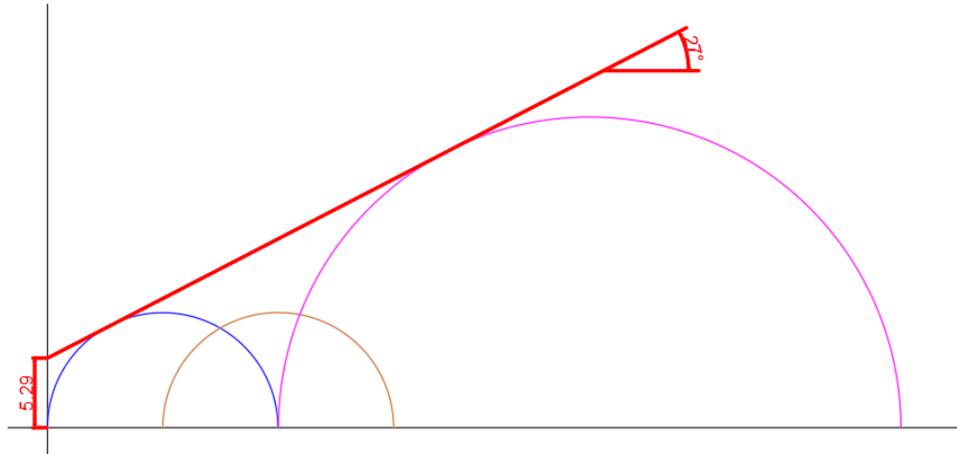
Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD 2021.

Figura 148. **Envolvente de Mohr para Mortero L5**



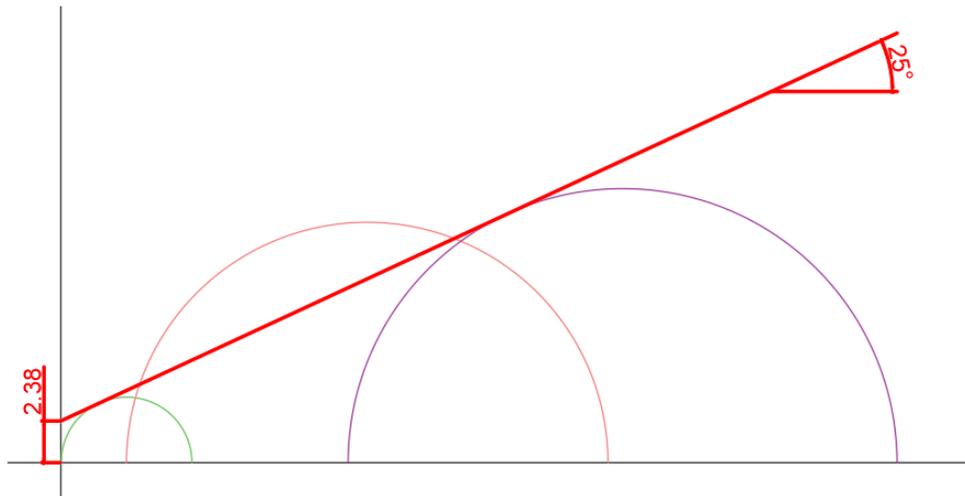
Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD 2021.

Figura 149. **Envolvente de Mohr para mortero U6**



Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD 2021.

Figura 150. **Envolvente de Mohr para mortero L6**



Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD 2021.

#### 6.4.4. Determinación de la adherencia para morteros 5 y 6 a los 7, 14 y 28 días

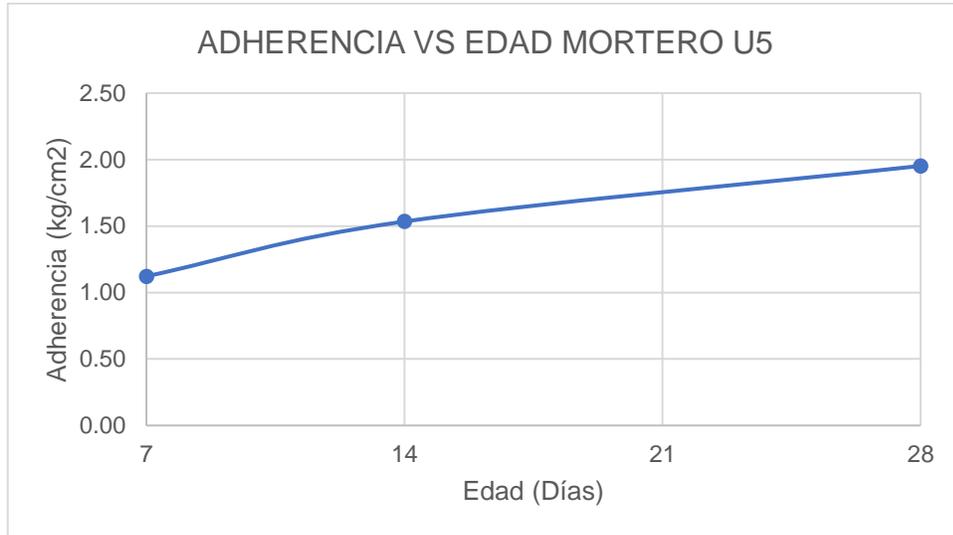
Ya que los ensayos de adherencia se realizaron a los 14 días se obtuvieron los esfuerzos de adherencia a los 7 y 28 días relacionando los porcentajes de incremento obtenidos en los ensayos de resistencia a compresión para los morteros. De esta forma, el mortero 5 lanzado es el que tiene la mejor adherencia. El mortero 6 untado presenta casi el mismo comportamiento que el mortero 5 lanzado por lo que se considera que también presenta la mayor adherencia.

Tabla LXI. Adherencia para morteros a 7, 14 y 28 días

ADHERENCIA PARA MORTERO U5						
Ensayo a compresión			Ensayo a adherencia			
Días	f'm	Porcentaje	Radh U5-1	Radh U5-2	Radh U5-3	Adh diseño
7	33.361338	56.895 %	0.7391	0.3651	1.2752	1.1220
14	45.6106252	77.786 %	1.0105	0.4992	1.7434	1.5339
28	58.0498866	99 %	1.2861	0.6354	2.2189	1.9522
ADHERENCIA PARA MORTERO L5						
Ensayo a compresión			Ensayo a adherencia			
Días	f'm	Porcentaje	Radh L5-1	Radh L5-2	Radh L5-3	Adh diseño
7	33.361338	56.895 %	1.0957585	2.91378332	1.51293296	3.6502
14	45.6106252	77.786 %	1.4980883	3.98363755	2.06843677	4.9905
28	58.0498866	99 %	1.90665784	5.07008416	2.63255588	6.3515
ADHERENCIA PARA MORTERO U6						
Ensayo a compresión			Ensayo a adherencia			
Días	f'm	Porcentaje	Radh U6-1	Radh U6-2	Radh U6-3	Adh diseño
7	53.5632643	68.260 %	3.7330319	1.38543373	1.38174883	4.1848
14	67.7248677	86.308 %	4.72000904	1.75172886	1.74706972	5.2912
28	77.6844071	99 %	5.41412802	2.00933605	2.00399173	6.0693
ADHERENCIA PARA MORTERO L6						
Ensayo a compresión			Ensayo a adherencia			
Días	f'm	Porcentaje	Radh L6-1	Radh L6-2	Radh L6-3	Adh diseño
7	53.5632643	68.260 %	2.16648592	0.58900175	2.46994806	1.8814
14	67.7248677	86.308 %	2.73928362	0.74472806	3.12297818	2.3788
28	77.6844071	99 %	3.14211944	0.85424689	3.58223968	2.7286

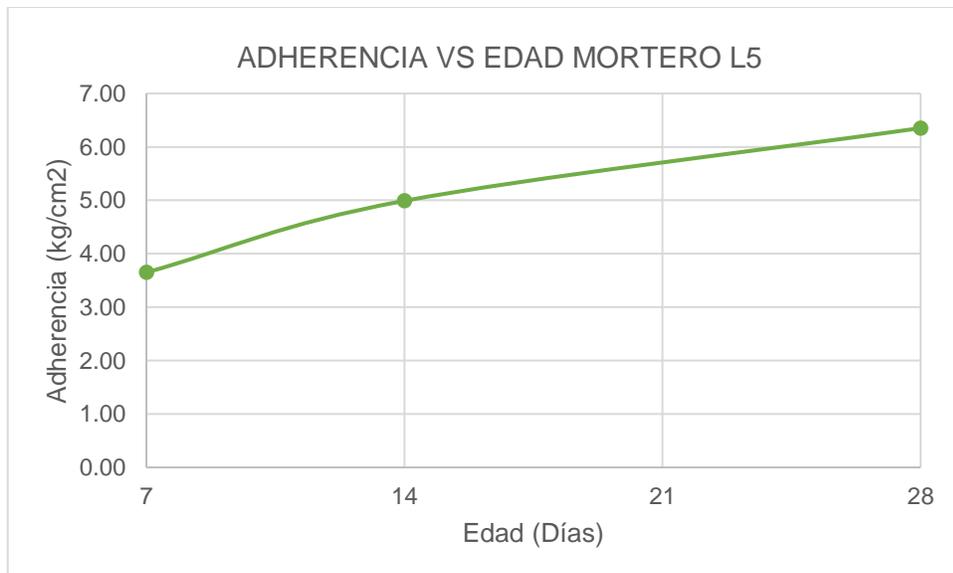
Fuente: elaboración propia.

Figura 151. **Gráfica adherencia vs edad mortero U5**



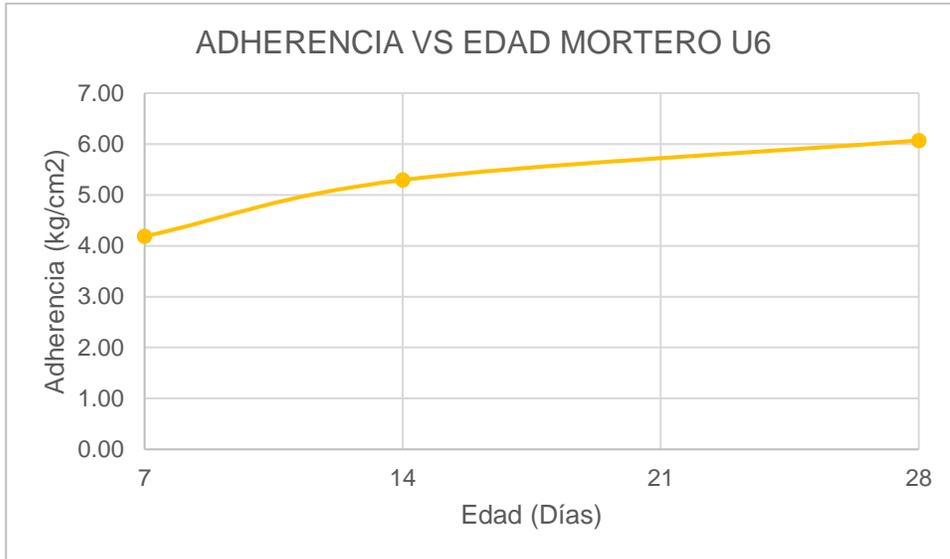
Fuente: elaboración propia.

Figura 152. **Gráfica adherencia vs edad mortero L5**



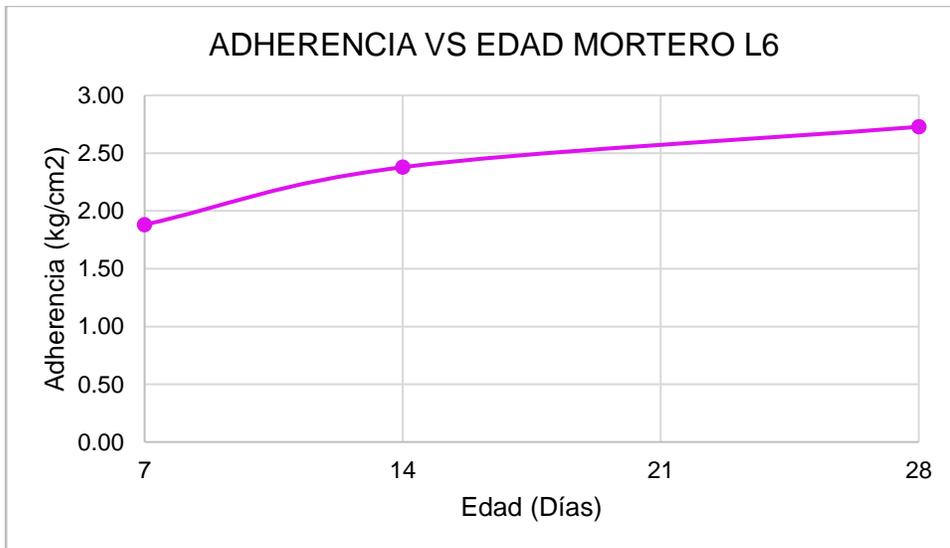
Fuente: elaboración propia.

Figura 153. **Gráfica adherencia vs edad mortero U6**



Fuente: elaboración propia.

Figura 154. **Gráfica adherencia vs edad mortero L6**



Fuente: elaboración propia.

## 6.5. Ensayo de impermeabilización

Como se realizaron distintos ensayos de impermeabilización de los morteros, se hizo una comparación porcentual de la absorción del mortero, así como la permeabilidad en cada una de las fases de ensayo.

### 6.5.1. Comparación del porcentaje de absorción y permeabilidad en ensayo de impermeabilización de morteros a menor escala

Se realizó la comparación de los valores de absorción y permeabilidad para los morteros de ensayo, sin considerar el ensayo a gran escala realizado en el tanque ya que el tiempo de ensayo para este elemento fue mucho más largo que para los elementos a menor escala.

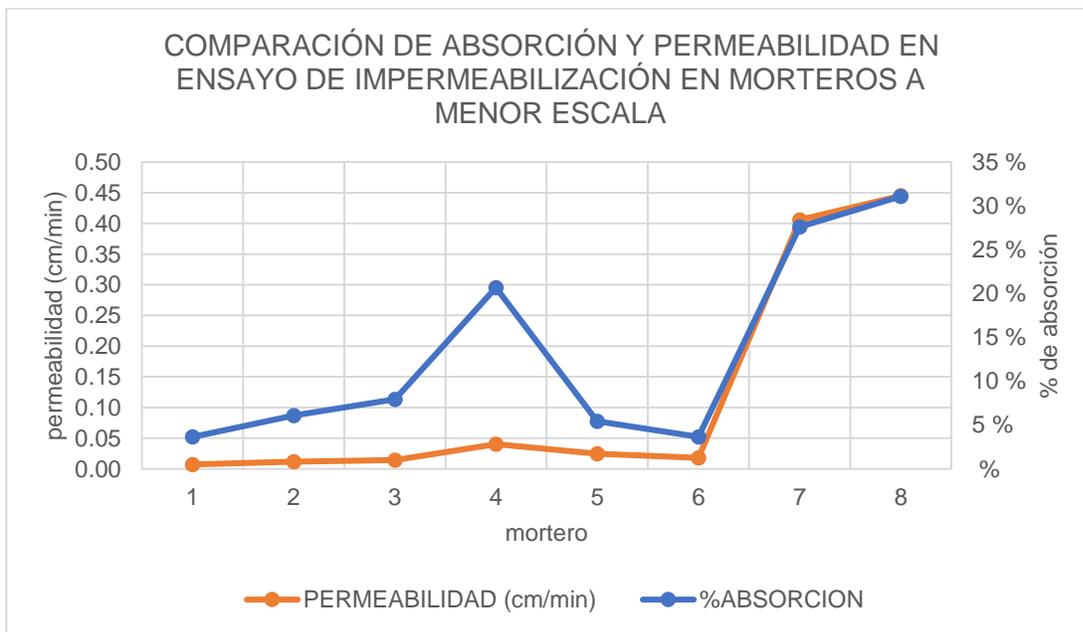
Tabla LXII. **Comparación del porcentaje de absorción y permeabilidad para los morteros ensayados a impermeabilización a menor escala**

COMPARACIÓN DE RESULTADOS EN ENSAYOS A MENOR ESCALA		
MORTERO	PORCENTAJE DE ABSORCIÓN	PERMEABILIDAD (cm/min)
1	3.6377 %	0.007221961
2	6.0853 %	0.011633726
3	7.9287 %	0.014574902
4	20.6738 %	0.04044873
5	5.4153 %	0.024876734
6	3.6485 %	0.017997539
7	27.6107 %	0.405876734
8	31.0873 %	0.444974773

Fuente: elaboración propia.

Al comparar los resultados obtenidos se observa como los morteros 1 y 6 presentan el menor porcentaje de absorción y el mortero 1 presentó también, la permeabilidad más baja. Tanto los morteros 2, 3 y 6 presentaron permeabilidades muy parecidas y relativamente bajas comparadas con la permeabilidad de otros morteros, pero al analizar la gráfica se observa que tanto el mortero 1 y el mortero 6 presentan buena relación entre la absorción y permeabilidad, así como los resultados más bajos.

Figura 155. **Gráfica en porcentaje de absorción vs permeabilidad para morteros con caucho granulado**



Fuente: elaboración propia.

### 6.5.2. Comparación del porcentaje de absorción y permeabilidad para mortero 6 – ensayo tubo vs tanque

Se realizó una comparación individual del mortero 6, ya que se tienen los resultados del ensayo fase 3 y fase 4, del porcentaje de absorción y el porcentaje de impermeabilidad. Se puede observar que la absorción y permeabilidad obtenidas en los ensayos 1 y 2 del tanque son bastante altos en comparación a los demás ensayos realizados, esto se debe a que en los ensayos 1 y 2 no se habían corregido los errores cometidos durante la elaboración del tanque, pues existían fugas en la tapadera del contrato y en las juntas del block. Por ello, se percibe una gran diferencia de resultados en los demás ensayos realizados al tanque y por ello el valor promedio de absorción y permeabilidad del tanque es elevado.

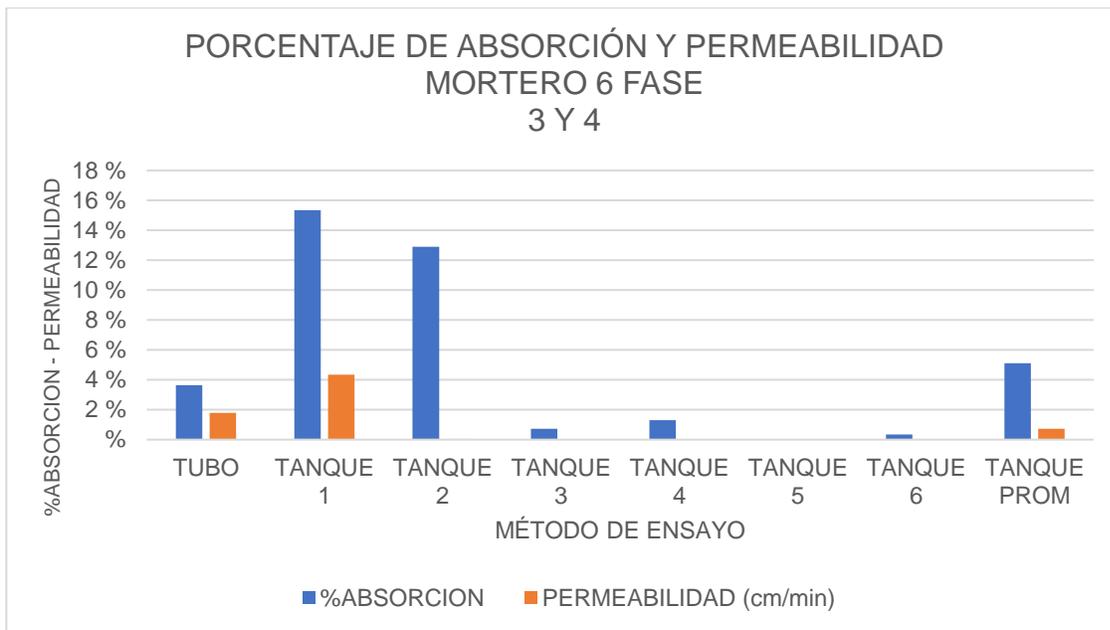
Tabla LXIII. Comparación absorción y permeabilidad en mortero 6 – ensayo tubo vs tanque

ENSAYO	PORCENTAJE DE ABSORCION	PERMEABILIDAD (cm/min)
TUBO	3.648 %	0.0180000
TANQUE 1	15.338 %	0.0433464
TANQUE 2	12.889 %	0.0004094
TANQUE 3	0.732 %	2.13666E-05
TANQUE 4	1.305 %	6.76687E-05
TANQUE 5	0.000 %	0.0000000
TANQUE 6	0.333 %	1.38963E-05
TANQUE PROM	5.100 %	0.00730980

Fuente: elaboración propia.

Al comparar los resultados del ensayo del tanque respecto al ensayo del tubo se puede observar una notable mejora en la permeabilidad del mortero y considerando que la absorción se ve afectada por los resultados 1 y 2, en general se mantiene un buen porcentaje de absorción y permeabilidad en los ensayos de la fase 3 y 4.

Figura 156. **Gráfica comparativa en porcentaje de absorción y permeabilidad mortero 6 fase 3 y 4**



Fuente: elaboración propia.

## 6.6. Comparación de los esfuerzos a compresión, corte y adherencia en morteros 5 y 6

Con los ensayos de compresión, corte y adherencia realizados, se puede realizar una comparación entre los morteros 5 y 6 de manera gráfica y porcentual para identificar el mortero con mejores propiedades mecánicas.

### 6.6.1. Comparación entre morteros 5 y 6

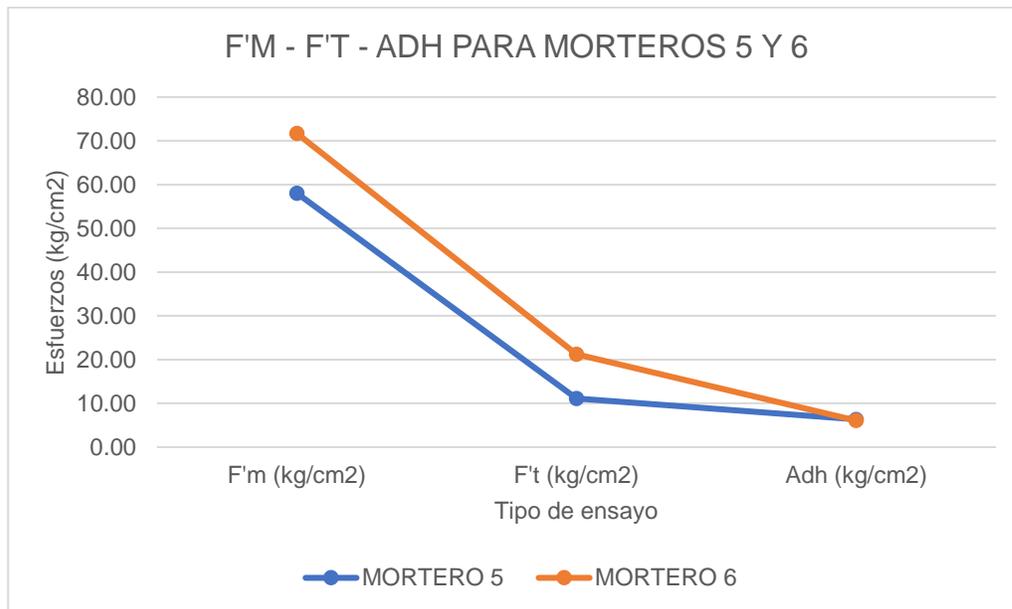
Ya que los morteros 5 y 6 presentaron el mejor comportamiento al ser sometidos a carga axial y cortante se realizó una comparación de los esfuerzos obtenidos en cada ensayo. Aunque la diferencia entre ambos resultados es baja, el mortero 6 supera en compresión y corte al mortero 5, y ambos morteros presentan la misma capacidad de adherencia. La diferencia principal entre los morteros 5 y 6 es la consistencia en los valores de esfuerzo. El mortero 5 presentó inconsistencia durante el ensayo a compresión, debido al tamaño de las fibras de caucho, el mismo problema se presentó en el ensayo de adherencia con la aplicación untada.

Tabla LXIV. **Comparación de esfuerzos a compresión, corte y adherencia entre los morteros 5 y 6**

<b>MORTERO</b>	<b>F'm (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>F't (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Adh (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
5	58.040	11.142	6.352
6	71.710	21.240	6.069
Diferencia	23.55 %	90.64 %	4.65 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 157. **Gráfica comparativa de F'm, F't y Adh para morteros 5 y 6**



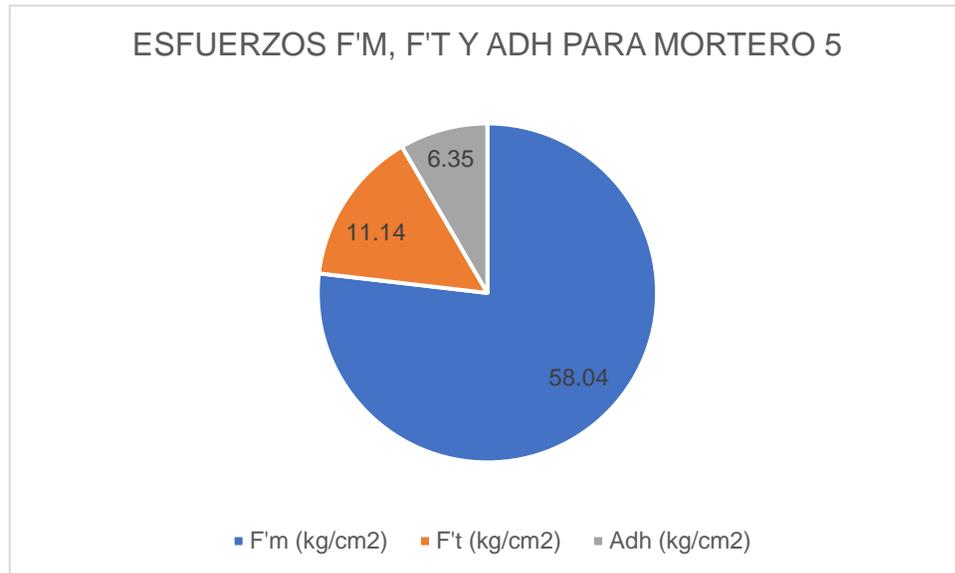
Fuente: elaboración propia.

### 6.6.2. Comparación entre esfuerzos para mortero 5 y 6

- Mortero 5

Al relacionar los esfuerzos obtenidos en el mortero 5 se obtiene que el esfuerzo de compresión es aproximadamente 5 veces el esfuerzo de corte y 9 veces el esfuerzo de adherencia. Además, el esfuerzo de corte es aproximadamente 2 veces el esfuerzo de adherencia.

Figura 158. **Esfuerzos F'm – F't – Adh para mortero 5**

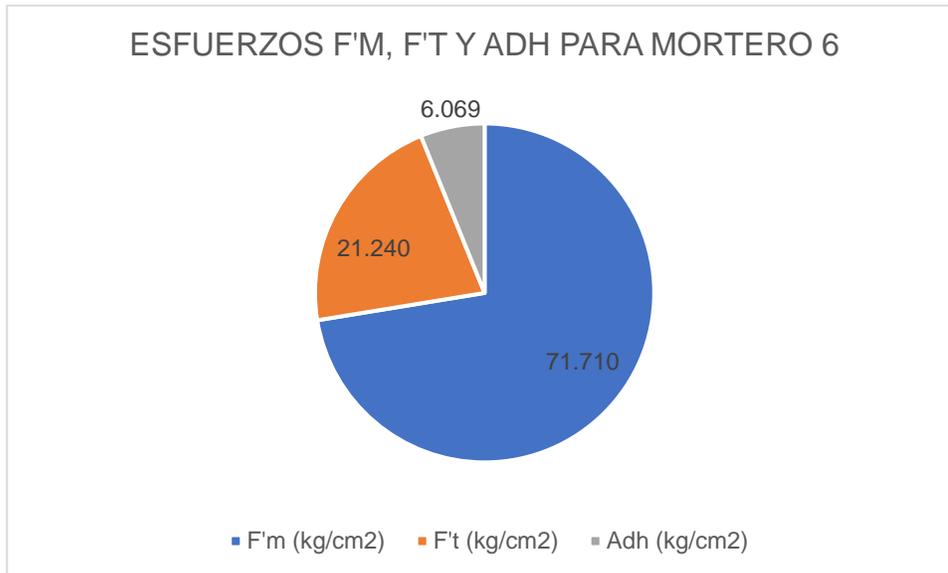


Fuente: elaboración propia.

- Mortero 6

Al relacionar los esfuerzos obtenidos para el mortero 6 se obtiene que el esfuerzo de compresión es aproximadamente 3 veces el esfuerzo de corte y 12 veces el esfuerzo de adherencia. Además, el esfuerzo de corte es aproximadamente 3 veces el esfuerzo de adherencia.

Figura 159. **Esfuerzos F'm – F't – Adh para mortero 6**



Fuente: elaboración propia.

En el libro de Notas mampostéricas de una sabandija, se consideran tres tipos de fallas que se pueden presentar en los morteros: Falla por fricción-cortante, falla por tensión diagonal y falla por compresión. Esto dependerá de la relación  $\text{compresión} > \text{corte} > \text{adherencia}$  para poder determinar qué tipo de falla presentará el mortero (Corzo, 2014). Por ello se debe considerar que, si el esfuerzo de compresión es mayor a 8 veces el esfuerzo de corte, el mortero podría fallar por tensión diagonal o fricción-cortante. Ya que tanto el mortero 5 y 6 presentaron una relación  $F'm/F't$  de 5 y 3 respectivamente, se considera que es más probable que falle por tensión diagonal o fricción-cortante, y estas relaciones indican que el mortero 6 es más estable, condición que indica un mejor comportamiento estructural.

## CONCLUSIONES

1. Se evaluaron 8 morteros de revestimiento con adición de caucho granulado de diferentes proporciones de cemento, cal, arena, caucho y agua, determinando su resistencia a la compresión, corte, adherencia, absorción y permeabilidad, de los cuáles los morteros con caucho granulado tamizado presentaron mejores resultados, resaltando el mortero con proporción 1:0.5:0.5, de cemento, arena y caucho de grano medio respectivamente.
2. Se evaluó la granulometría del caucho granulado por medio de la norma NTG 41010 h1 y se definieron 3 tamaños de grano para el caucho: Caucho fino, que pasa el tamiz no. 30 hasta el no. 100; Caucho medio, que pasa el tamiz no. 8 y queda retenido en el tamiz no. 30 y caucho grueso, que queda retenido en el tamiz no. 8 hasta el tamiz 3/8". Se elaboraron morteros con caucho medio y grueso. Se consideró no utilizar la granulometría fina para evitar los efectos que las arcillas causan en los morteros.
3. Las evaluaciones de los morteros se dividieron en tres fases de selección de proporciones. En la primera fase se evaluaron morteros con una mayor cantidad de caucho respecto al cemento, en la cual se obtuvieron morteros más ligeros pero esta característica afectó la impermeabilidad del mortero y presentaba morteros con baja resistencia a la compresión, con un comportamiento más frágil. En la segunda fase se analizaron morteros con una menor cantidad de caucho que iguala la cantidad de arena, tanto en morteros de cemento como en morteros de cal, siendo los morteros de

cemento los que presentaron mejor resultado y por ello se evaluaron en la fase 3, obteniendo sus resistencias a corte y adherencia.

4. Se realizaron diferentes ensayos para determinar la permeabilidad de los morteros, donde la idea principal era revestir con los morteros de estudio contenedores de agua elaborados con mampostería y determinar la disminución de altura del espejo de agua para obtener la permeabilidad en cm/min y el porcentaje de absorción.
5. Al comparar la absorción entre los 8 morteros de estudio se observa que el mortero 1 y el mortero 6 presentan los porcentajes más bajos, y los morteros 1, 2, 3 y 6 presentan permeabilidades muy parecidas y relativamente bajas comparadas con la permeabilidad de los otros morteros. Pero tanto el mortero 1 como el 6 presentan las mejores relaciones entre absorción y permeabilidad.
6. Al comparar los valores de resistencia a la compresión se puede observar que los morteros 5 y 6 presentan una resistencia mucho mayor en comparación con otros morteros, siendo el mortero 6 el que obtuvo el valor de  $f'm$  mayor ( $71.71 \text{ kg/cm}^2$ ), por lo que tamizar el caucho incrementa la resiliencia del mortero y por lo tanto su resistencia a la compresión. Los morteros de cal con caucho no presentan resultados óptimos debido a la diferencia química entre el caucho y la cal.
7. Se evaluaron los morteros 5 y 6 al ser sometidos a esfuerzos cortantes, obteniendo resultados congruentes con el ensayo a compresión, pues el mortero 6 presentó la mayor resistencia a corte, así como un crecimiento proporcional respecto a sus edades.

8. Se determinaron los factores de reducción para esfuerzos a compresión y corte con morteros de caucho reciclado. Por medio de la relación entre el módulo de Poisson y  $f_m$ , se obtuvo un valor  $\phi = 0.80$  para diseño en compresión; y, por medio de la correlación entre la deformación diagonal y deformación transversal en el ensayo de corte, se obtuvo un valor  $\phi = 0.75$  para diseño en corte.
9. Se determinaron los esfuerzos de adherencia en los morteros 5 y 6 se analizaron 2 métodos de aplicación: Aplicación untada y lanzada. Se obtuvieron resultados muy parecidos entre los ensayos, siendo el mortero 5 untado el que presentó la adherencia más baja y el mortero 6 untado el que presentó la adherencia más alta. Se concluyó que la baja adherencia del mortero 5 se debe a que en el 67 % de los ensayos se presentó una falla adhesiva en el interior del mortero, a diferencia de los otros morteros que presentaron en cada ensayo una falla distinta. Al realizar el análisis en los círculos de Mohr para los ensayos de adherencia se obtienen ángulos de fricción interna entre  $23^\circ - 27^\circ$  siendo precisamente los morteros 5 untado y 6 untado con el ángulo mayor ( $27^\circ$ ).
10. Debido a las propiedades impermeables del caucho se obtuvieron morteros de cemento con baja permeabilidad, la cual disminuye cuando incrementa la edad del mortero, por ello en el ensayo de impermeabilidad a gran escala con el mortero 6, se observa una disminución considerable en la permeabilidad, obteniendo una permeabilidad promedio de 0.007 cm/min, y al obtener el pH del agua que estuvo 3 meses en completo reposo dentro del tanque se obtuvo un valor de 8.5. Se considera que el agua potable se encuentra entre 6.5 y 9.5 por lo que, a pesar de estar en reposo, el agua era potable ligeramente alcalina.



## RECOMENDACIONES

1. Verificar el uso del caucho granulado de grano medio en los morteros de revestimiento para asegurar una mayor resistencia a la compresión, adherencia, corte e impermeabilidad.
2. Analizar si la trabajabilidad del mortero de revestimiento se ve afectada al adicionarle caucho granulado.
3. Tomar en cuenta que el mortero con caucho granulado fue elaborado con arena de río, se deben analizar las características y propiedades de la arena a utilizar para definir si el caucho granulado de grano medio será la mejor opción para el diseño del mortero de revestimiento en estudio.
4. Evitar el uso de arena de origen volcánico en la elaboración de los morteros de revestimiento con caucho granulado debido a la retención de humedad que este agregado fino provoca en la mezcla.
5. Optar por un método de aplicación untado para el mortero de revestimiento con caucho granulado para asegurar una mejor adherencia entre las fibras de caucho y el poro del mamposte.
6. Considerar un espesor de 5 mm para el revestimiento con mortero de caucho granulado que permita una buena distribución del grano en el área de contacto.

7. Implementar el método de ensayo de permeabilidad realizado en un tanque a escala para futuros análisis debido a la facilidad y factibilidad de este.
  
8. Ejecutar análisis del agua estancada en el ensayo de impermeabilización a largo plazo para verificar que la implementación del caucho granulado en la mezcla no produzca algún efecto contraproducente en la calidad del agua.

## REFERENCIAS

1. Álvarez, J., Pérez, A., García, P. (diciembre, 1995). Historia de los morteros. *Instituto Andaluz Patrimonio Histórico*, 13(13), 52-59. Recuperado de <https://www.iaph.es/revistaph/index.php/revistaph/article/view/263>
2. Aranguren, A. (30 de octubre, 2017). El neumático y su interesante historia [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.motoryracing.com/coches/noticias/el-neumatico-y-su-interesante-historia/>
3. Aroche, K. (23 de junio, 2021). Usos del jabón de coche en Guatemala [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://aprende.guatemala.com/cultura-guatemalteca/general/usos-jabon-de-coche-guatemala/>
4. ASTM. (2019). *ASTM C270-14a. Standard Specification for Mortar for Unit Masonry*. Estados Unidos: Autor.
5. Azqueta, A. P. E. (enero, 2002). Las condensaciones de humedad en la construcción. *Revista VIVIENDA*, 474, 54-57. Recuperado de <https://gabustos.tripod.com/n.pdf>
6. Babativa, D. y Holguín, S. (2017). *Evaluación de la afectación en la calidad del aire por el incidente de quema accidental de llantas usadas en la localidad de Fontibón Bogotá en el año 2014* (tesis de

licenciatura). Universidad de la Salle, Bogotá. Recuperado de [https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1348&context=ing\\_ambiental\\_sanitaria](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1348&context=ing_ambiental_sanitaria)

7. Bekkedahl, N. (marzo, 1946). Caucho natural y caucho sintético. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 6(22), 53–64. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/42599/32262-119418-1-PB.pdf?sequence=1>
8. Burgos, L. y Bonilla, L. H. (1986). *Aplicación de impermeabilizantes*. Bogotá: SENA.
9. Cabrera, C. (23 de enero, 2017). Construyen el muro ecológico más grande de Guatemala [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.guatemala.com/noticias/sociedad/construyen-el-muro-ecologico-mas-grande-de-guatemala.html>
10. Congreso de la República de Guatemala (2017). *Iniciativa de ley 5360. Manejo, recolección, tratamiento y disposición final de llantas*. Guatemala: Autor.
11. Contreras, O. (2016). *Comparación de metodologías en la aplicación de materiales flexibles y aditivos* (tesis de licenciatura). Universidad San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/4264/1/Obed%20Othoniel%20Contreras%20Motta.pdf>

12. Cruz, A. (2018). Desarrollo de material reutilizando llantas usadas para empresa polímeros y hules de Guatemala (tesis de licenciatura). Universidad Rafael Landívar, Guatemala. Recuperado de <http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesiseortiz/2018/03/06/Cruz-Ana.pdf>
13. Darya. (18 de enero, 2018). Impermeabilizar con chapopote [Mensaje en un blog]. Recuperado de <http://ejemplosmaterialesconstruccion.blogspot.com/2018/01/impermeabilizar-con-chapopote.html>
14. El Ferretero. (25 de junio, 2018). Los impermeabilizantes [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://ferretero.com/los-impermeabilizantes/>
15. EROSKI Consumer. (25 de octubre, 2022). Eflorescencias: causas, prevención y tratamiento [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.consumer.es/bricolaje/eflorescencias-causas-prevencion-y-tratamiento.html>
16. Estrada, J. (2016). *Estudio de propiedades físico mecánicas y de durabilidad del hormigón con caucho* (tesis de maestría). Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/85500/TESIS%20DE%20MASTER.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
17. Fresno, M. (23 de febrero, 2015). Gestión del vapor de agua en muros de paja [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://arquitectutecnicu.com/2015/02/23/gestion-del-vapor-de-agua-en-muros-de-paja/>

18. García, J. y Reyes, V. (2016). Propuesta de un sistema de logística inversa de llantas inservibles para reducir el impacto ambiental y gasto por consumo de combustible en el servicio de gestión ambiental de Trujillo. Trujillo, Perú: *Universidad Privada del Norte*.
19. Geocities. (1 de octubre, 2009). Algo de historia [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.oocities.org/impermeabilizantes/historia.htm>
20. Góngora, J. (28 de noviembre, 2013). Llantas radiales [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.superfrenos.com.mx/llantas-radiales-1/>
21. Guzmán, G. (2017). *Paneles aislantes de sonido elaborados con concreto y adición de polvo de llanta* (tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
22. Hernández, A. y Hernández, A. (2018). Impacto de la contaminación atmosférica en las edificaciones patrimoniales de La Habana, Cuba. Efectos para un futuro cambio climático. *Revista Ingeniería de Construcción*, 33(3), 219-228. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732018000300219>
23. La Casa del Neumático. (12 de septiembre, 2018). ¿Cómo ha sido la evolución de los neumáticos a lo largo de la historia? [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.lacasadelnematico.com/blog/evolucion-de-los-neumaticos->

historia/#:~:text=Fue%20John%20Boyd%20Dunlop%20el,pisaban  
%20sobre%20ruedas%20de%20madera

24. Londoño, C., Vela, M. y Avendaño, C. (septiembre, 2007). Patologías por la humedad en los materiales para construcción. *Scientia Et Technica*, *XIII*(36), 343-347. <https://doi.org/10.22517/23447214.5069>
25. Lujan, J. (abril, 2001). Contaminación ambiental y posibles daños a la salud causados por la quema de neumáticos en la vía pública. *Revista Medica de Tucumán*, *7*(2), 91-101. Recuperado de <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/lil-313672>
26. Maldonado, L. y Campaña, C. (2020). *Diseño de un sistema hidráulico alternativo para la reducción del impacto de la humedad en construcciones* (tesis de licenciatura). Universidad Técnica de Ambato, Ecuador. Recuperado de <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/30587>
27. Mancheno, M., Arévalo, P., Romero, J., Malo, I., Matute, D., Ramos, R., Mancheno, M., Arévalo, P., Romero, J., Malo, I., Matute, D. y Ramos, R. (marzo, 2017). Análisis fisicoquímico de combustibles líquidos obtenidos en el proceso de pirólisis de caucho vulcanizado. *Revista de Ciencias de la Vida, LA GRANJA*, *26*(2). Recuperado de <https://doi.org/10.17163/lgr.n26.2017.08>
28. Mérida, R. (2021). *Estudio de Industria de Guatemala. Neumáticos inteligencia de mercados Guatemala, junio 2021*. Guatemala: CentralAmericaData. Recuperado de

[https://www.centralamericadata.com/es/search?q1=content\\_es\\_le:%22neum%C3%A1ticos%22&q2=mattersInCountry\\_es\\_le:%22Guatemala%22](https://www.centralamericadata.com/es/search?q1=content_es_le:%22neum%C3%A1ticos%22&q2=mattersInCountry_es_le:%22Guatemala%22)

29. Nazer, A., Honores, A., Chulak, P. y Pavez, O. (marzo, 2019). Hormigón sustentable basado en fibras de neumáticos fuera de uso. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(3), 723-729. DOI: 10.20937/RICA.2019.35.03.17
30. NEUMATICOS KM 0. (28 de noviembre de 2017) ¿Qué partes componen la estructura de un Neumático? [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.neumaticoskm0.com/estructura-de-un-neumatico/>
31. Pérez, R. y Saiz, L. (enero, 2018). Reciclado de neumáticos: transformación de un residuo en un recurso. *Revista de Plásticos Modernos*, 115(730), 11-18. Recuperado de <https://docplayer.es/81373023-Reciclado-de-neumaticos-transformacion-de-un-residuo-en-un-recurso.html>
32. Pizarro, F. (2013). *Valorización de caucho procedente de neumáticos fuera de uso* (tesis de licenciatura). Universidad de Chile, Chile. Recuperado de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/144148>
33. Pruebaderuta.com. (15 de marzo, 2016). Tipos de llantas (neumáticos) según su estructura [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.pruebaderuta.com/tipos-de-llantas-neumaticos-segun-su-estructura.php>

34. Quiñonez, J. (2017). *Utilización de granulado de caucho reciclado como adición para concreto permeable para uso en estacionamientos vehiculares* (tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
35. Safranez, C. (octubre, 1973). Impermeabilización de cubiertas. *Informes de la Construcción*, 26(254), 57-68. Recuperado de <https://doi.org/10.3989/ic.1973.v26.i254.3096>
36. Sánchez, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*. Colombia: BHANDAR Editores Ltda.
37. Santafixie Stories. (13 de agosto, 2017) ¿Sabías quién inventó las ruedas de bici con aire? [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.santafixie.com/blog/sabias-quien-invento-las-ruedas-bici-aire/>
38. Simba, E. (2007). *La impermeabilización en construcciones nuevas y existentes* (tesis de licenciatura). Escuela Politécnica Nacional, Ecuador. Recuperado de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1982/1/CD-0562.pdf>
39. Ventura, D. (29 de octubre, 2017). ¿Dónde se inventó la rueda y por qué tardó tanto en aparecer? [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-41728685>



## APÉNDICES

### Apéndice 1. Bitácora de ensayo de impermeabilización fase 1

BITACORA
El día 14/04/2021 se elaboran los elementos de ensayo, para esto se eligen 4 <i>blocks</i> con medidas de 19x19x39 cm que no fueran de doble tabique, cada uno se identifica con el mortero a ensayar y se revisten las 4 caras de una de sus perforaciones buscando que queden de un espesor aproximado de 0.5 cm, además se funde un fondo en el block con el mismo mortero a ensayar.
El 21/04/2021 se realiza el ensayo de impermeabilización a cada uno de los blocks propuestos:
09:42 - Se inicia el ensayo de impermeabilización.
09:56 - Se observó filtración en el block con mortero 4 (2:1:1) en algunos puntos, posiblemente por algún agrietamiento en la zona.
09:57 - El block con mortero 1 (1:1:1) presentó filtración en la cara interna del block, parte inferior, posiblemente por un mal sellado.
10:00 - El mortero 4 falló en sus 4 caras.
10:06 - El mortero 4 presenta una pérdida de altura de espejo de agua de 2 cm.
10:10 - Se rellenan todos los blocks hasta la línea para un nuevo ensayo. (Se toma como hora inicial)
10:23 - Todos los blocks se mantienen en la línea excepto el block con mortero 4, se considera que es debido a una mala aplicación.
10:48 - El block con mortero 4 presenta filtraciones en todas partes, el block con mortero 3 (1:1:2) presenta ligera filtración en una de sus caras. El block con mortero 2 (1:1:1.5) Presenta humedad en una de las caras y filtración en otra de las caras del block. El block con mortero 1 se encuentra en la misma altura.
10:56 - El block con mortero 1 presenta filtraciones en la parte baja de las caras posiblemente por una mala fundición de tapadera. El block con mortero 2 No presentó más filtraciones. El block con mortero 3 presentó filtraciones en una de sus caras y humedad en la parte baja de todas las caras del block. El block con mortero 4 falló en todas sus caras, presentando filtraciones.
11:18 - Se toman datos de pérdida de altura del espejo de agua, obteniendo la pérdida mayor en el block con mortero 4.
11:20 - Se finaliza el ensayo.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2.

**Bitácora de ensayo de impermeabilización fase 2**

<b>BITACORA</b>
El día 11/05/2021 se elaboran los prismas de ensayo revistiendo cada una de sus caras y fundiendo tapaderas de concreto 1:1:1.5 respectivamente, además el mortero de pega utilizado para los prismas fue el mismo que se utilizó para el ensayo de impermeabilidad.
El día 19/05/2021 se realiza el ensayo de impermeabilización en los morteros 5, 6, 7 y 8.
10:49 - Inicia el ensayo del prisma con mortero 6.
10:50 - Se observan fugas en todas las uniones del prisma con mortero 6, esto debido a una mala pega y elaboración de los prismas.
10:54 - Debido al mal pegado de los blocks, el ensayo del prisma con mortero 6 falló, perdiendo toda el agua por medio de las uniones en menos de 5 minutos.
10:54 - Se inicia el ensayo del prisma con mortero 5.
10:56 - Se observan fugas y filtraciones en 3 de las 4 caras de los blocks que conforman el tubo de mortero 5.
10:56 - Se inicia el ensayo del prisma con mortero 8.
10:57 - Se observa fuga en la tapadera del tubo de mortero 8.
10:58 - Se inicia el ensayo del prisma con mortero 7.
10:59 - Se observan filtraciones en la parte media del prisma con mortero 8 en una de sus caras.
11:00 - Filtraciones en la primer y segundas hiladas de blocks que conforman el prisma con mortero 7.
11:02 - Pequeñas filtraciones en 3 de 4 blocks del prisma con mortero 7.
11:07 - Filtraciones en todo el tubo de mortero del prisma 8.
11:07 - Se observa que el prisma con mortero 5 absorbió la mitad del agua.
11:08 - Se finaliza el ensayo.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3.

**Bitácora de ensayo de impermeabilización fase 3**

<b>BITACORA</b>
El día 03/06/2021 se elaboran los elementos de ensayo, para esto se eligen 4 mitades de blocks con medidas de 19x19x19 cm, pegados con el mismo mortero. Cada uno se identifica con el mortero a ensayar y se revisten las 4 caras internas buscando que queden de un espesor aproximado de 0.5 cm, además se funde un fondo en el block con concreto 1:1:1.5
El 03/06/2021 se realiza el ensayo de impermeabilización a cada uno de los morteros propuestos:
14:35 - Se inicia el ensayo en el tubo 5 llenándolo con agua hasta una altura de 73.5 cm
14:40 - Se realiza la primera revisión al tubo 5 y no se observa movimiento en el espejo de agua.
14:46 - Se inicia el ensayo de impermeabilización en el tubo 6
14:49 - Se realiza la primera revisión al tubo 6 y no se ve ninguna disminución en la altura.
14:52 - Se observa humedad en una de las caras del block base del tubo 5, se considera alguna grieta en el revestimiento de esa cara.
14:52 - Se inician los ensayos de impermeabilización en el tubo 7 y 8
15:42 - Se observa una pérdida de altura de 2.1 cm en el tubo 5 y filtraciones en la misma cara del block base.
15:42 - El tubo 7 presenta filtraciones en todos los blocks que conforman el tubo, se perdieron 20.3 cm de altura de espejo de agua. Se finaliza el ensayo en el tubo 7.
15:43 - El tubo 8 presenta filtraciones en 3 de los 4 blocks que conforman el tubo, el segundo block (de abajo hacia arriba) presentó fallas en todas las caras, se perdieron 22.7 cm. Se finaliza el ensayo del tubo 8.
16:40 - Se observa disminución de la altura del espejo de agua de 3.7 cm en el tubo 5 y de 2.0 cm en el tubo 6, no se observaron otras filtraciones más que las registradas.
17:15 - Se registra una pérdida de 4 cm en el tubo 5, filtración únicamente en una cara. Se finaliza el ensayo del tubo 5.
17:15 - Se registra una pérdida de 2.7 cm en el tubo 6, no se observaron filtraciones ni humedad en el tubo. Se finaliza el ensayo del tubo 6.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Bitácora de ensayo de tanque de impermeabilización**

<b>BITACORA</b>
El día 21/04/2021 se realiza el levantado del tanque con dos hiladas de block de 14x19x39 cm con mortero de pega
El día 12/05/2021 se funde la tapadera base del tanque con concreto 1:1:1.5
<b>26/05/2021 - Se realiza el primer ensayo del tanque</b>
10:02 - Se marca el tanque a cada 5 cm de altura y empieza a llenarse
10:10 - Se termina de llenar el tanque a los 32.50 cm
10:15 - Se observa falla en una sisa
10:16 - Bajó 0.50 cm. Se observa fuga en la cara "A" en la parte inferior.
10:26 - Se tapó la fuga de la cara "A"
10:26 - Se ha mantenido 0.50cm arriba de la primera marca
10:37 - Bajó 2.50 cm desde la primera marca y se considera fuga entre el revestimiento y el piso. Altura del espejo de agua = 30 cm.
10:38 - Las caras B, C y D no presentan ningún problema. No se ven fisuras o agrietamiento
11:00 - Ha bajado 2 mm desde la última toma. Se sugiere reforzar la unión de la base y pared con mortero para evitar filtraciones, pues se observa humedad en esa zona en las caras A, B, C.
11:27 - Ha bajado 2 cm desde la última toma. 28 cm de altura del espejo de agua
11:40 - Bajó 2.50 cm y solo se observan filtraciones en la parte inferior de todas las caras, tomar en cuenta la recomendación.
11:41 - No se observan filtraciones o fisuras en las paredes revestidas por lo que el mortero no falló.
11: 57 - A 5 minutos de cumplir las 2 horas se finaliza el ensayo con 5 cm bajo la medida inicial.
<b>01/05/2021 - Se realiza una revisión al tanque</b>
12:14 - Se revisa el tanque a los 7 días del primer ensayo y se encuentra 5 cm debajo de la última toma.
12:15 - Se finaliza la revisión.
<b>09/06/2021 - Se llena el tanque nuevamente (Segundo ensayo)</b>
12:16 - El tanque se llena a una altura de 33.50 cm
12:20 - Se termina de llenar y no se observan fisuras en las uniones.
<b>17/06/2021 - Revisión del tanque</b>
11:43 - Se revisa el tanque a los 7 días de la segunda llenada y se observa una baja de 2 cm.
11:44 - Se finaliza el ensayo.
<b>17/11/2021 - Se llena el tanque nuevamente (Tercer ensayo)</b>
10:00 - El tanque se encuentra lleno hasta 5 cm de altura, presenta agua clara con poca turbiedad. Se sugiere medir el ph.
10:02 - Tras un minuto de observación y toma del ph. Se ve el nivel de este entre 8 y 9, el agua se encuentra ligeramente alcalina según la escala.

Continuación del apéndice 4.

10:46 - Se llenó el tanque hasta los 30 cm y se finaliza el ensayo.
<b>18/11/2021 - Revisión del tanque</b>
12:00 - Se encuentra la altura del espejo de agua al mismo nivel.
12:01- Se finaliza el ensayo.
<b>23/11/2021 - última revisión del tanque</b>
11:48 - Se revisa el tanque y se encuentra que la altura del espejo de agua bajó 0.5 cm
11:48 - Se finaliza el ensayo.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Matriz comparativa de resultados de compresión, corte y adherencia en morteros de ensayo**

MATRIZ COMPARATIVA DE RESULTADOS**					
MORTERO	COMPRESIÓN (kg/cm <sup>2</sup> )	CORTE (kg/cm <sup>2</sup> )	ADHERENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )	PORCENTAJE DE ABSORCIÓN	IMPERMEABILIZACIÓN (cm/min)
1	41.1	-	-	3.64 %	0.007
2	30.67	-	-	6.09 %	0.012
3	22.98	-	-	7.93 %	0.015
4	29.02	-	-	20.67 %	0.040
5	58.04	11.14171	6.3515	5.42 %	0.025
6	71.71	21.24035	6.0693	5.10 %	0.007
7	4.7	-	-	27.61 %	0.406
8	5.18	-	-	31.09 %	0.445

\*\* El uso principal de la matriz comparativa se orienta a que los interesados en el tema puedan decidir qué proporción utilizar de acuerdo con sus necesidades principales.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Moldes de testigos para ensayo de determinación de la resistencia a la compresión de morteros**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

Apéndice 7. **Apisonador para ensayo de determinación de la resistencia a la compresión de morteros**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

Apéndice 8.

**Apisonado de la mezcla de morteros en el molde para testigos de ensayo**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

Apéndice 9.

**Granulometría obtenida en el proceso de trituración realizado en la Planta Trituradora Hule de Guate**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

Apéndice 10. **Ensayo de morteros sometidos a compresión**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

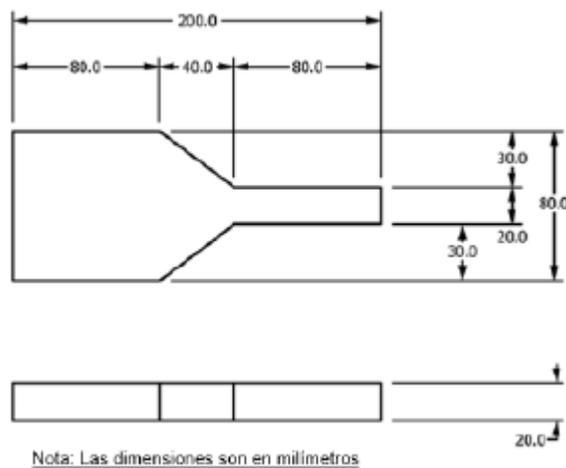
Apéndice 11. **Efecto dovela en mortero 6 sometido a compresión**



Fuente: [Fotografía de Julianne Victoria Corzo Pérez]. (Guatemala, Guatemala. 2022).  
Colección particular. Guatemala.

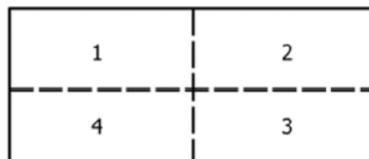
## ANEXOS

### Anexo 1. **Apisonador para ensayo de determinación de la resistencia a flexión de morteros**



Fuente: Comisión Guatemalteca de Normas (2019). *NTG 41003 h5 (ASTM C-348/14) Método de ensayo. Determinación de la resistencia a la flexión de morteros de cemento hidráulico.*

### Anexo 2. **Orden de apisonamiento en el molde para testigos del ensayo de resistencia a flexión en morteros**



Fuente: Comisión Guatemalteca de Normas (2019). *NTG 41003 h5 (ASTM C-348/14) Método de ensayo. Determinación de la resistencia a la flexión de morteros de cemento hidráulico.*

### Anexo 3. Tabla de radiación solar extraterrestre en mm/día

Latitud	HEMISFERIO NORTE												HEMISFERIO SUR											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
70	0.0	1.1	4.2	9.4	14.4	17.3	16.1	11.4	6.1	2.0	0.0	0.0	16.9	11.7	6.4	2.0	0.1	0.0	0.0	0.9	4.4	9.6	15.2	18.5
68	0.0	1.5	4.8	9.8	14.4	17.1	15.9	11.7	6.6	2.4	0.3	0.0	16.7	12.0	6.9	2.4	0.3	0.0	0.0	1.3	4.9	10.0	15.3	18.2
66	0.2	2.0	5.3	10.1	14.5	16.9	15.8	12.0	7.1	2.9	0.6	0.0	16.7	12.2	7.4	2.9	0.6	0.0	0.2	1.7	5.3	10.4	15.3	18.0
64	0.6	2.4	5.8	10.5	14.7	16.8	15.8	12.2	7.5	3.5	1.0	0.2	16.7	12.6	7.9	3.4	1.0	0.2	0.5	2.2	5.9	10.7	15.5	17.9
62	0.9	2.9	6.3	10.9	14.8	16.8	15.9	12.5	8.0	4.0	1.4	0.5	16.8	12.9	8.3	3.9	1.4	0.5	0.8	2.6	6.3	11.1	15.6	17.9
60	1.3	3.4	6.8	11.2	14.9	16.8	16.0	12.8	8.4	4.4	1.8	0.9	16.9	13.2	8.8	4.4	1.8	0.8	1.2	3.1	6.8	11.5	15.8	17.9
58	1.8	3.9	7.2	11.6	15.1	16.9	16.1	13.1	8.9	4.9	2.2	1.3	17.0	13.5	9.2	4.9	2.2	1.2	1.6	3.6	7.3	11.8	16.0	18.0
56	2.2	4.4	7.7	11.9	15.3	16.9	16.2	13.3	9.3	5.4	2.7	1.7	17.1	13.8	9.6	5.4	2.7	1.6	2.0	4.0	7.8	12.2	16.1	18.0
54	2.7	4.9	8.2	12.2	15.4	16.9	16.2	13.6	9.7	5.9	3.2	2.1	17.2	14.0	10.0	5.9	3.1	2.0	2.4	4.5	8.2	12.5	16.3	18.1
52	3.1	5.4	8.6	12.6	15.6	17.0	16.4	13.8	10.1	6.4	3.7	2.6	17.3	14.3	10.4	6.4	3.6	2.4	2.9	5.0	8.7	12.8	16.4	18.1
50	3.6	5.9	9.1	12.9	15.7	17.0	16.4	14.0	10.5	6.9	4.2	3.1	17.4	14.5	10.9	6.8	4.1	2.9	3.3	5.5	9.1	13.1	16.6	18.2
48	4.1	6.4	9.5	13.1	13.8	17.1	16.5	14.2	10.9	7.4	4.7	3.6	17.5	14.8	11.2	7.3	4.5	3.3	3.8	6.0	9.5	13.4	16.7	18.2
46	4.6	6.9	9.9	13.4	16.0	17.1	16.6	14.4	11.2	7.8	5.1	4.0	17.6	15.0	11.6	7.8	5.0	3.8	4.2	6.4	9.9	13.7	16.8	18.2
44	5.1	7.3	10.3	13.7	16.0	17.1	16.6	14.7	11.6	8.3	5.7	4.5	17.6	15.2	12.0	8.2	5.5	4.3	4.7	6.9	10.3	13.9	16.9	18.2
42	5.6	7.8	10.7	13.9	16.1	17.1	16.7	14.8	11.9	8.7	6.2	5.1	17.7	15.4	12.3	8.7	6.0	4.7	5.2	7.3	10.7	14.2	17.0	18.2
40	6.1	8.3	11.1	14.2	16.2	17.1	16.7	15.0	12.2	9.2	6.7	5.6	17.7	15.6	12.6	9.1	6.4	5.2	5.7	7.8	11.1	14.4	17.1	18.2
38	6.6	8.8	11.5	14.4	16.3	17.1	16.7	15.1	12.5	9.6	7.1	6.0	17.7	15.7	12.9	9.5	6.9	5.7	6.2	8.2	11.4	14.6	17.1	18.2
36	7.1	9.2	11.8	14.6	16.3	17.0	16.7	15.3	12.9	10.0	7.6	6.6	17.7	15.9	13.2	9.9	7.4	6.2	6.6	8.7	11.8	14.8	17.1	18.1
34	7.6	9.7	12.2	14.7	16.3	17.0	16.7	15.3	13.1	10.4	8.1	7.1	17.7	16.0	13.5	10.3	7.8	6.6	7.1	9.1	12.1	15.0	17.1	18.1
32	8.1	10.1	12.5	14.5	16.3	16.9	16.6	15.5	13.4	10.9	8.6	7.6	17.7	16.1	13.8	10.7	8.3	7.1	7.6	9.5	12.4	15.1	17.1	18.0
30	8.6	10.5	12.8	15.0	16.3	16.8	16.6	15.5	13.6	11.3	9.1	8.1	17.6	16.2	14.0	11.1	8.7	7.6	8.0	9.9	12.7	15.3	17.1	17.9
28	9.1	10.9	13.1	15.1	16.3	16.7	16.5	15.6	13.8	11.6	9.5	8.6	17.6	16.2	14.2	11.5	9.2	8.0	8.4	10.3	13.0	15.4	17.1	17.8
26	9.6	11.3	13.4	15.3	16.3	16.6	16.4	15.6	14.1	12.0	10.0	9.1	17.5	16.3	14.4	11.8	9.6	8.5	8.9	10.7	13.3	15.5	17.1	17.7
24	10.0	11.8	13.7	15.3	16.2	16.4	16.3	15.6	14.2	12.3	10.4	9.5	17.3	16.3	14.6	12.2	10.0	8.9	9.3	11.1	13.5	15.6	17.0	17.6
22	10.5	12.1	13.9	15.4	16.1	16.3	16.2	15.7	14.4	12.7	10.9	10.0	17.2	16.4	14.8	12.5	10.4	9.4	9.8	11.5	13.8	15.7	16.9	17.4
20	10.9	12.5	14.2	15.5	16.0	16.1	16.0	15.6	14.6	13.0	11.3	10.4	17.1	16.3	14.9	12.8	10.9	9.8	10.2	11.8	14.0	15.8	16.8	17.2
18	11.4	12.9	14.4	15.5	15.9	16.0	15.9	15.6	14.7	13.3	11.7	10.9	16.9	16.3	15.1	13.1	11.2	10.2	10.6	12.2	14.2	15.8	16.7	17.0
16	11.8	13.2	14.6	15.6	15.8	15.8	15.7	15.6	14.9	13.6	12.1	11.4	16.8	16.3	15.2	13.4	11.6	10.7	11.0	12.5	14.4	15.8	16.6	16.8
14	12.2	13.5	14.7	15.6	15.7	15.6	15.6	15.5	15.0	13.8	12.5	11.8	16.6	16.2	15.3	13.6	12.0	11.1	11.4	12.8	14.5	15.8	16.4	16.6
12	12.6	13.8	14.9	15.5	15.5	15.3	15.3	15.4	15.1	14.1	12.9	12.2	16.4	16.2	15.4	13.9	12.3	11.5	11.8	13.1	14.7	15.8	16.2	16.3
10	13.0	14.1	15.1	15.5	15.3	15.1	15.1	15.3	15.1	14.3	13.2	12.7	16.1	16.0	15.4	14.1	12.7	11.9	12.2	13.4	14.8	15.7	16.0	16.1
8	13.4	14.4	15.2	15.4	15.1	14.8	14.9	15.2	15.2	14.5	13.6	13.1	15.9	15.9	15.5	14.3	13.0	12.2	12.5	13.6	14.9	15.7	15.8	15.8
6	13.8	14.6	15.3	15.3	14.9	14.6	14.7	15.1	15.2	14.7	13.9	13.4	15.6	15.8	15.5	14.5	13.3	12.6	12.9	13.9	15.0	15.6	15.6	15.5
4	14.1	14.9	15.3	15.3	14.7	14.3	14.4	14.9	15.2	14.9	14.2	13.8	15.3	15.6	15.5	14.7	13.6	13.0	13.2	14.1	15.1	15.5	15.3	15.2
2	14.4	15.1	15.4	15.1	14.4	14.0	14.1	14.7	15.2	15.1	14.5	14.2	15.1	15.5	15.5	14.9	13.9	13.3	13.5	14.4	15.1	15.4	15.1	14.9
0	14.8	15.3	15.5	15.0	14.2	13.6	13.8	14.6	15.2	15.3	14.8	14.5	14.8	15.3	15.5	15.0	14.2	13.6	13.8	14.6	15.2	15.3	14.8	14.5

Fuente: Allen, R., Pereira, L., Raes, D. y Smith, M (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*. Consultado el 19 de junio de 2022. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm#Contents>.