



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Maestría en Estructuras

**ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE EL COMPORTAMIENTO DE RESISTENCIAS DE UNA  
COLUMNA Y VIGA UTILIZANDO CONCRETO REFORZADO CON VARILLAS DE BASALTO  
Y CONCRETO REFORZADO CON VARILLAS DE ACERO CORRUGADO**

**Ing. Jorge Raúl Sánchez Tello**

Asesorado por el MSc. Ing. Ronald Enrique Urizar Monzón

Guatemala, agosto de 2021



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE EL COMPORTAMIENTO DE RESISTENCIAS DE UNA  
COLUMNA Y VIGA UTILIZANDO CONCRETO REFORZADO CON VARILLAS DE BASALTO  
Y CONCRETO REFORZADO CON VARILLAS DE ACERO CORRUGADO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ING. JORGE RAÚL SÁNCHEZ TELLO**

ASESORADO POR EL MSC. ING. RONALD ENRIQUE URIZAR MONZÓN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**MAESTRO EN ESTRUCTURAS**

GUATEMALA, AGOSTO DE 2021







## **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:

**ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE EL COMPORTAMIENTO DE RESISTENCIAS DE UNA COLUMNA Y VIGA UTILIZANDO CONCRETO REFORZADO CON VARILLAS DE BASALTO Y CONCRETO REFORZADO CON VARILLAS DE ACERO CORRUGADO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 13 de julio de 2019.

**Ing. Jorge Raúl Sánchez Tello**



DTG. 324.2021

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 Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE EL COMPORTAMIENTO DE RESISTENCIAS DE UNA COLUMNA Y VIGA UTILIZANDO CONCRETO REFORZADO CON VARILLAS DE BASALTO Y CONCRETO REFORZADO CON VARILLAS DE ACERO CORRUGADO**, presentado por el Ingeniero **Jorge Raúl Sánchez Tello**, estudiante del programa de **Maestría en Estructuras**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada  
Decana

Guatemala, agosto de 2021

AACE/cc





Guatemala, Julio 2021

EEPFI-0939-2021

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado: **“ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE EL COMPORTAMIENTO DE RESISTENCIAS DE UNA COLUMNA Y VIGA UTILIZANDO CONCRETO REFORZADO CON VARILLAS DE BASALTO Y CONCRETO REFORZADO CON VARILLAS DE ACERO CORRUGADO”** presentado por el Ingeniero **Jorge Raúl Sánchez Tello** identifica con carné **100023558** correspondiente al programa de **Maestría en Estructuras** apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

*“Id y Enseñad a Todos”*

  
**Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cofi**  
Director







Guatemala, Julio 2021

EEPFI-0940-2021

Como Coordinadora del programa de **Maestría en Estructuras** doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE EL COMPORTAMIENTO DE RESISTENCIAS DE UNA COLUMNA Y VIGA UTILIZANDO CONCRETO REFORZADO CON VARILLAS DE BASALTO Y CONCRETO REFORZADO CON VARILLAS DE ACERO CORRUGADO”** presentado por la Ingeniera **Jorge Raúl Sánchez Tello** quien se identifica con el número de carné **100023558**.

Atentamente,

*“Id y Enseñad a Todos”*



  
**Mtro. Armando Fuentes Roca**  
**Coordinadora de Maestría**  
**Escuela de Estudios de Postgrado**





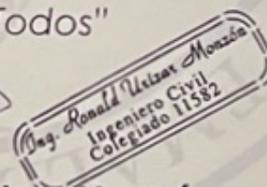
Guatemala, Julio 2021

EEPF-0941-2021

En mi calidad como Asesor de el Ingeniero **Jorge Raúl Sánchez Tello** quien se identifica con número de carné **100023558** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **"ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE EL COMPORTAMIENTO DE RESISTENCIAS DE UNA COLUMNA Y VIGA UTILIZANDO CONCRETO REFORZADO CON VARILLAS DE BASALTO Y CONCRETO REFORZADO CON VARILLAS DE ACERO CORRUGADO"** quien se encuentra en el programa de **Maestría en Estructuras** en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*



**MSc. Ronald Enrique Urizar Monzón**  
**Asesor**



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por darme la vida, por estar conmigo en cada instante, por ser mí guía, mi luz, mi fortaleza, por nunca dejarme y ser lo más importante en mi vida.
- Mi madre** Esther Sánchez Tello, por darme siempre su amor, su apoyo, su cariño y haber luchado desde pequeño por mi educación y que nunca me faltara nada, por sus consejos y su paciencia.
- Mi padre (q. e. p. d.)** Oscar Rene Sánchez, por haberme apoyado y guiado a lo largo de su vida con mucho amor.
- Mi esposa** María Lisette Castro Benincasa, por todo su amor, paciencia, y apoyo que me ha dado en este tiempo, por su cariño incondicional. Por ser el amor de mi vida y la mujer de mi corazón.
- Mi hijo** Raúl Fernando Sánchez, por ser el mayor regalo que me ha dado Dios, por hacerme cada día ser un mejor padre.
- Mis hermanos** Por su ejemplo, sus consejos, su apoyo incondicional y su amor.

**Mi familia**

Por su apoyo, cariño y amor.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Sin el nada de esto hubiera sido posible, el me dio la sabiduría necesaria para completar esta etapa de mi vida.
<b>Mi esposa</b>	Por su apoyo en todo lo que he necesitado, su motivación y su amor.
<b>Mis padres</b>	Por haber luchado para que nada me faltara, por su amor, apoyo, consejos y sabiduría.
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por haberme brindado una educación de calidad, y haberme formado como un excelente profesional.
<b>Centro de Investigaciones de Ingeniería</b>	Por haberme apoyado para la realización de las pruebas de laboratorio, con calidad y excelencia.



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XI
GLOSARIO.....	XV
RESUMEN.....	XIX
HIPÓTESIS.....	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXIII
OBJETIVOS.....	XXVII
1. COMPORTAMIENTO Y PROPIEDADES MECANICAS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES TIPO VIGA Y COLUMNA DE CONCRETO REFORZADO .....	1
1.1. Conceptos generales del diseño estructural con concreto .....	1
1.2. Características del concreto .....	3
1.2.1. Índices de resistencias.....	3
1.2.1.1. Carga axial.....	4
1.2.1.2. Flexión simple .....	5
1.2.1.3. Fuerza cortante .....	5
1.2.1.4. Tracción .....	7
1.2.1.5. Adherencia.....	8
1.3. Concreto armado.....	9
1.3.1. Concreto armado y los materiales de refuerzo .....	10
1.3.2. Resistencias de concreto reforzado .....	11
1.3.2.1. Resistencia a compresión .....	12
1.3.2.2. Resistencia a tracción .....	12
1.3.2.3. Resistencia a flexión .....	13

	1.3.2.4.	Resistencia a corte .....	15
	1.3.2.5.	Ensayos de adherencia .....	16
	1.3.2.5.1.	Ensayo de adherencia tipo <i>pull-out</i> .....	16
1.4.		Características del acero como material de refuerzo.....	17
	1.4.1.	Tipos de acero.....	17
	1.4.2.	Características del basalto .....	18
	1.4.2.1.	Origen y tipos de basalto .....	19
	1.4.2.2.	Propiedades mecánicas de la fibra de basalto: ventajas y desventajas .....	22
1.5.		Elemento estructural tipo columna .....	23
	1.5.1.	Diseño de columnas .....	23
	1.5.2.	Comportamiento de una columna reforzada .....	24
	1.5.2.1.	Comportamiento a carga axial y momento.....	24
1.6.		Elemento estructural tipo viga .....	26
	1.6.1.	Comportamiento a flexión.....	27
1.7.		Comportamiento a fuerza cortante .....	27
1.8.		Comportamiento a tracción .....	28
2.		ANÁLISIS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES .....	29
	2.1.	Normativas establecidas y ensayos realizados de elementos estructurales tipo viga y columna de concreto reforzado.....	29
	2.1.1.	Normativas para elementos sometidos a flexión.....	29
	2.1.2.	Normativas aplicables para elementos sometidos a carga axial .....	32
	2.1.3.	Resistencia estructural a tensión de las barras de acero y basalto .....	34

2.1.4.	Comportamiento estructural a la prueba de doblez de las barras de refuerzo.....	36
2.1.5.	Comportamiento estructural de la prueba de adherencia de las varillas.....	38
2.1.5.1.	Pruebas de adherencia .....	39
3.	FABRICACION DE ESPECIMENES Y PRESENTACION DE RESULTADOS TEORICOS-EXPERIMENTALES, DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES .....	41
3.1.	Proceso de fabricación de elementos de concreto reforzado...	41
3.2.	Resultados teóricos-experimentales .....	49
3.2.1.	Ensayos a compresión.....	49
3.2.1.1.	Resistencias de las columnas ensayadas.....	50
3.2.1.2.	Fallas de los elementos tipo columna...	54
3.2.2.	Ensayos a tensión.....	57
3.2.2.1.	Resistencias de elementos a tensión ...	58
3.3.	Ensayos a flexión.....	62
3.3.1.	Resistencias de las vigas ensayadas .....	62
3.3.2.	Deflexiones en vigas ensayadas .....	70
3.3.3.	Fallas en vigas ensayadas .....	73
3.3.4.	Ensayos de dobleces de barras .....	80
3.3.5.	Ensayos de adherencia.....	81
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	83
4.1.	Ensayos a compresión .....	84
4.2.	Ensayos a tensión .....	85
4.3.	Ensayos a flexión.....	86
4.4.	Ensayos de dobleces de 180° .....	88

4.5. Ensayos de adherencia.....	88
CONCLUSIONES .....	91
RECOMENDACIONES .....	93
REFERENCIAS.....	95
APÉNDICES .....	103
ANEXOS .....	105

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Hipótesis ACI 318-14 sobre la distribución de las deformaciones y esfuerzos en la zona de compresión .....	14
2.	Proceso de formación de rocas .....	21
3.	Piedra de basalto .....	21
4.	Tipos de varillas de basalto .....	22
5.	Ejemplo de diagrama carga axial-momento .....	26
6.	Vista diagramática de un aparato apropiado para ensayo a flexión de concreto .....	31
7.	Viga siendo ensayada a flexión de acuerdo con la norma ASTM C-78.....	32
8.	Cilindro de concreto siendo ensayado a compresión de acuerdo con la normativa ASTM C-33 .....	34
9.	Ensayo de ensayos a tensión de acuerdo con la norma ASTM D7205 .....	36
10.	Esquema de dobleces de barras 180° de acuerdo con la norma ASTM E290.....	37
11.	Preparación de moldes para fundición de vigas y columnas .....	41
12.	Realización de armadura de viga VB-04 con armadura de basalto y estribos de acero.....	42
13.	Colocación de armadura, centrado y verificación de medidas .....	42
14.	Verificación de medidas de recubrimiento de armadura de basalto y acero.....	43
15.	Colocación de armadura en formaletas de vigas y columnas .....	43

16.	Prueba de revenimiento de acuerdo con norma Coguanor NTG-41052 / ASTM C143 .....	44
17.	Resultado de revenimiento de acuerdo con la norma Coguanor NTG-41052 / ASTM C143.....	45
18.	Prueba de temperatura al concreto fresco de acuerdo con la norma ASTM C1064.....	45
19.	Fundición de elementos de concreto reforzados con acero ASTM A706 y con basalto .....	46
20.	Fundición de elementos de concreto reforzados con acero ASTM A706 y con basalto .....	47
21.	Curado por inundación de elementos de concreto .....	48
22.	Curado por inundación de elementos de concreto .....	48
23.	Fotografías de los especímenes realizados para los ensayos de adherencia para barras de acero y basalto .....	49
24.	Diagrama comparativo entre las resistencias de compresión de columnas reforzadas con varillas de acero .....	51
25.	Diagrama comparativo entre las resistencias de compresión de columnas reforzadas con varillas de acero y cálculo teórico.....	52
26.	Diagrama comparativo entre las resistencias de compresión de columnas reforzadas con varillas de basalto.....	53
27.	Diagrama comparativo entre las resistencias de compresión de columnas reforzadas con varillas de basalto y cálculo teórico .....	53
28.	Diagrama comparativo entre la relación porcentual de la carga de ruptura de columnas reforzadas con basalto vs. columnas reforzadas con acero .....	54
29.	Fallas típicas por compresión en columnas reforzadas.....	55
30.	Fotografías de fallas de columnas reforzadas con basalto durante prueba de compresión .....	56
31.	Fotografías de corte en varilla de basalto .....	56

32.	Fotografías de fallas de columnas reforzadas con acero durante prueba de compresión.....	57
33.	Diagrama carga vs. deformación para varillas de basalto .....	59
34.	Diagrama carga vs. deformación para varillas de acero .....	61
35.	Diagrama carga vs. deformación para varillas de basalto y varillas de acero .....	61
36.	Diagrama de comparación entre momentos experimentales y teóricos según ACI440.1R para elementos reforzados con basalto .....	64
37.	Diagrama de comparación entre momentos de ruptura y momentos teóricos (MPR) para elementos reforzados con acero.....	66
38.	Diagrama de comparación entre momentos de ruptura para elementos reforzados con acero y basalto en vigas VB-01 y VA-01.....	67
39.	Diagrama de comparación entre momentos de ruptura para elementos reforzados con acero y basalto en vigas VB-02 y VA-02.....	67
40.	Diagrama de comparación entre momentos de ruptura para elementos reforzados con acero y basalto en vigas VB-03 y VA-03.....	68
41.	Diagrama de comparación entre momentos de ruptura para elementos reforzados con acero y basalto en vigas VB-04 y VA-04.....	68
42.	Diagrama de comparación entre momentos de ruptura para elementos reforzados con acero y basalto en vigas VB-05 y VA-05.....	69
43.	Diagrama de relación porcentual entre momento de ruptura de vigas reforzadas con basalto y acero .....	70
44.	Diagrama comparativo entre deflexión de vigas reforzadas con acero VA-01 y reforzadas con basalto VB-01 .....	71
45.	Diagrama comparativo entre deflexión de vigas reforzadas con acero VA-02 y reforzadas con basalto VB-02.....	71
46.	Diagrama comparativo entre deflexión de vigas reforzadas con acero VA-03 y reforzadas con basalto VB-03.....	72

47.	Diagrama comparativo entre deflexión de vigas reforzadas con acero VA-04 y reforzadas con basalto VB-04 .....	72
48.	Diagrama comparativo entre deflexión de vigas reforzadas con acero VA-05 y reforzadas con basalto VB-05 .....	73
49.	Fotografías de fallas de viga de concreto reforzada con basalto VB-01 durante prueba de flexión .....	74
50.	Fotografías de fallas de viga de concreto reforzada con basalto VB-02 durante prueba de flexión .....	74
51.	Fotografías de fallas de viga de concreto reforzada con basalto VB-03 durante prueba de flexión .....	74
52.	Fotografías de fallas de viga de concreto reforzada con basalto VB-04 durante prueba de flexión .....	76
53.	Fotografías de fallas de viga de concreto reforzada con basalto VB-05 durante prueba de flexión .....	76
54.	Fotografías de fallas de viga de concreto reforzada con acero VA-01 durante prueba de flexión .....	77
55.	Fotografías de fallas de viga de concreto reforzada con acero VA-02 durante prueba de flexión .....	78
56.	Fotografías de fallas de viga de concreto reforzada con acero VA-03 durante prueba de flexión .....	78
57.	Fotografías de fallas de viga de concreto reforzada con acero VA-04 durante prueba de flexión .....	78
58.	Fotografías de fallas de viga de concreto reforzada con acero VA-05 durante prueba de flexión .....	79
59.	Fallas en varillas de basalto por dobleces de 180° .....	81
60.	Fallas en varillas de basalto por ensayo de adherencia ( <i>pull-out</i> ) .....	82
61.	Fallas en varillas de acero por ensayo de adherencia ( <i>pull-out</i> ) .....	82

## TABLAS

I.	Rangos típicos de CDT de los componentes más comunes de concreto .....	10
II.	Información de varillas de acero para refuerzo.....	18
III.	Propiedades de la fibra de basalto .....	23
IV.	Propiedades de elementos tipo viga por ensayar .....	30
V.	Propiedades elementos tipo columna por ensayar .....	33
VI.	Resultados de pruebas a compresión de especímenes tipo columna reforzados con acero .....	50
VII.	Resultados de pruebas a compresión de especímenes tipo columna reforzados con basalto.....	51
VIII.	Resultados de ensayos a tensión en varillas de basalto.....	58
IX.	Resultados de ensayos a tensión en varillas de Acero.....	60
X.	Resultados de ensayos a flexión en elementos de concreto reforzados con basalto .....	63
XI.	Resultados de ensayos a flexión en elementos de concreto reforzados con acero .....	65
XII.	Propiedades de las varillas ensayadas .....	80
XIII.	Propiedades de los elementos probados por adherencia .....	81



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b><math>b_w</math></b>	Ancho del alma
<b><math>A_g</math></b>	Área bruta de la sección de concreto
<b><math>A_s</math></b>	Área de acero longitudinal
<b><math>A_{st}</math></b>	Área de acero longitudinal
<b><math>A_v</math></b>	Área de acero por cortante
<b><math>A_t</math></b>	Área de la rama de un estribo cerrado que resiste la torsión con un espaciamiento S
<b><math>A</math></b>	Área de la sección especificada
<b><math>A_{oh}</math></b>	Área encerrada por el eje del refuerzo transversal cerrado más externo dispuesto para resistir torsión
<b><math>A_o</math></b>	Área total encerrada por la trayectoria del flujo cortante torsional
<b><math>\Delta T</math></b>	Cambio de temperatura
<b><math>P_o</math></b>	Carga Axial
<b><math>N_u</math></b>	Carga axial mayorada normal a la sección transversal
<b><math>P_{max}</math></b>	Carga máxima especificada
<b><math>cm</math></b>	Centímetro
<b><math>cm^2</math></b>	Centímetro cuadrado
<b><math>C_b</math></b>	Circunferencia efectiva calculada por diámetro de barra multiplicado por 3.1416
<b><math>\alpha</math></b>	Coefficiente de dilatación térmica
<b><math>C</math></b>	Compresión

$r_f, t_s$	Cuantía mínima para barras de polímero reforzadas tipo FRP
$\delta$	Deformación térmica
$\epsilon_i$	Deformación unitaria en el punto i, mm/mm
$\delta_i$	Desplazamiento en el extensómetro en el punto i
$d_b$	Diámetro de barra
$\Delta\sigma$	Diferencia de esfuerzos de tensión entre el punto inicial y el punto final
$\Delta\epsilon$	Diferencia de deformación promedio entre el punto inicial y el punto final
$d$	Distancia desde la fibra extrema en compresión hasta el centroide del refuerzo longitudinal en tracción
$f_{tu}$	Esfuerzo a la tensión última
$f_{fu}$	Esfuerzo a tensión garantizado de FRP
$S$	Espaciamiento longitudinal del refuerzo cortante o torsionante
$\lambda$	Factor de modificación del concreto
$\psi_t$	Factor utilizado para modificar la longitud de desarrollo en tracción debido a la localización de vaciado del concreto
$\psi_e$	Factor utilizado para modificar la longitud de desarrollo en tracción debido al diámetro del refuerzo
$\psi_g$	Factor utilizado para modificar la longitud de desarrollo en tracción debido a la resistencia del refuerzo
$P_s$	Fuerza axial proporcionada por el acero
$P_c$	Fuerza axial proporcionada por el concreto
$\tau$	Fuerza de adherencia promedio

<b>F</b>	Fuerza de Tensión aplicada
<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	Kilogramo por centímetro cuadrado
<b>kg/cm<sup>3</sup></b>	Kilogramo por centímetro cúbico
<b>kg/m<sup>3</sup></b>	Kilogramo por metro cúbico
<b>PSI</b>	Libra por pulgada cuadrada, por sus siglas en inglés
<b>Lb</b>	Longitud de embebimiento de la barra
<b>ld</b>	Longitud de desarrollo
<b>Lg</b>	Longitud del extensómetro
<b>L</b>	Longitud inicial
<b>MPa</b>	Mega pascales
<b>m<sup>2</sup></b>	Metro cuadrado
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cúbico
<b>m</b>	Metro lineal
<b>Es</b>	Módulo de Elasticidad de Acero
<b>E</b>	Módulo de Elasticidad
<b>Ef</b>	Módulo de Elasticidad de barras FRP
<b>fr</b>	Módulo de ruptura del concreto
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Óxido de silicio
<b>Pa</b>	Pascal
<b>Ph</b>	Perímetro de la línea central del refuerzo transversal para torsión localizado más cerca del exterior de la sección
<b>a</b>	Profundidad del bloque rectangular equivalente de esfuerzos
<b>plg</b>	Pulgada
<b>plg<sup>2</sup></b>	Pulgada cuadrada
<b>Ts</b>	Resistencia a torsión del acero de refuerzo
<b>Tc</b>	Resistencia a torsión del concreto

<b><math>f'c</math></b>	Resistencia especificada a la compresión del concreto
<b><math>f'cr</math></b>	Resistencia especificada a la compresión del concreto al momento del diseño inicial
<b><math>f_y</math></b>	Resistencia especificada a la fluencia del refuerzo no preesforzado
<b><math>f_{yt}</math></b>	Resistencia especificada a la fluencia $f_y$ del refuerzo transversal
<b><math>P_n</math></b>	Resistencia nominal a carga axial de la sección transversal
<b><math>V_n</math></b>	Resistencia nominal a cortante
<b><math>V_s</math></b>	Resistencia nominal a cortante proporcionada por el acero
<b><math>V_c</math></b>	Resistencia nominal a cortante proporcionada por el concreto
<b><math>T_n</math></b>	Resistencia nominal a torsión
<b><math>T</math></b>	Tensión

## GLOSARIO

<b>ACI</b>	Instituto Americano del Concreto ( <i>American Concrete Institute</i> ).
<b>Augita</b>	Es un mineral del grupo de los silicatos, subgrupo inosilicatos y dentro de estos es del tipo piroxenos por ser inosilicatos de cadena sencilla.
<b>AFRP</b>	Fibra de Polímero de Aramida ( <i>Áramid Fiber reinforced polymer</i> ).
<b>AGIES</b>	Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.
<b>Aramida</b>	Fibra sintética, robusta y resistente al calor que se utilizan para fines militares, constructivos o en el campo aeroespacial.
<b>ASTM</b>	Sociedad Americana para el ensayo e Inspección de los Materiales ( <i>American Society for Testing and Materials</i> ).
<b>Baricentro</b>	Centroide de una superficie contenida en una figura geométrica plana.

<b>BFPR</b>	Polímero Reforzado con Fibra de Basalto ( <i>Basalt Fiber Reinforced Polymer</i> ).
<b>CII</b>	Centro de Investigación de Ingeniería.
<b>CFRP</b>	Fibra de Polímero de Carbón ( <i>Carbon Fiber reinforced polymer</i> ).
<b>COGUANOR</b>	Comisión Guatemalteca de Normas.
<b>Cuantía</b>	La relación que hay de refuerzo por partes de hormigón.
<b>FPR</b>	Fibra de Polímero Reforzado ( <i>Fiber Reinforced Polymer</i> ).
<b>Fenocristal</b>	Es el resultado de un enfriamiento lento en el proceso de cristalización del magma.
<b>Ferromagnesianos</b>	Minerales del tipo silicato que forman rocas y que contienen hierro y/o magnesio como esenciales. Es un nombre de grupo adecuado para los minerales como: olivino, hiperstena, augita, hornblenda y biotita.
<b>GFPR</b>	Fibra de Polímero Reforzado con Vidrio ( <i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i> ).
<b>NTG</b>	Norma Técnica Guatemalteca.

<b>Máfico</b>	Es un adjetivo que se aplica a un silicato o roca que es rico en magnesio y hierro.
<b>MORB</b>	Basaltos alcalinos y transicionales son raros y se presentan en montes submarinos, en dorsales asísmicas y zonas de fractura.
<b>Plagioclasa</b>	Es un grupo de minerales de feldespato relacionados que esencialmente tienen la misma fórmula, pero varían en su porcentaje de sodio y calcio.
<b>Poisson</b>	Físico francés que propuso el uso de una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico lineal.



## RESUMEN

Este trabajo provee un análisis y la comparación de elementos tipo columna y viga reforzadas con acero de refuerzo y varillas de basalto tipo BFPR para determinar las ventajas y desventajas de estas y poder observar las características del comportamiento a flexión, compresión, y tensión que estos elementos poseen.

Para la realización de esta investigación se fabricaron 10 elementos estructurales tipo viga con diferentes configuraciones de refuerzo, tanto en acero como en basalto, utilizando la misma cuantía para poder observar las características mecánicas de estos especímenes tales como su resistencia, su deflexión, tipos de falla y ductilidad.

Además, se realizaron 6 columnas con las mismas configuraciones de refuerzo tanto con acero como con basalto para observar sus características mecánicas a compresión y tipos de falla.

Por último, se dispusieron elementos para ensayos de tensión para elementos reforzados con acero y basalto, y pruebas de dobleces de barras para observar su ductilidad. Todos estos ensayos para comparar, bajo cada una de las condiciones mencionadas, que las barras de basalto tipo BFPR pueden ser una alternativa satisfactoria al acero convencional.



## **HIPÓTESIS**

Las varillas de basalto utilizadas como refuerzo para el concreto armado, pueden sustituir al acero corrugado en elementos estructurales tipo columna y viga, ya que los superan en resistencia a tensión, flexión, compresión y capacidad de adherencia.



## INTRODUCCIÓN

El concreto es una mezcla de arena, grava, roca triturada u otros agregados, unidos en una masa rocosa por medio de cemento y agua. Este material ha llegado a ser uno de los más importantes en la construcción, pues es posible utilizarlo para diversas estructuras gracias a sus numerosas ventajas: fácil transportación, alta rigidez y durabilidad, resistencia a la compresión, compatibilidad con otros materiales, resistencia al fuego y agua, larga vida y poco mantenimiento; sin embargo, también posee algunas desventajas: resistencia muy baja a la tensión, se requiere formaleta para su colocación, entre otros. El concreto reforzado es una combinación de concreto y otro material, tradicionalmente acero, en el que el refuerzo proporciona la resistencia a la tensión de la cual carece el concreto.

Aunque el acero por sus propiedades físicas provee al concreto la resistencia a la tensión necesaria para su aplicabilidad como material estructural, en los últimos años se han propuesto materiales alternativos que se pueden adaptar a construcciones realizadas en ambientes con características específicas, y que superan algunas de las debilidades que presenta el acero, como la alta capacidad de corrosión al ser expuesto al oxígeno y agua, peso mayor a otros materiales, poca resistencia a temperaturas elevadas y alta conductividad eléctrica; algunas de estas características, podrían dañar o llevar al colapso de la estructura en determinado tiempo. Por lo anterior, se ha investigado el uso de varillas de basalto, que podrían beneficiar su uso en algunas construcciones, sin sacrificar la estética de la obra final, manteniendo la seguridad de la edificación y reduciendo los costos por mantenimiento o reparaciones a largo plazo.

Durante los últimos años, en Estados Unidos, se ha investigado la utilización de materiales sustitutos del acero estructural, tales como las varillas de Polímero Reforzado con Fibra de Basalto o por su traducción del inglés Basalt Fiber Reinforced Polymer (BFPR), que tiene muchas ventajas sobre el acero de refuerzo ASTM A615 o ASTM A706 típicamente usado para el refuerzo de hormigón armado.

Las ventajas de las varillas de basalto (BFPR), además de tener alta resistencia a la corrosión, exposición a ácidos y agentes corrosivos, una alta resistencia a la tensión que da como resultado una menor área de refuerzo respecto a el acero, ahorrando costos de transporte y reduciendo el peso de la estructura. Este material se fabrica en forma de barras, espirales, estribos y mallas. Como consecuencia de lo anterior, se hizo necesario para este trabajo de investigación fabricar elementos de concreto armado, utilizando varillas de basalto como material de refuerzo estructural, para evaluar sus características físicas y mecánicas, a fin de poder determinar la viabilidad de este material para ser utilizado en nuestro país.

Este estudio comprobó que las varillas de basalto en el concreto armado pueden ser viables de usar en nuestro país y que estas pueden llegar a ser una sustitución de varillas de acero corrugado bajo ciertas condiciones específicas ya que, al analizar los resultados de los ensayos de compresión, flexión, tensión, y dobleces de barras, tomando en cuenta las normas del Instituto Americano del Concreto (American Concrete Institute, ACI) Sociedad Americana de Materiales y Pruebas (American Society for Testing and Materials, ASTM) y La Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR), se obtuvo información que fue satisfactoria, sin embargo cabe mencionar que su uso está limitado a condiciones estructurales específicas donde no es requerida una condición estructural en el rango dúctil.

Se presentaron datos confiables, los cuales son comparables con estudios realizados en otros países, los cuales han demostrado a través de estudios experimentales la capacidad de elementos de concreto armado con varillas de basalto bajo compresión, flexión y tracción. Cabe mencionar que los usuarios, al usar el basalto como elemento de refuerzo, además de contar con edificaciones seguras, obtendrían una estructura con una vida útil más prolongada debido a la baja degradación del basalto al pasar de los años.

En este estudio, los elementos estructurales tipo columna y viga fueron ensayados a escala debido a las restricciones de los equipos de laboratorio. Estos ensayos fueron realizados en el Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, y en el laboratorio Conlab S.A.

En el capítulo uno se presenta una breve introducción a las propiedades del concreto reforzado. Se describen las fórmulas para determinar los esfuerzos básicos bajo los cuales trabajan estos elementos estructurales, además de una descripción de sus comportamientos mecánicos.

En el capítulo dos, se presenta las especificaciones utilizadas para realizar los ensayos tomando en cuenta las normas ASTM y COGUANOR. También se tomó en consideración el normativo interno del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

El capítulo tres presenta, la realización de especímenes de concreto de elementos tipo viga y columna, pruebas al concreto fresco, ensayos a tensión, adherencia, dobleces de varillas y la comparación de resultados obtenidos,

tanto experimentales como teóricos, verificando el comportamiento mecánico de los elementos.

Para finalizar, en el capítulo cuatro se presenta una interpretación de los resultados, que incluye análisis de los diagramas carga-deflexión, carga última-áreas de acero, y otros análisis que comparan las características mecánicas de los elementos de concreto, reforzados con acero y basalto.

# OBJETIVOS

## General

Comparar las propiedades mecánicas de elementos estructurales tipo columna y viga, utilizando concreto reforzado con varillas de basalto y con varillas de acero corrugado, a fin de comprobar si las varillas de basalto podrían sustituir a las varillas de acero corrugado en elementos reforzados de concreto.

## Específicos

1. Determinar las características mecánicas de las varillas de basalto bajo esfuerzos de tensión y deformación, y comparar los resultados con los de varillas de acero corrugado.
2. Identificar deflexiones, ductilidad y adherencia de elementos estructurales de hormigón reforzados con varillas de basalto y acero.
3. Identificar y reportar las ventajas y desventajas obtenidas al construir el elemento estructural tipo columna y tipo viga de concreto reforzado con varillas de basalto y varillas de acero corrugado.
4. Comparar los resultados obtenidos en los ensayos con resultados reportados en otros estudios y normativas aplicables.

5. Determinar la factibilidad del uso alternativo en la construcción, de las barras de basalto como refuerzo de concreto en los elementos estructurales tipo viga y columna.

# **1. COMPORTAMIENTO Y PROPIEDADES MECANICAS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES TIPO VIGA Y COLUMNA DE CONCRETO REFORZADO**

## **1.1. Conceptos generales del diseño estructural con concreto**

Como afirman McCormac y Brown (2011), “El concreto reforzado es probablemente el material disponible más importante para la construcción” (p.422). Además, a través de la historia, ha estado asociado al uso de acero corrugado gracias a su excelente compatibilidad química, térmica y mecánica, que ha dado como resultado estructuras altamente eficientes.

Durante los últimos años, se han desarrollado en el mercado nuevos materiales que han sido propuestos como refuerzo al concreto, siendo una alternativa diferente. Uno de estos materiales es el basalto en forma de barra, el material que, aunque carece de suficientes normativas y estudios científicos que avalen su uso, podría ser utilizado.

El diseño de una estructura de concreto reforzado, no solo debe tomar en cuenta las resistencias mecánicas de cada uno de los elementos, sino también satisfacer condiciones de servicio del material a través del tiempo tomando consideraciones como el estado límite último, el estado límite de servicio, y el estado de durabilidad, que se razonan para comprobar la funcionalidad estructural de las edificaciones.

Existe en la actualidad distintos métodos de análisis que permiten determinar las acciones internas resultantes de la aplicación de las sollicitaciones exteriores a cada elemento estructural. Algunas de las acciones interiores a determinar son la carga axial, la flexión, torsión y cortante, y las respuestas serían deformación, agrietamiento, durabilidad y vibración.

Para analizar una estructura, es necesario idealizarla, por ejemplo, una idealización en el análisis de edificios es considerar la estructura como formada por series de marcos planos en dos dimensiones, considerando que las propiedades mecánicas de los elementos en cada marco estarán concentradas a lo largo de sus ejes. Esto es sumamente importante ya que es la base para el diseño de los elementos estructurales.

También se debe tomar en cuenta que una acción exterior conduce a una acción interior, por ello es necesario conocer la relación entre fuerza y deformación. Cuando las acciones interiores llegan a cierto valor crítico, estas son independientes de las deformaciones, por lo tanto, en el análisis límite se trata de obtener los valores de las fuerzas exteriores para los cuales la estructura se vuelve un mecanismo inestable. (González, 2005)

La mayor parte de reglamentos o códigos actuales de construcción, establecen disposiciones para el diseño de estructuras basadas en el concepto de estados límite o últimos, como la norma estadounidense ACI318, el Comité euro-internacional del concreto, o los eurocódigos usados en los países de la Unión Europea y en Guatemala a través de AGIES.

## **1.2. Características del concreto**

El concreto es un componente artificial, pétreo obtenido de una aleación en proporciones determinadas de: cemento, agua y agregados, que forman una pasta. Bravo (2019) menciona que, aunque algunos aditivos mejoran las propiedades del concreto, la mayor influencia de su resistencia a la compresión está dada por la relación agua-cemento de la mezcla, la contracción o expansión del material, se debe esencialmente, a cambios en esta relación, a lo largo del tiempo de vida del concreto; la cantidad original de agua en la mezcla y las condiciones del medio ambiente, son los factores que más afectan la expansión, especialmente a edades tempranas.

Entre las propiedades del concreto se encuentra el peso volumétrico, que oscila entre 1.9 y 2.5 toneladas por metro cúbico, dato cuya relevancia radica en que los componentes estructurales de concreto generalmente son voluminosos; otra característica importante es que el concreto simple, sin refuerzo, es resistente a la compresión y débil en tensión y para resistir estos esfuerzos se emplea acero u otro material, generalmente en forma de barras, colocado en zonas estratégicas donde se prevé que se desarrollarán tensiones bajo las condiciones de servicio. El material de refuerzo limita el desarrollo o expansión de las grietas originadas por la poca resistencia a la tensión que posee el concreto.

### **1.2.1. Índices de resistencias**

Cuando el cemento inicia el proceso de hidratación, inicia también el proceso de endurecimiento, hasta ganar resistencias evidentes; la edad normativa para la medición de la resistencia mecánica del concreto es de 28 días, según estándares nacionales e internaciones, sin embargo, este tiempo es

variable a 1, 3, 7, 14, 90 o 360 días, cuando se analiza con fines informativos. Otras variables que también influyen en la resistencia mecánica del concreto son la composición química del cemento, calidad, relación agua-cemento, agregados, temperatura ambiente y curado. (Padilla, 2018)

#### **1.2.1.1. Carga axial**

La resistencia a carga axial o compresión es la principal característica del concreto y la medida más común de desempeño observada en el diseño de estructuras de concreto, es la capacidad para soportar una carga por unidad de área, se expresa en kg/cm<sup>2</sup>, MPa (Megapascales, unidades del sistema internacional) y PSI (libra por pulgada cuadrada, unidades utilizadas en los Estados Unidos de Norteamérica). (McCormac y Brown, 2011)

Para determinar la resistencia a la compresión, se realizan ensayos en una máquina sobre probetas cilíndricas elaboradas a partir de normativas Internacionales como la ASTM C39 o nacionalmente como COGUANOR NTG 41017-h1 que mencionan que se debe utilizar moldes de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura.

Además de esto, la resistencia se calcula tomando en cuenta la carga de ruptura dividida por el área de la sección que resiste la carga. Estos ensayos se realizan para determinar que la mezcla de concreto suministrada cumpla con los requerimientos de la resistencia especificada,  $f'_c$ .

González Cuevas y Fernández-Villegas (2005) explican, además, que se realizan pruebas experimentales para obtener la resistencia a compresión del concreto armado realizando pruebas de carga axial con refuerzo longitudinal y transversal y al compararlo con compresión simple se podrá determinar la

capacidad adicional a compresión con concreto gracias al aporte del acero de refuerzo.

#### **1.2.1.2. Flexión simple**

Como explica Nilson (1995) flexión es el tipo de imperfección que presenta una estructura al aplicar sobre un elemento pares de fuerzas de forma perpendicular a su eje longitudinal, de modo que se induzca el giro de las secciones transversales con respecto a las inmediatas. Además un objeto sometido a flexión presenta una superficie de puntos cuya distancia a lo largo de cualquier curva en ella, no varía con respecto al valor antes de la deformación de fibra neutra.

Algunas de las estructuras que son sometidas a flexión son vigas, columnas o losas que se conducen en una sola dirección, generalmente, la flexión se acompaña de fuerza cortante. Un ensayo de flexión se realiza sobre una probeta, apoyada en los extremos, a una fuerza en su eje perpendicular, es útil para evaluar el comportamiento esfuerzo-deformación y la resistencia a la misma de un material, algunos de los hallazgos esperados serán los puntos máximos y de rotura, así como el módulo elástico en flexión, tomando en cuenta la separación de apoyos en el espesor de la probeta probada.

#### **1.2.1.3. Fuerza cortante**

La fuerza de corte o el esfuerzo cortante, también llamado fuerza de cizalla o de cortadura, es definida como una fuerza interna que actúa en un elemento, como respuesta a una carga tangencial a la superficie sobre la cual tiene contacto.

Hibbeler (2011) adiciona que es la resultante de las tensiones paralelas a la sección transversal de una pieza prismática como una viga o una columna, designado como V, T o Q. Es decir, es la suma de todas las fuerzas externas perpendiculares al eje del elemento estructural que actúan a un lado de la sección considerada. Es positiva cuando la parte situada a la izquierda de la sección tiende a subir con respecto a la parte derecha.

Ecuación 1. Función Q

$$Q = n \times (F_R \times n), \quad F_R = \int_{\Sigma} t \, dS$$

El valor “n”, es un vector unitario a la sección transversal y t es el campo vectorial de tensiones.

Esfuerzo cortante es distinto que tensión cortante. La tensión cortante se representa con la letra griega tau, y es que, en piezas prismáticas, las tensiones cortantes aparecen en caso de aplicación de fuerza cortante o torsión, y el promedio de estas será el esfuerzo cortante. (McCormac y Brown, 2011, p.422)

Además, el diagrama de esfuerzos cortantes de una pieza prismática es una función que representa la distribución de esfuerzos cortantes a lo largo del eje baricéntrico de la misma, será un segmento recto de la pieza, la cual puede ser representada como una sumatoria.

Evidenciado en la siguiente ecuación, de diagrama de esfuerzos cortantes:

Ecuación 2. Función  $Q_y(x)$

$$Q_y(x) = \sum_{i=1}^{k < n} P_i + \int_0^x q(s) ds$$

Donde la suma sobre  $i$  se extiende hasta  $k$  dado por la condición  $x_k < x$ , siendo  $x_i$  el punto de aplicación de la fuerza puntual  $P_i$ . La anterior función será continuada si no existen fuerzas puntuales  $P_i$ , ya que en ese caso el sumatorio se anularía, y al ser una función continua a tramos  $q(s)$  su primitiva es una función continua.

Si en la posición  $x_i$  existe una carga puntual  $P_i$  entonces:

Ecuación 3. Función definición de esfuerzo cortante

$$\lim_{x > x_i} Q_y(x) - \lim_{x < x_i} Q_y(x) = P_i.$$

Y por lo cual, el límite izquierda y derecha no coinciden, entonces la función no es continua.

#### 1.2.1.4. Tracción

Tal como lo explica González (2005), la tracción es el esfuerzo interno al que está sometido un cuerpo por la aplicación de dos fuerzas que actúan en sentido opuesto y tienden a estirarlo. Por lo que si un cuerpo es sometido a tracción sufre estiramientos en ciertas direcciones por efecto de este fenómeno, acompañado de acortamiento en las direcciones transversales.

Así mismo, por ejemplo, si en un prisma mecánico la tracción produce un alargamiento sobre el eje X que produce a su vez una reducción sobre los ejes Y y Z. Esta reducción es proporcional al coeficiente de Poisson el cual puede ser representado en la siguiente fórmula:

Ecuación 4. Reducción proporcional de Poisson

$$\varepsilon = \varepsilon_Z = -\nu \varepsilon_X \quad .$$

Es importante mencionar que en cuerpos sólidos las deformaciones pueden ser permanentes, pues se supera el punto de fluencia comportándose de manera plástica y manteniendo el alargamiento tras la tracción. Si las deformaciones no son permanentes, el cuerpo es elástico.

#### **1.2.1.5. Adherencia**

Como afirman McCormac y Brown (2011), la propiedad de la materia por la cual se unen dos superficies de sustancias iguales o diferentes cuando entran en contacto y se mantienen juntas por fuerzas intermoleculares. También se denomina adherencia a la resistencia que ejerce una superficie cuando un cuerpo trata de deslizarse sobre ella.

Para mejorar la adherencia de las varillas hacia el concreto, los fabricantes añaden corrugas normadas que ayudan a evitar el deslizamiento de un material respecto al otro. En el caso de las varillas de basalto estas también poseen corrugas en su superficie la cual genera fricción al momento de producirse esfuerzos de tensión.

### **1.3. Concreto armado**

El concreto armado también conocido como concreto reforzado, es una combinación de concreto y otro material, generalmente con acero, en la que el refuerzo proporciona al concreto la resistencia a la tensión de la cual carece y, al complementarse, pueden trabajar de una forma eficiente y segura.

A lo largo de la historia, el concreto se ha reforzado con barras de acero de distintas características, motivo por el cual al referirse al concreto armado, la literatura automáticamente habla de concreto reforzado con acero, sin embargo, actualmente existen otros materiales con otras características que poco a poco se han ido incluyendo en el diseño estructural (McCormac y Brown, 2011).

Un ejemplo claro es ACI 440.1R (2005), el cual da la guía para el diseño estructural de concreto con fibras de polímero reforzado. Esta norma, sin embargo, tal como lo explica el capítulo 1, da los lineamientos para el refuerzo de barras de fibra de polímero de aramida (aramid fiber reinforced polymer, AFRP), polímero de fibra de vidrio (glass fiber reinforced polymer, GFRP) y polímero de fibra de carbón (carbon fiber reinforced polymer, CFRP), sin embargo aún, no agrega lineamientos para barras de basalto debido a que es un material bastante más nuevo y con menos experimentación.

Además, el concreto reforzado como material estructural posee grandes ventajas que permiten sea ampliamente utilizado en construcciones de distintos tamaños y formas, es resistente a la compresión por unidad de costo en comparación con muchos otros materiales; posee gran resistencia a las acciones de fuego y agua, las estructuras son muy rígidas y requieren poco mantenimiento, posee una larga vida de servicio comparado con otros materiales y su resistencia no se reduce con el tiempo, puede colarse en una

gran variedad de formas y para su uso se requieren materiales locales a relativo bajo costo, y para su montaje no se requiere mano de obra de alta calificación.

Sin embargo, los puntos débiles del concreto reforzado son que posee una resistencia baja a la tensión, para lo cual requiere el uso de un refuerzo; es necesario esperar hasta que endurezca totalmente y la obra falsa es de un valor elevado, la baja resistencia por unidad de peso de concreto conduce a miembros pesados, por ejemplo, en estructuras de gran claro; la baja resistencia por unidad de volumen implica que los miembros serán grandes; finalmente, las propiedades del concreto varían debido a modificaciones en su proporción y mezclado.

### 1.3.1. Concreto armado y los materiales de refuerzo

El concreto y los materiales de refuerzo funcionan de forma excelente en conjunto, ambos materiales se fusionan adecuadamente y juntos resisten las fuerzas. Se ha estudiado el uso de otros materiales de refuerzo como varillas de basalto o varillas de polímero en sustitución del acero en situaciones específicas. Sin embargo, para que los materiales puedan ser compatibles entre sí, deben tener similar coeficiente de expansión térmica.

Tabla I. **Rangos típicos de CDT de los componentes más comunes de concreto**

Agregado	Coeficiente de dilatación térmica $\mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$
Basalto	6-8
Acero de refuerzo	11-12
Pasta de cemento (saturado)	
w/c= 0.4	18-20
w/c= 0.5	18-20
w/c= 0.6	18-20

Fuente: elaboración propia.

Los materiales se contraen al enfriarse y se dilatan al calentarse, en forma lineal, esto puede llegar a ser un problema en las estructuras de concreto ya que si esta característica no se toma en cuenta al momento del diseño de estos elementos y no se provee suficiente refuerzo que ayude a contrarrestar estos efectos entonces se pueden llegar a producirse agrietamientos. La ecuación de la dilatación lineal se puede representar como:

Ecuación 5. Dilatación lineal de materiales

$$\delta = \alpha \times L \times \Delta T$$

Debido a estos cambios de temperatura para las estructuras reforzadas con acero el ACI318 (2019) en la página 462 establece como cuantía mínima el 0.0018 para elementos no preesforzados, en el caso de las estructuras reforzadas con barras de basalto (BFPR) el código ACI 440.1R (2015), recomienda utilizar la siguiente ecuación:

Ecuación 6. Cuantía mínima en barras de basalto por temperatura

$$\rho_{f, ts} = 0.0018 \times 60,000 \times E_s \div (f_{fu} \times E_f)$$

### 1.3.2. Resistencias de concreto reforzado

Se define resistencia como la capacidad mecánica que tiene un elemento estructural de soportar cargas externas como la compresión, tracción, flexión, corte o torsión, propiedades que son necesarias para el correcto diseño y de una estructura, a continuación de desarrollan las características de las resistencias mencionadas.

### **1.3.2.1. Resistencia a compresión**

La resistencia a la compresión del concreto ( $f'c$ ) se determina por medio de pruebas de cilindros de concreto de 28 días a una velocidad especificada de carga sobre los mismos, esto se basa distintas normas nacionales e internacionales tales como la Norma Coguanor NTG 41017 h1 y la norma ASTM C-39, según ACI (2019).

Para garantizar una adecuada construcción de elementos estructurales se debe asegurar que la resistencia a la compresión del concreto es tan fuerte como el valor especificado ( $f'c$ ), y esto se debe comprobar a través de especímenes que serán ensayados a los 28 días.

Para determinar la carga máxima de un prisma o elemento de concreto con refuerzo longitudinal y estribos transversales se calcula como la sumatoria de la aportación de la resistencia del concreto y la aportación de la resistencia del acero.

Ecuación 7. Carga máxima axial en columnas

$$P_o = 0.80 * 0.85f'c * A_g + A_s * f_y$$

### **1.3.2.2. Resistencia a tracción**

La resistencia del concreto a tensión o tracción varía entre el 8 % al 15 % de su resistencia a su compresión. Durante el diseño estructural “normalmente se desprecia este tipo de resistencia, ya que la provee o satisface el refuerzo de acero o material complementario” (McCormac y Brown, 2011, p.64). La resistencia a la tracción del concreto varía en proporción a la raíz cuadrada de  $f'c$ .

Es complicado medir esta resistencia a tracción bajo cargas axiales directas a tensión debido al problema de agarre en los especímenes de prueba. Normalmente las fallas en columnas de concreto no ocurren por este esfuerzo, ya que las columnas al ser un elemento diseñado para distribuir las cargas de los elementos localizados encima de ellos hacia los elementos de soporte o cimientos tienden a tener mayor concentración de carga axial y momentos que directamente de tracción. Generalmente cuando se habla de tracción en concreto va relacionado a elementos tipo vigas y a los esfuerzos de flexión propiamente que involucran tracción en algunas partes de este.

### **1.3.2.3. Resistencia a flexión**

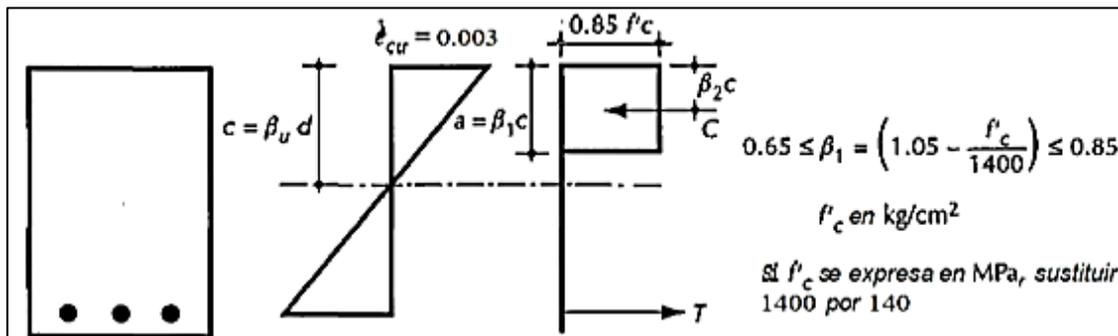
Generalmente, la resistencia a flexión se presenta acompañada de una fuerza cortante en los elementos. Esta resistencia también puede estimarse con suficiente precisión despreciando el efecto de fuerza cortante y manejarse bajo flexión pura.

La flexión es una combinación de esfuerzos de tracción y compresión donde la principal idea es que primero trabaje el concreto su parte a compresión y luego el refuerzo por acero trabaje su parte a tracción idealmente. La filosofía de diseño a flexión considera colocar justamente el refuerzo en el área donde es requerido es decir donde se producen los momentos máximos debidos a las cargas solicitadas.

El reglamento del instituto Americano del Concreto utiliza las hipótesis simplificadoras en las que en lugar de la distribución real de esfuerzos se propone una rectangular con una profundidad igual a  $\beta_1$  veces la del eje neutro. Se acepta que el elemento alcanza su resistencia a una deformación unitaria

máxima útil del concreto en compresión igual a 0.003, con una distribución lineal de deformaciones unitarias.

Figura 1. **Hipótesis ACI 318-14 sobre la distribución de las deformaciones y esfuerzos en la zona de compresión**



Fuente: Gonzales, O. (2005). *Aspectos Fundamentales del Concreto Reforzado*. Consultado el 25 de mayo de 2020. Recuperado de [https://www.academia.edu/31152430/Gonzales\\_Cuevas\\_Aspectos\\_Fundamentales\\_del\\_Concreto\\_Reforzado\\_](https://www.academia.edu/31152430/Gonzales_Cuevas_Aspectos_Fundamentales_del_Concreto_Reforzado_)

Además, se simplifica en las siguientes ecuaciones:

Ecuación 8. Equilibrio compresión- tensión

$$C = T$$

Ecuación 9. Equilibrio de bloque equivalente de esfuerzos

$$b_w * a * 0.85 * f'_c = A_s * f_y$$

Además, el momento nominal de la deducción de la flexión simple:

Ecuación 10. Momento nominal de flexión simple

$$M_n = \phi(C o T) * (d - a/2)$$

Ecuación 11. Momento nominal de flexión

$$M_n = \phi * A_s * f_y(d - 0.59(A_s * f_y / f'_c * b_w))$$

#### 1.3.2.4. Resistencia a corte

La resistencia al corte normalmente se encuentra afectada por otros esfuerzos. McCormac y Brown (2011), indican que, al realizar las pruebas, se han concluido que los valores varían entre un rango de un tercio y cuatro quintos de las resistencias últimas a la compresión. La resistencia al cortante del concreto se realiza con su resistencia nominal del concreto.

Ecuación 12. Resistencia al cortante del concreto

$$V_n = V_c + V_s$$

Donde  $V_n$  es la resistencia al cortante del concreto armado,  $V_c$  al cortante en el concreto y  $V_s$  al cortante en el material de refuerzo, por lo tanto, las variables en las características del concreto, tal como la resistencia a compresión, y características del material de refuerzo utilizado influirán directamente en el resultado.

### **1.3.2.5. Ensayos de adherencia**

El resultado de la adherencia entre el concreto y el acero se basa en curvas tracción de adherencia local-deslizamiento, que se realizan por medio de ensayos normados como el *pull-out*; estos ensayos se refieren al desplazamiento relativo entre el concreto y la barra inmersa que rodea al elemento al proveer una fuerza incremental en su extremo.

Adicionalmente se observan también los mecanismos resistentes que intervienen en el resultado de adherencia: la adhesión química y mecánica; estos a su vez dependen de las características superficiales de la armadura. (Marmolejo, 2014)

En varillas lisas la adherencia está en función de la adhesión química y del rozamiento, mientras que para barras corrugadas depende de la interacción mecánica existente entre las corrugadas y el hormigón que las rodea, es por eso que la mayoría de los reglamentos de construcción durante los últimos años están limitando cada vez más el uso de varillas lisas y requiriendo el uso de varillas corrugadas.

#### **1.3.2.5.1. Ensayo de adherencia tipo *pull-out***

Este ensayo experimental permite obtener el efecto de la relación recubrimiento/diámetro, basado en la capacidad de adherencia de elementos estructurales a analizar. Consiste básicamente en la extracción de una barra de acero o material de refuerzo sustituto, la cual se encuentra inmersa en el concreto, se procede a obtener la fuerza requerida que se debe aplicar para fracturar la adherencia.

#### **1.4. Características del acero como material de refuerzo**

Según el código estadounidense del ACI, se permite utilizar ciertos tipos de acero en la construcción los cuales posean características de ductilidad, resistencia, y adherencia adecuados. Por ejemplo, el código establece que no se debe utilizar barras de refuerzo circulares lisas para la construcción de elementos con concreto reforzado ya que la adherencia inicial era provista por la reacción química y por la fricción mecánica, que a su vez era relativamente débil, entre el acero y el concreto.

Actualmente, el ACI318-19 únicamente permite el uso de aceros ASTM A615 y ASTM706 en grados 40 y 60 para sistemas estructurales especiales o intermedios que requieran detalles con alta ductilidad, esto lo solicita debido a que estos aceros contienen una cantidad más baja de carbono comparados con los grados 75 o 90, y proveen un rango elástico mayor que ayudar a brindar una estructura más dúctil.

##### **1.4.1. Tipos de acero**

La forma más común de acero para reforzar concreto es la varilla que se fabrica de laminado en caliente. Los diámetros de las varillas producidas en Guatemala son de 1/4 de pulgada a 1 1/2 pulgadas. Además la norma Coguanor 36011 regula la prueba de tensión sobre el acero de refuerzo, verificación de las corrugas y la prueba de dobleces de las mismas, también describe el espaciamiento, ángulo y profundidad de las mismas. Es común encontrar en Guatemala, que todas las varillas, con excepción del alambón de 1/4 de pulgada, que generalmente es lisa, que estas tengan corrugas en la superficie, ya que esto mejora su adherencia al concreto.

En la tabla II, se observan las características principales de varillas de refuerzo, así como las medidas para identificarlas. Generalmente, el tipo de acero se caracteriza por el límite o esfuerzo de fluencia, que se aprecia claramente en las curvas esfuerzo-deformación de varillas laminadas en caliente.

Tabla II. **Información de varillas de acero para refuerzo**

Barra Núm.	Diámetro		Peso Kg/m	Área Cm <sup>2</sup>	Perímetro cm
	Pulgadas	mm			
2	¼	6.4	0.248	0.32	1.99
2.5	5/16	7.9	0.388	0.49	2.48
3	3/8	9.5	0.559	0.71	2.98
4	1/2	12.7	0.993	1.27	3.99
5	5/8	15.9	1.552	1.98	5.00
6	3/4	19.0	2.235	2.85	6.00
7	7/8	22.2	3.042	3.88	6.97
8	1	25.4	3.973	5.07	7.98
9	1-1/8	28.6	5.028	6.41	8.99
10	1-1/4	31.8	6.207	7.92	9.99
11	1-3/8	34.9	7.511	9.58	10.96
12	1-1/2	38.1	8.938	11.40	11.97

Fuente: elaboración propia.

#### 1.4.2. **Características del basalto**

Las rocas de basalto son agregados naturales (sistemas homogéneos) que se originan en el planeta en grandes cantidades, están formadas por diversos minerales o mineraloides.

#### 1.4.2.1. Origen y tipos de basalto

Las rocas de basalto son agregados naturales (sistemas homogéneos) que se originan en el planeta en grandes cantidades, están formadas por diversos minerales o mineraloides. Como Tarelo (2016) menciona:

Los minerales y las rocas tienen un origen muy diverso, y según su proceso de formación se dividen en ígneas, sedimentarias y metamórficas. A medida que asciende por la corteza, se va enfriando, dando origen a cristales, estos por ser más pesados que la parte líquida se depositan al fondo. Las rocas ígneas poseen componentes pesados y suelen ser de color oscuro. (p.215)

Estas rocas ígneas (del latín *ignius*, fuego) se originan a partir de un líquido compuesto principalmente por roca fundida, gases disueltos y cristales en suspensión, al que se llama magma, el cual se abre camino hacia arriba, dado que es más liviano que las rocas que lo rodean, y es rico en elementos pesados, que abundan en las capas más internas de la Tierra.

La composición química básica, es decir que tiene entre el 45 % y el 52 % de SiO<sub>2</sub> (sílice), y el 46 % al 85 % de minerales máficos (oscuros) o minerales ferromagnesianos, frecuentemente contiene fenocristales de olivino, augita y plagioclasa. Existen varios tipos de basalto:

- Basaltos de las dorsales medio oceánicas (Mid-ocean ridge basalt, MORB):
  - Basaltos N-MORB: derivados de un manto superior agotado.

- Basaltos E-MORB: menos frecuentes. Proviene de una fuente enriquecida más profunda.
  - Basaltos T-MORB: derivados de la mezcla de los dos tipos de basalto anteriores, durante el ascenso en cámaras poco profundas o al mezclar las fuentes antes de fundirse.
- De islas oceánicas

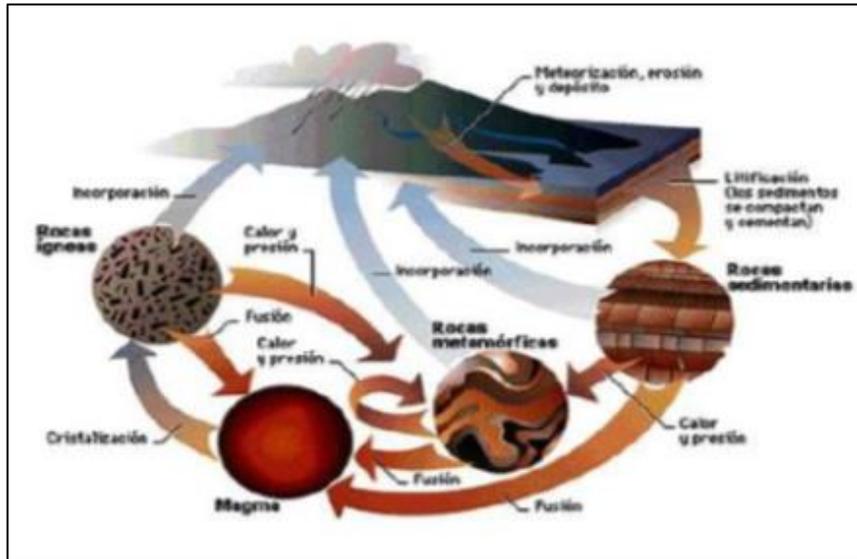
Asociadas a la acción de puntos calientes que generan islas oceánicas s  
manera de estructuras volcánicas sobre la corteza oceánica, como las islas  
galápagos.

- Orogénicos

Típicos en márgenes activos donde existe subducción de litosfera  
oceánica.

Encontrado también en superficies de otros cuerpos del sistema solar.

Figura 2. **Proceso de formación de rocas**



Fuente: Ancochea, Andonaegui, y Claro. (2009). *Atlas de rocas ígneas*. Madrid: departamento de petrología y geoquímica.

Figura 3. **Piedra de basalto**



Fuente: Ancochea, Andonaegui, y Claro. (2009). *Atlas de rocas ígneas*. Madrid: departamento de petrología y geoquímica.

#### 1.4.2.2. Propiedades mecánicas de la fibra de basalto: ventajas y desventajas

El basalto está conocido por su resistencia hacia altas temperaturas, resistencia y durabilidad. La fibra de basalto se extrae de la roca de basalto fundida en diámetros generalmente entre 13 y 20  $\mu\text{m}$ . Los productos de basalto están disponibles en cantidades comerciales de diversas fuentes, incluyendo China y Estados Unidos. Los productos de la fibra de basalto (BFRP) están disponible en formas de barra malla, jaulas, espirales, tela, y microfibra laminar y son útiles como refuerzo de estructuras en hormigón.

Figura 4. Tipos de varillas de basalto



Fuente: Mohsen, Ovitigala, y Ibrahim. (2016). *Shear behavior of basalt fiber reinforced concrete beams with and without basalt FRP stirrups.*

La fibra de basalto es ecológica y ecológicamente inofensiva, y libre de carcinógenos y otros peligros para la salud. En la industria de la construcción, la fibra de basalto puede obtener a un costo considerable menor al carbono, sílice y otras fibras. Las características físicas de la fibra de basalto son: excelente rendimiento térmico (435o F a 1760o F), resistencia a la tracción, resistencia a los álcalis y ácidos, propiedades electromagnéticas superiores, inercia,

resistencia a la corrosión, resistencia a la corrosión radiación y luz UV, y resistencia a la vibración.

Algunas propiedades mecánicas relevantes del basalto son la gravedad específica, el esfuerzo a tensión, el módulo de elasticidad, y el esfuerzo de ruptura, cuyos valores han sido investigados por algunos autores debido al uso escaso de este material y se describen a en la siguiente tabla:

Tabla III. **Propiedades de la fibra de basalto**

Propiedad	Valor
Gravedad específica	2.6
Esfuerzo a tensión	2500 MPa (360 ksi)
Módulo de elasticidad	89 GPa (12,900 ksi)
Esfuerzo de ruptura	3.15 %

Fuente: elaboración propia.

## **1.5. Elemento estructural tipo columna**

Las columnas son los elementos estructurales más importantes en la construcción ya que su función principal es transmitir las cargas de los elementos superiores como vigas y losas hacia los elementos de cimentación.

### **1.5.1. Diseño de columnas**

Las columnas son los elementos estructurales más importantes en la construcción ya que su función principal es transmitir las cargas de los elementos superiores como vigas y losas hacia los elementos de cimentación.

Es necesario determinar las características de cada elemento estructural para la construcción, se debe cumplir de manera óptima los requisitos de

resistencias y comportamiento. También se debe estandarizar los detalles de refuerzo, de manera que facilite las labores de habilitado y colocación, simplificando el control de presupuestos.

Dado que las columnas mayormente trabajan a compresión, flexión y flexo compresión estos son los esfuerzos principales que se revisan para su diseño adecuado, sin embargo, en ciertas ocasiones estas trabajan bajo esfuerzos tensión, aunque esto no es muy frecuente.

### **1.5.2. Comportamiento de una columna reforzada**

El comportamiento principal de este elemento bajo presiones de contacto o aplastamiento no debe exceder de  $0.85f'_c$ , esto con el fin de evitar sobrepasar el esfuerzo máximo a compresión del concreto. Existen diversas formas en las que la columna puede fallar y se analizarán más adelante.

#### **1.5.2.1. Comportamiento a carga axial y momento**

El concreto reforzado bajo cargas, por lo general cargas gravitacionales, siempre genera fisuras, normalmente son de abertura muy mínima, que se encuentre en el rango admisible de las mismas, si no se encuentra expuesto a la intemperie el ancho de fisura deberá estar por debajo de 0.04cm y si lo está, el ancho de fisura deberá ser menor que 0.03cm.

Todas las columnas están supeditadas a cierta flexión y fuerzas axiales, por lo que es necesario diseñarlas para que resistan ambas solitudes. Las fórmulas de carga axial toman en cuenta algún momento porque incluyen el efecto de excentricidades pequeñas con los factores 0.80 y 0.85. Estos valores equivalen aproximadamente a suponer excentricidades reales de  $0.10h$  para

columnas con estribos y  $0.05h$  para columnas zunchadas (McCormac y Brown, 2011).

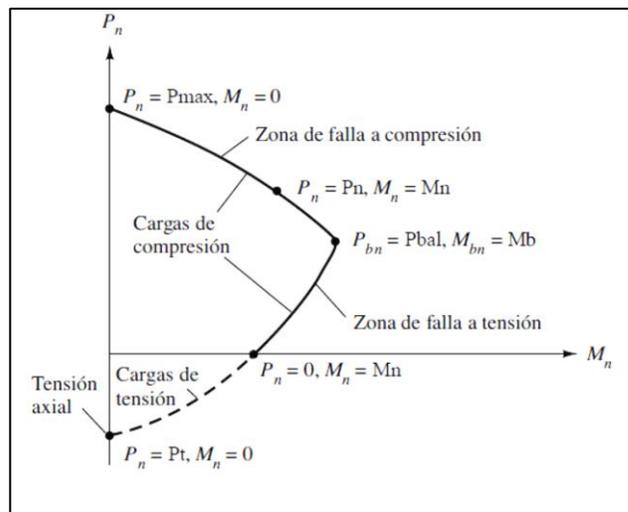
Además, las columnas se flexionarán bajo la acción de los momentos y estos tenderán a producir compresión en un lado de las columnas y tensión en el otro. Según sean las magnitudes relativas de los momentos y las cargas axiales, hay varias formas en que las secciones pueden fallar. Cada uno de los seis casos mostrados se analiza brevemente en los párrafos siguientes. Se supone que la falla de la columna ocurre cuando la deformación unitaria a compresión en el concreto alcanza el valor  $0.003$ .

- Carga axial grande con momento bajo o despreciable: la columna puede fallar cuando la carga axial es excedida por aplastamiento y fallan todas las varillas por fluencia.
- Carga axial grande y momento muy pequeño: La columna puede fallar cuando la carga axial es grande y la excentricidad es pequeña, acá fallara la sección por compresión, y todas las varillas que estén en la zona de compresión fallaran por fluencia.
- Excentricidad mayor que en caso anterior: se desarrollará tensión de uno de los lados de la columna y el acero en este lado a tensión, pero con un resultado menor al esfuerzo por fluencia. El colapso ocurre por aplastamiento de concreto en el lado de compresión. La compresión máxima debe ser de  $0.85f'_c$ .
- Condición de carga balanceada: a medida que aumenta la excentricidad se sella a una condición en la que las varillas de refuerzo alcanzan sus

esfuerzos de fluencia al mismo momento del lado de compresión como de tensión.

- Momento grande y carga axial pequeña: la excentricidad es mayor y el colapso se inicia por fluencia de barras del lado de tensión de columna.
- Momento grande sin carga axial apreciable: la condición de este colapso ocurre como si fuera una viga.

Figura 5. **Ejemplo de diagrama carga axial-momento**



Fuente: McCormac, y Brown. (2011). *Diseño de concreto reforzado*.

## 1.6. Elemento estructural tipo viga

En ingeniería se denomina viga a un elemento estructural lineal que trabaja principalmente a flexión, la longitud predomina sobre las otras dos dimensiones y suele ser horizontal, es un elemento fundamental en la

construcción. A continuación, se describen los comportamientos que posee una viga ante los diferentes esfuerzos.

### **1.6.1. Comportamiento a flexión**

Para las vigas de concreto reforzado suponen un comportamiento elástico en ambos materiales tanto del concreto como del acero, basando en el límite de proporcionalidad, la cual se encuentra en la zona elástica del diagrama esfuerzo-deformación.

El método de diseño dispone calcular el momento  $M_n$ , (momento último nominal) para el cual la columna fallará bien sea por fluencia del acero sometido a tensión o por aplastamiento del concreto sometido a compresión". Se manejan estos dos criterios (fluencia del acero para un esfuerzo igual a  $f_y$  y aplastamiento del concreto para una deformación unitaria de 0.003).

### **1.7. Comportamiento a fuerza cortante**

McCormac y Brown (2011) añade que el concreto reforzado, antes de presentar alguna grieta, se comporta como un material homogéneo en todas las caras y secciones de este. Aunque esta etapa es muy corta, permite comprender el mecanismo de formación de grietas y el fenómeno de tracción o agrietamiento diagonales que presenta.

La resistencia a corte o diseño a corte del elemento estructural de concreto armado o reforzado, se realiza por medio de su resistencia nominal al cortante. Para miembros no preesforzados sin fuerza axial,  $V_c$  debe calcularse por medio de la ecuación del código ACI318S-19, donde la fuerza cortante expresada por la siguiente ecuación:

Ecuación 13. Resistencia nominal de corte  $V_c$  según ACI318-19

$$V_c = 0.53\lambda\sqrt{f'_c}b_wd$$

El  $V_s$  para refuerzo cortante se debe calcular según la ecuación del ACI 318S-19 expresada, como:

Ecuación 14. Resistencia nominal de corte  $V_s$  según ACI318-19

$$V_s = \frac{A_v * f_y * (\text{sen}\alpha + \text{cos}\alpha) * d}{s}$$

### 1.8. Comportamiento a tracción

Como McCormac y Brown (2011) explican que la resistencia a tracción axial de un elemento de concreto reforzado es únicamente la resistencia del acero de refuerzo, ya que el concreto tiende a tener agrietamiento y no contribuye a la resistencia. Debe tenerse en cuenta que la fuerza de tensión que puede aplicarse a un elemento está determinada por el agrietamiento que se genera en el hormigón y no por la resistencia.

Existen situaciones en las cuales el concreto reforzado se utiliza en tensión axial, bajo condiciones en las cuales debe evitarse la ocurrencia de grietas de tensión. Para elementos sometidos a tensión la resistencia nominal, es igual a la siguiente ecuación:

Ecuación 15. Resistencia nominal de tensión

$$P_{nt} = A_s * f_y$$

## **2. ANÁLISIS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES**

En este capítulo se describe el proceso de la fabricación y ensayo de los elementos de concreto armado, así como todas las consideraciones, y normativas utilizadas para el mismo.

### **2.1. Normativas establecidas y ensayos realizados de elementos estructurales tipo viga y columna de concreto reforzado**

A continuación, se describen tanto las normativas establecidas para ensayos de elementos estructurales tipo viga y columna de concreto reforzado, como los ensayos realizados para los elementos de concreto, basalto y acero, estos mismos se basan en normativas nacionales, internacionales y recomendaciones técnicas científicas de comités de la construcción.

#### **2.1.1. Normativas para elementos sometidos a flexión**

Los elementos estructurales tipo viga trabajan principalmente bajo esfuerzos sometidos a flexión y cortante, es por eso que existen normas internacionales como la norma ASTM C-78 (Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la flexión del concreto), o la norma equivalente en Guatemala Coguanor NTG 41017-h2 (método de ensayo para determinar el esfuerzo de flexión del concreto utilizando una viga simplemente soportada con cargas en los tercios de la luz), ambas normas son similares en cuanto a su contenido y estas cubren la determinación del esfuerzo a flexión del concreto utilizando una viga simplemente soportada con cargas puntuales, y la determinación del módulo de ruptura en flexión.

Para hacer estos ensayos a flexión se realizaron varios especímenes de concreto tal como se muestra en la tabla IV. Las cuales fueron reforzadas con diversas áreas de refuerzo tanto de acero como basalto, y se ensayaron para encontrar los módulos de ruptura, deflexiones y cargas máximas de falla.

Tabla IV. **Propiedades de elementos tipo viga por ensayar**

<b>Elemento</b>	<b>Tamaño de Viga</b>	<b>Área de Refuerzo (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Detalle de Refuerzo</b>
Viga VB-1	20cmx30cm	1.57	2 varillas de Basalto 3/8" (10mm)
Viga VB-2	20cmx30cm	2.36	3 varillas de Basalto 3/8" (10mm)
Viga VB-3	20cmx30cm	3.14	4 varillas de Basalto 3/8" (10mm)
Viga VB-4	20cmx30cm	3.93	5 varillas de Basalto 3/8" (10mm)
Viga VB-5	20cmx30cm	4.72	6 varillas de Basalto 3/8" (10mm)
Viga VA-1	20cmx30cm	1.41	2 varillas de Acero 3/8" (9.5mm)
Viga VA-2	20cmx30cm	2.12	3 varillas de Acero 3/8" (9.5mm)
Viga VA-3	20cmx30cm	2.83	4 varillas de Acero 3/8" (9.5mm)
Viga VA-4	20cmx30cm	3.54	5 varillas de Acero 3/8" (9.5mm)
Viga VA-5	20cmx30cm	4.25	6 varillas de Acero 3/8" (9.5mm)

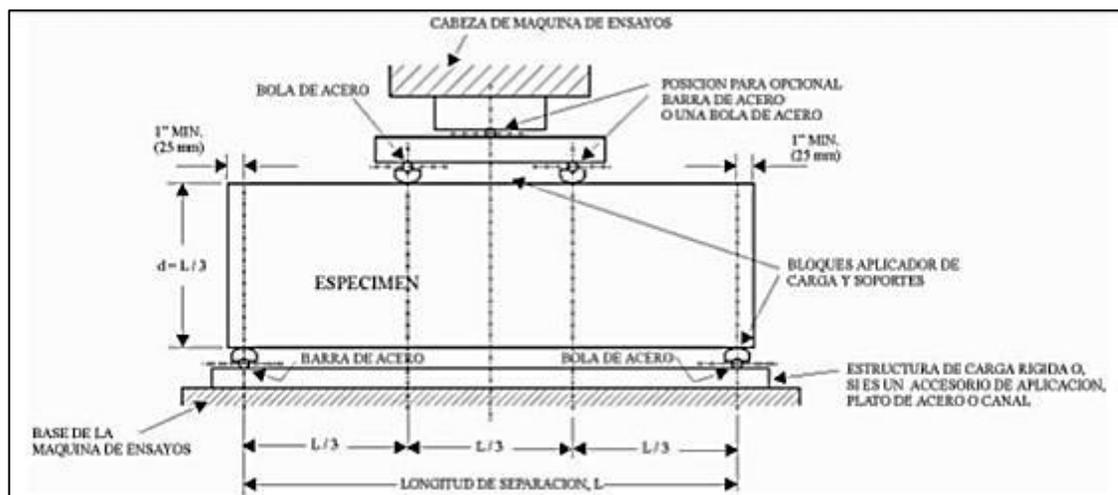
Fuente: elaboración propia.

Los ensayos a corte de estos elementos estructurales tipo viga no están especificados dentro de los alcances de esta investigación, debido a que el esfuerzo de corte de un elemento no está en función de su refuerzo longitudinal, sino de la sección de área gruesa de concreto y refuerzo transversal de estas.

Se ensayarán las vigas de acuerdo con la normativa ASTM C-78 y Coganor NTG 41017-h2, para lo cual se utilizará un aparato del Centro de Investigaciones de Ingeniería que posee apoyos a 90cm y puntos de aplicación de carga a cada 30cm. Todas las vigas fueron curadas con un método de sumersión por 28 días hasta que el concreto alcanzó su resistencia de diseño.

Tal como lo solicita la normativa mencionada, las vigas son fabricadas a una altura de  $L/3$  ósea 30 cm, y se dejaran 5 centímetros de acuerdo con las recomendaciones de la normativa. El ensayo a flexión de las vigas se realizó en el Centro de Investigaciones de la Universidad de San Carlos de Guatemala, y se utilizó un equipo de laboratorio marca Baldwin Microformer modelo MALE No. 811.

Figura 6. **Vista diagramática de un aparato apropiado para ensayo a flexión de concreto**



Fuente: COGUANOR NTG 41017-h2. (2017). *Método de ensayo para determinar el esfuerzo de flexión del concreto (utilizando una viga simplemente soportada con cargas en los tercios de la luz)*. Consultado el 2 de junio de 2020. Recuperado de [https://conred.gob.gt/normas/NRD3/2\\_concreto/NTG\\_41017\\_h2\\_ASTM\\_C78.pdf](https://conred.gob.gt/normas/NRD3/2_concreto/NTG_41017_h2_ASTM_C78.pdf)

Figura 7. **Viga siendo ensayada a flexión de acuerdo con la norma ASTM C-78**



Fuente: Khayat (2014). *Evaluación en campo para la optimización de la mezcla*. Consultado el 2 de junio de 2020. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/264734306>

### **2.1.2. Normativas aplicables para elementos sometidos a carga axial**

Los elementos estructurales tipo columna trabajan principalmente bajo esfuerzos sometidos a compresión axial, y momento unidireccional o bidireccional, para ello, es importante analizar su capacidad a flexión, compresión, y cortante. Para chequear su capacidad a compresión existe el ensayo de resistencia de concreto de la norma ASTM C-39 equivalente a la Coganor NTG 41017 h1.

Se desarrollaron especímenes utilizando concreto 4000 psi sin ningún tipo de aditivo, tal como se detalla en la tabla V, los cuales fueron realizados

utilizando un agregado máximo de 3/8" con características físicas y mecánicas de acuerdo con la norma C33.

Tabla V. **Propiedades elementos tipo columna por ensayar**

<b>Elemento</b>	<b>Tamaño de Columna</b>	<b>Área de Refuerzo (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Detalle de Refuerzo</b>
Columna CB-1	15cmx15cm	3.14	4 varillas de Basalto 3/8" (10mm)
Columna CB-2	15cmx15cm	3.14	4 varillas de Basalto 3/8" (10mm)
Columna CB-3	15cmx15cm	3.14	4 varillas de Basalto 3/8" (10mm)
Columna CA-1	15cmx15cm	2.83	4 varillas de Acero 3/8" (9.5mm)
Columna CA-2	15cmx15cm	2.83	4 varillas de Acero 3/8" (9.5mm)
Columna CA-3	15cmx15cm	2.83	4 varillas de Acero 3/8" (9.5mm)

Fuente: elaboración propia.

La capacidad a corte de un elemento de concreto está determinada por la cantidad de refuerzo en función de la cantidad de refuerzo transversal que este tenga y de la sección de concreto que este posea así como de la resistencia propia del concreto. El refuerzo transversal de estas columnas de concreto fueron posicionados a cada 150mm y estos mejoran la capacidad de carga axial de los elementos al confinar el núcleo de concreto.

Figura 8. **Cilindro de concreto siendo ensayado a compresión de acuerdo con la normativa ASTM C-33**



Fuente: Researchgate. (2013). *Caracterización de concretos*. Consultado el 10 de junio de 2020. Recuperado de <https://www.researchgate.net/figure/Setup-for-testing-of-compressive-strength>

### **2.1.3. Resistencia estructural a tensión de las barras de acero y basalto**

La resistencia del acero estructural se obtuvo basándose en la prueba de tensión descrita en la Norma ASTM E-008 realizada en el Centro de Investigaciones de Ingeniería la cual como objeto tuvo verificar el cumplimiento de la norma ASTM A-706, equivalente a Coguanor NTG 36016, para barras de acero de carbono corrugadas en refuerzo de concreto.

La resistencia a tensión de las barras de basalto se realizó de la misma forma utilizando la metodología descrita en la Norma ASTM E-008 y los procedimientos de la norma ASTM D7205 que habla del método estándar para determinar las propiedades de tensión de una barra de polímero reforzado para

obtener su valor de límite de esfuerzo a tensión, módulo de elasticidad y deformación unitaria.

De acuerdo con la sección 13.2 de la norma ASTM D7205 se obtendrá la deformación unitaria del elemento a tensión tomando en cuenta el desplazamiento del extensómetro en el punto  $i$  dividido dentro de la longitud del extensómetro en el punto  $i$ .

Ecuación 16. Deformación unitaria

$$\epsilon_i = \delta_i / L_g$$

A si mismo se podrá obtener también el esfuerzo último a tensión en la sección 13 de la norma ASTM D7205 siguiendo la siguiente ecuación, donde  $P_{max}$  es la carga máxima que el aparato registró y  $A$  es el área de la varilla.

Ecuación 17. Esfuerzo máxima  $f_{tu}$

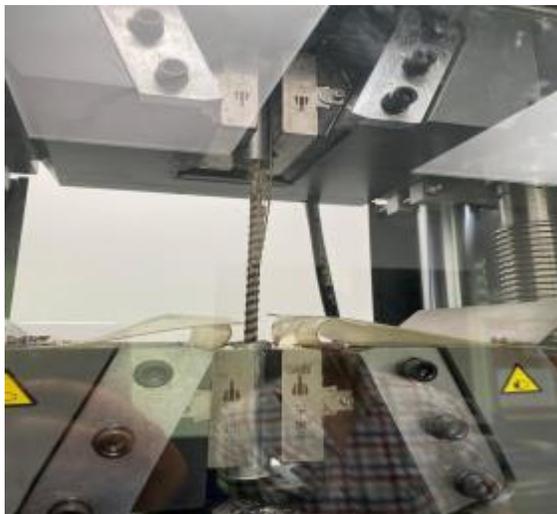
$$f_{tu} = P_{max} / A$$

También esta normativa especifica la ecuación para determinar el módulo de elasticidad del material de refuerzo el cual se obtendrá de la siguiente ecuación, donde  $\Delta\sigma$  es la diferencia aplicada en el esfuerzo de tensión entre el punto inicial y el punto final y  $\Delta\epsilon$  es la diferencia de deformación promedio entre el punto inicial y el punto final entre el rango seleccionado de deformación elástica.

Ecuación 18. Módulo de elasticidad

$$E = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon$$

Figura 9. **Ensayo de ensayos a tensión de acuerdo con la norma ASTM D7205**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

#### **2.1.4. Comportamiento estructural a la prueba de doblez de las barras de refuerzo**

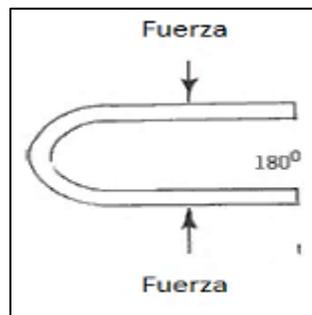
Las pruebas de dobleces se realizarán de acuerdo con la norma E290 en lo cual se evalúa la ductilidad de estos materiales, sin embargo tal como lo especifica la norma esta prueba no prueba el desempeño del servicio o deflexión que se pueda dar en los elementos de concreto. La severidad de esta prueba varía a partir del ángulo de doblez, para este caso se realizará los

dobleces de 180° tanto para las barras de acero como para las barras de basalto.

La norma guatemalteca Coguanor NGO 36 011 en su sección 7.4.4 también menciona la metodología para la realización de dobleces en barras de refuerzo y recomienda el dobléz de 180° para las mismas las cuales fueron aplicadas para estos ensayos.

Cabe mencionar que, aunque es sabido que las barras de basalto con ángulos como estribos son fabricadas a las medidas específicas para este tipo de materiales, y según los fabricantes no se recomienda el dobléz de estas en campo por la fragilidad que caracteriza a estos elementos, igualmente se evaluará para obtener resultados como parte de la investigación.

Figura 10. **Esquema de dobleces de barras 180° de acuerdo con la norma ASTM E290**



Fuente: ASTM E290 (1997). *Método de prueba estándar para pruebas de flexión de material para determinar la ductilidad.*

### 2.1.5. Comportamiento estructural de la prueba de adherencia de las varillas

La adherencia es una característica fundamental que cualquier material de complemento al hormigón debe tener para ser considerado apropiado como refuerzo al concreto armado. Actualmente, el código ACI 318S (2019) en el capítulo 25 indica cuáles son los valores mínimos que se deben considerar para un anclaje correcto y una adherencia adecuada, estos van desde 37 hasta 71 veces el diámetro de la barra según el diámetro, resistencia de concreto y resistencia del acero. Para barras No. 6 o más pequeñas se muestran en la ecuación No. 20 y para barras No 7. o mayores se muestran en la ecuación No. 21

Ecuación 19. Longitud de desarrollo para barras No.6 o menores

$$l_d = ((f_y \times \psi_t \times \psi_e \times \psi_g) \div 2.1 \times \lambda \times \sqrt{f'_c}) \times d_b \quad (\text{S.I})$$

Ecuación 20. Longitud de desarrollo para barras No.7 o mayores

$$l_d = ((f_y \times \psi_t \times \psi_e \times \psi_g) \div 1.7 \times \lambda \times \sqrt{f'_c}) \times d_b \quad (\text{S.I})$$

Para el caso de las barras de basalto la ecuación que se describe en el ACI 440.1R es la siguiente:

Ecuación 21. Longitud de desarrollo para barras de polímeros compuestos

$$l_d = \frac{\alpha \times \frac{f_{fr}}{0.083 \times \sqrt{f'_c}} - 340}{16.6 + \frac{c}{d_b}} d_b \quad (\text{S.I})$$

Donde  $f_{fe}$  se define como:

Ecuación 22. Esfuerzo desarrollado  $f_{fe}$

$$f_{fe} = \frac{0.083 * \sqrt{f'_c}}{\alpha} \left( 13.6 \frac{l_e}{d_b} + \frac{C}{d_b} \times \frac{l_e}{d_b} + 340 \right) \leq f_{fu}$$

### 2.1.5.1. Pruebas de adherencia

Las pruebas de adherencia fueron realizadas utilizando una máquina universal de carga la cual fue monitorizada utilizando una celda de carga integrada de la maquinaria mientras se medían los desplazamientos en el sistema. Se realizó la prueba tanto para el acero como para el basalto para determinar la fuerza de adherencia tal como establece la normativa ASTM D7913 se realizará utilizando la siguiente ecuación:

Ecuación 23. Fuerza de adherencia

$$\tau = F / (Cb * lb)$$

Para las pruebas de adherencia se fabricaron 4 especímenes de concreto de diámetro de 6 pulgadas por 12 pulgadas de alto, de los cuales se dispusieron 2 para las pruebas de acero y 2 para las pruebas de basalto. Estos fueron sujetos a pruebas de tensión (*pull-out*) para verificar la adherencia entre el acero y el concreto. Para obtener un mejor agarre del equipo de tracción a la hora de sujetar la varilla se realizó un encamisado tal como lo recomienda la normativa ASTM D7205 (2006).



### **3. FABRICACION DE ESPECIMENES Y PRESENTACION DE RESULTADOS TEORICOS-EXPERIMENTALES, DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES**

A continuación, se presenta un resumen del proceso de fabricación de los elementos tipo columna y viga realizadas a escala, así como la instalación de armadura, fundición de concreto, y control de calidad en el hormigón la cual se llevó a cabo para asegurar la correcta fabricación de los elementos de concreto mencionados.

#### **3.1. Proceso de fabricación de elementos de concreto reforzado**

En la figura 11 a la 15 se muestra el proceso de preparación de moldes para los especímenes tipo vigas y columnas, además del proceso de fabricación de armadura, centrado y rectificación de medidas de recubrimiento y espaciamiento.

Figura 11. **Preparación de moldes para fundición de vigas y columnas**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

Figura 12. **Realización de armadura de viga VB-04 con armadura de basalto y estribos de acero**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

Figura 13. **Colocación de armadura, centrado y verificación de medidas**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

Figura 14. **Verificación de medidas de recubrimiento de armadura de basalto y acero**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

Figura 15. **Colocación de armadura en formaletas de vigas y columnas**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

En la figura 16 a la 18 se muestra el proceso de la prueba de revenimiento de acuerdo con la norma Coguanor NTG-41052 y prueba de temperatura en el concreto fresco de acuerdo con la norma ASTM C1064, las cuales fueron tomadas para la realización de los elementos estructurales.

Figura 16. **Prueba de revenimiento de acuerdo con norma Coguanor NTG-41052 / ASTM C143**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

Figura 17. **Resultado de revenimiento de acuerdo con la norma Coguanor NTG-41052 / ASTM C143**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

Figura 18. **Prueba de temperatura al concreto fresco de acuerdo con la norma ASTM C1064**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

En la figura 19 y 20 se muestra el proceso de colado o fundición de los elementos estructurales tipo columna y viga, los cuales se realizaron considerando los un concreto de diseño 4000 psi con agregado de 3/8" y revenimiento de 4 pulgadas.

Figura 19. **Fundición de elementos de concreto reforzados con acero ASTM A706 y con basalto**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

Figura 20. **Fundición de elementos de concreto reforzados con acero ASTM A706 y con basalto**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

En las figuras 21 y 22 se muestra el proceso de curado por inundación de los elementos estructurales tipo columna, viga y cilindros de concreto, el cual fue realizado para que los elementos no pierdan humedad y no sufran fisuramiento a los pocos días de su colocación.

Figura 21. **Curado por inundación de elementos de concreto**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

Figura 22. **Curado por inundación de elementos de concreto**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

En la figura 23 se muestra el proceso de fundición de los 4 especímenes cilíndricos de concreto de diámetro de 15 cm y alto de 30cm, de los cuales 2

elementos son fabricados con acero de 9.5 mm corrugado embebido y 2 elementos son fabricados con barras de basalto de 10mm embebido.

Figura 23. **Fotografías de los especímenes realizados para los ensayos de adherencia para barras de acero y basalto**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

### **3.2. Resultados teóricos-experimentales**

Se realizaron ensayos en las columnas a compresión, en las vigas a flexión, en los especímenes cilíndricos de concreto de adherencia y en las varillas de basalto y acero de tensión y dobleces a 180 grados, los cuales serán presentados a continuación:

#### **3.2.1. Ensayos a compresión**

Se encontró variación en cuanto al área de refuerzo ya que el diámetro nominal de las barras de basalto es ligeramente mayor a las de acero, en un

10 %. Los 6 especímenes tipo columna analizados eran de dimensiones similares y se utilizaron 4 varillas de diámetro 3/8, tanto de acero como basalto. Las varillas de basalto fueron provistas por la empresa estadounidense llamada *Smarter Building Systems*, y el acero fue obtenido de una empresa guatemalteca llamada Aceros de Guatemala bajo la norma ASTM A706.

### 3.2.1.1. Resistencias de las columnas ensayadas

Se obtuvieron los datos de carga axial máxima o carga de ruptura teórica, utilizando a la ecuación 7 del numeral 1.3.2.1 de este documento. Esta ecuación fue aplicable tanto para columnas reforzadas con acero como para columnas reforzadas de basalto.

Tabla VI. **Resultados de pruebas a compresión de especímenes tipo columna reforzados con acero**

Elemento	$f'_c$ kg/cm <sup>2</sup> -	Área de refuerzo cm <sup>2</sup>	$f_y$ acero - kg/cm <sup>2</sup> -	Área de columna en cm <sup>2</sup>	Carga máxima Kg	Resistencia a compresión kg/cm <sup>2</sup>	Cálculo teórico para determinación de carga axial kg	Diferencia
CA-01	280	2.83	4,280	237.15	52,749	222.2765	52,851	100 %
CA-02	280	2.83	4,280	257.60	50,454	196.00	56,745	89 %
CA-03	280	2.83	4,280	251.20	63,710	253.00	55,526	115 %

Fuente: elaboración propia.

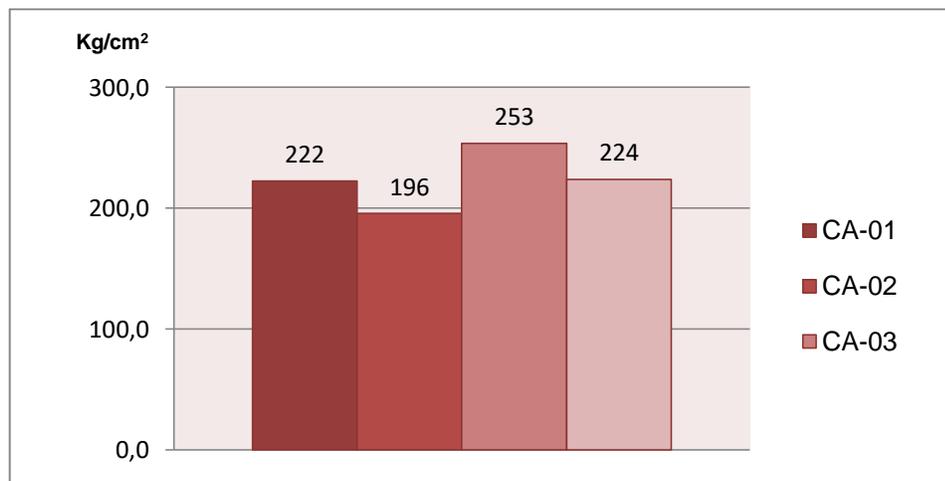
Tabla VII. **Resultados de pruebas a compresión de especímenes tipo columna reforzados con basalto**

Elemento	$f'_c$ kg/cm <sup>2</sup>	Área de refuerzo cm <sup>2</sup>	$f_{fu}$ - basalto promedio en kg/cm <sup>2</sup>	Área de columna en mm <sup>2</sup>	Carga máxima Kg	Resistencia a compresión kg/cm <sup>2</sup>	Cálculo teórico para determinación de carga axial kg	Diferencia
CB-01	280	3.14	5,577	237.2	52,412.6	221	56,464	93 %
CB-02	280	3.14	5,577	247.3	63,221.4	255	58,404	108 %
CB-03	280	3.14	5,577	235.4	61,385.9	261	56,134	109 %

Fuente: elaboración propia.

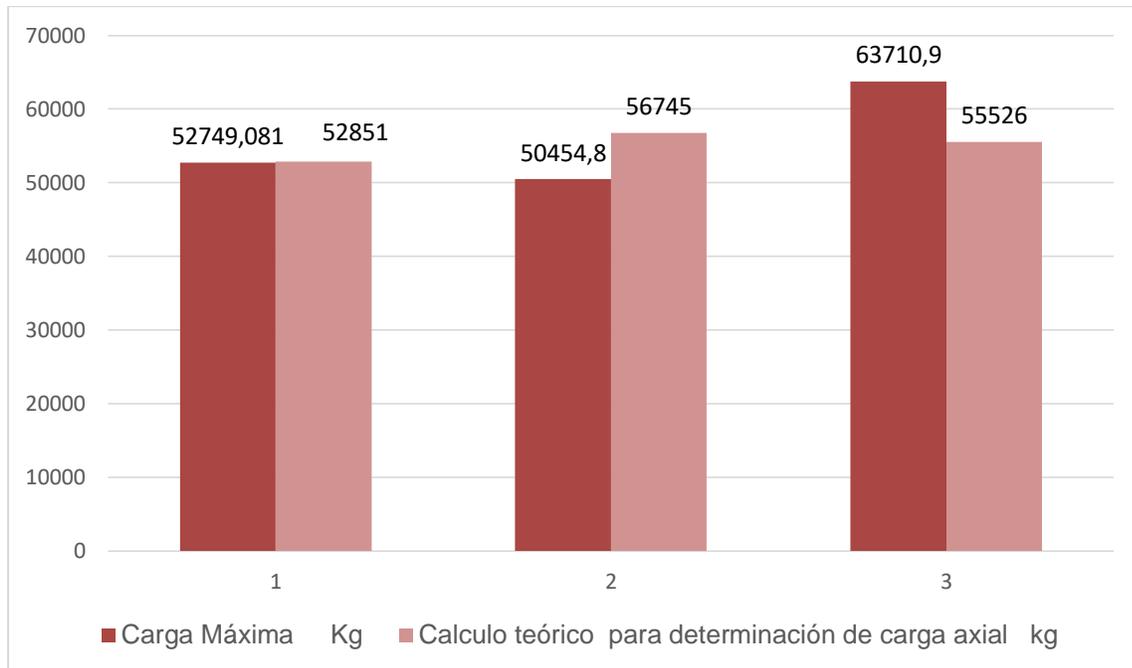
En la figura 24 se muestra los diagramas comparativos entre las resistencias obtenidas para elementos de concreto reforzado con acero y su promedio y en la figura 25 se puede observar estos resultados comparándolos con su cálculo teórico.

Figura 24. **Diagrama comparativo entre las resistencias de compresión de columnas reforzadas con varillas de acero**



Fuente: elaboración propia.

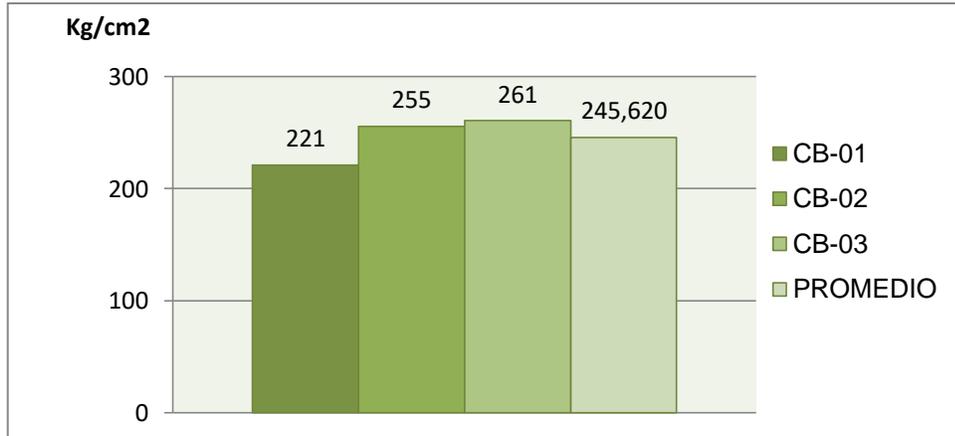
Figura 25. **Diagrama comparativo entre las resistencias de compresión de columnas reforzadas con varillas de acero y cálculo teórico**



Fuente: elaboración propia.

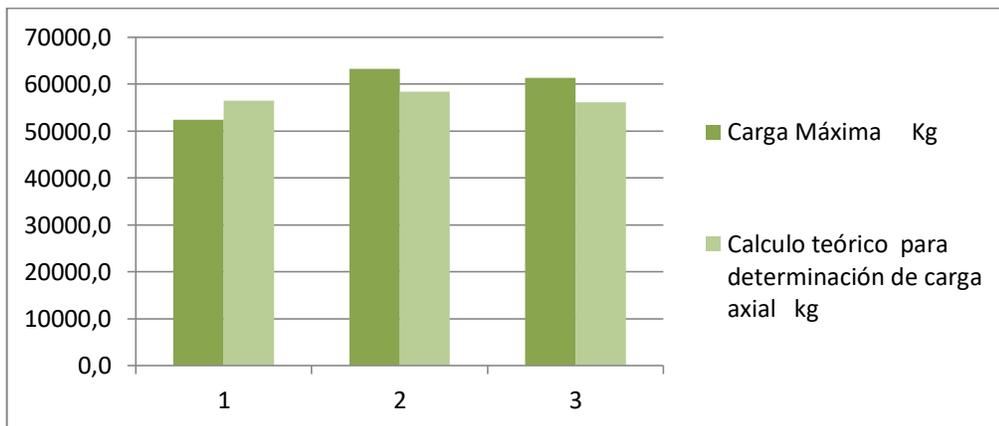
En la figura 26 se muestra los diagramas comparativos entre las resistencias obtenidas para elementos de concreto reforzado con basalto y su promedio y en la figura 27 se puede observar estos resultados comparándolos con su cálculo teórico.

Figura 26. **Diagrama comparativo entre las resistencias de compresión de columnas reforzadas con varillas de basalto**



Fuente: elaboración propia.

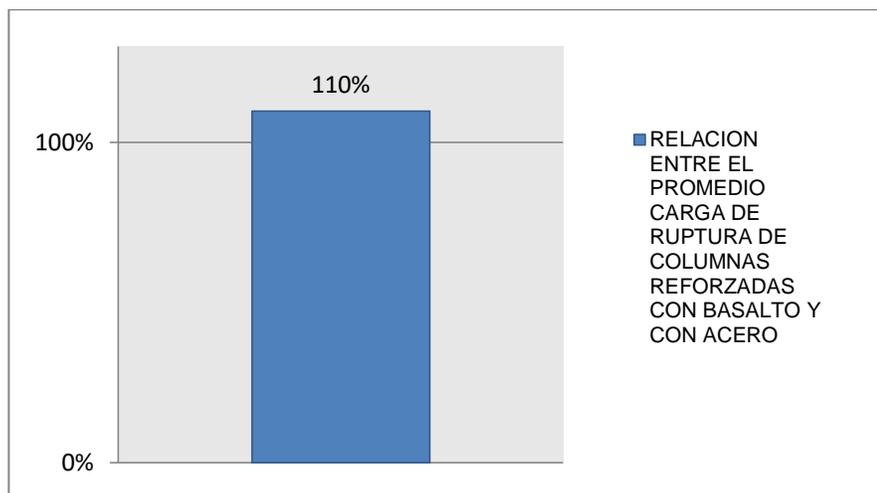
Figura 27. **Diagrama comparativo entre las resistencias de compresión de columnas reforzadas con varillas de basalto y cálculo teórico**



Fuente: elaboración propia.

Por último, en la figura 28 se muestra un diagrama que comprara la resistencia de elementos de concreto reforzados con basalto vs elementos de concreto reforzados con acero, en el cual se muestra el porcentaje adicional que resisten los elementos reforzados con basalto respecto a los reforzados con acero.

Figura 28. **Diagrama comparativo entre la relación porcentual de la carga de ruptura de columnas reforzadas con basalto vs. columnas reforzadas con acero**



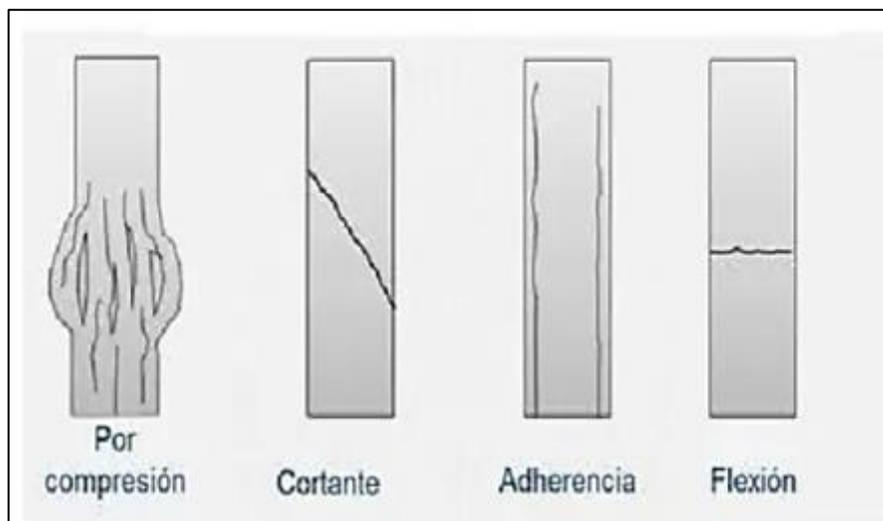
Fuente: elaboración propia.

### 3.2.1.2. Fallas de los elementos tipo columna

Es interesante observar el comportamiento y el tipo de fallas que se observaron en las columnas reforzadas con acero y con basalto. Al ver la forma como los elementos fallan, se pueden obtener conclusiones importantes en el análisis de estos especímenes.

En la figura 29 se puede observar las fallas típicas por compresión en las columnas reforzadas. Como se puede observar ver las fallas típicas en elementos sujetos a compresión son las siguientes: compresión, cortante, adherencia y flexión.

Figura 29. **Fallas típicas por compresión en columnas reforzadas**



Fuente: Obras. (2017). *Tipos de fallas de columnas*, centro de prevención de desastres.  
Recuperado de <https://obras.expansion.mx/construccion/2017/09/21/>

Durante los ensayos de los especímenes tipo columna reforzada en basalto se puede observar que varios elementos fallan presentando una falla típica por adherencia (figura 30). La razón de este tipo de fallas es que el basalto es un material anisotrópico a diferencia del acero, y se pudo observar que tiene una menor resistencia al corte que a la tensión de estos.

Todas las columnas fueron construidas utilizando la misma configuración de estribos, (estribos de acero No. 3 @150mm), sin embargo, tal como lo muestra la figura 31, al presentar cargas de compresión muy elevadas algunas

de las barras de basalto fueron cortadas por el estribo de acero, mientras que en el caso de las barras de acero estas se van deformando hasta conseguir una falla menos súbita por la plastificación de este último material.

Figura 30. **Fotografías de fallas de columnas reforzadas con basalto durante prueba de compresión**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

Figura 31. **Fotografías de corte en varilla de basalto**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

Además, se pudo observar también que los especímenes tipo columna reforzados con acero presenta un tipo de falla por compresión (Figura 32) donde el concreto se va expandiendo poco a poco hasta fallar por cedencia de los estribos de confinamiento.

Figura 32. **Fotografías de fallas de columnas reforzadas con acero durante prueba de compresión**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

### **3.2.2. Ensayos a tensión**

Tal como se mencionó en el capítulo anterior se realizaron pruebas de tensión en varillas de diámetro 3/8 tanto de acero como basalto. Por disponibilidad de un equipo se realizaron las pruebas en el laboratorio guatemalteco CONLAB S.A. quien proporcionó los resultados de estas varillas que se computaron más adelante. Estas pruebas se realizaron siguiendo la norma ASTM A706 para el acero y la norma ASTM D7205, a continuación, se muestran los resultados obtenidos.

### 3.2.2.1. Resistencias de elementos a tensión

El comportamiento mecánico del acero tiene una zona plástica extensa que permite desarrollar gran capacidad después de la fluencia y permite que se puedan alcanzar una gran ductilidad después de entrar a la zona plástica.

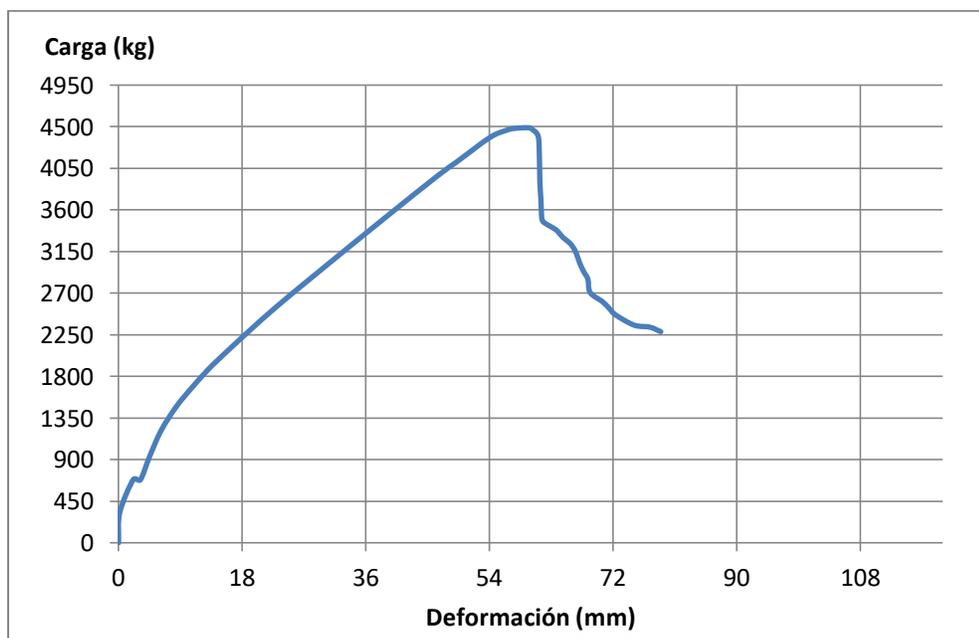
Tabla VIII. Resultados de ensayos a tensión en varillas de basalto

Deformación (mm)	Carga (kg)	Deformación (mm)	Carga (kg)
0.00	0.00	61.28	4,163.40
0.18	327.10	61.35	3,902.45
2.15	683.44	61.49	3,718.30
3.18	680.17	61.61	3,516.46
4.51	930.79	61.80	3,475.07
6.18	1,211.61	62.46	3,439.85
8.39	1,470.64	63.42	3,398.80
10.71	1,679.65	63.96	3,366.91
13.01	1,870.60	64.68	3,304.41
14.44	1,974.78	65.63	3,246.98
16.00	2,084.53	66.17	3,197.73
19.09	2,295.39	66.64	3,132.71
23.04	2,556.05	67.15	3,024.47
28.75	2,907.65	67.75	2,930.39
38.08	3,472.23	68.34	2,850.44
46.57	3,975.58	68.67	2,706.41
49.17	4,115.62	70.51	2,605.17
54.10	4,385.18	71.45	2,534.43
56.55	4,463.30	72.39	2,463.76
57.70	4,482.50	75.07	2,353.76
59.59	4,488.92	77.35	2,332.08
60.26	4,470.35	78.95	2,283.17
61.11	4,393.32		

Fuente: elaboración propia.

El basalto por el contrario tiene una zona elástica más pronunciada con una zona plástica más reducida lo que se traduce a elementos menos dúctiles. En la tabla VIII se pueden mostrar los resultados del ensayo a tensión en varillas de basalto.

Figura 33. **Diagrama carga vs. deformación para varillas de basalto**



Fuente: elaboración propia.

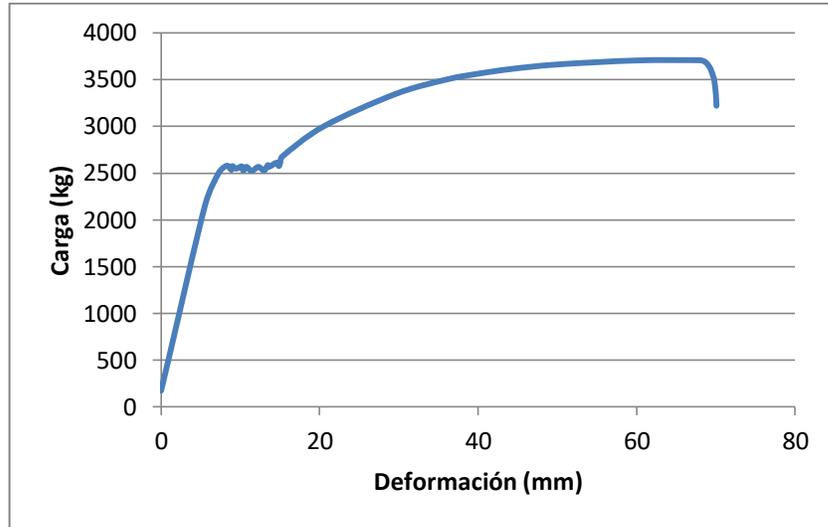
Como se observa en la gráfica anterior, el comportamiento de las varillas de basalto se produce más en el rango elástico presentando una reducida zona plástica. Esto da como resultado elementos que desarrollan menos ductilidad y deben ser diseñados más en el rango elástico. Lo anterior es importante ya que estos elementos de refuerzo no deben ser recomendados para ser utilizados en elementos como marcos estructurales dúctiles, vigas que requieran disipación de energía a través de rótulas plásticas o elementos que sean diseñados para disipar energía a través de la ductilidad.

Tabla IX. **Resultados de ensayos a tensión en varillas de acero**

<b>Ensayo a tensión de varillas de acero</b>			
Def. (mm)	Carga (kg)	Def (mm)	Carga (kg)
0	174.041405	15.0341226	2,612.76964
0.9122351	500.308962	15.3113065	2,679.61645
5.5547316	2,160.73178	20.5476684	3,001.85377
7.2664745	2,501.54481	29.580641	3,346.61127
8.2957054	2,579.67785	36.0608904	3,502.16274
8.8557054	2,535.77001	40	3,563.25666
8.9802424	2,575.77001	44.2291524	3,614.56995
9.4744991	2,548.44413	50	3,662.23178
10.1837223	2,573.17818	60	3,705.31873
10.3703192	2,526.72064	67.9727815	3,707.13951
10.7663437	2,567.90475	68.502527	3,697.13951
11.2948789	2,528.24717	68.9198319	3,667.60135
11.6483187	2,532.90998	69.3371049	3,612.54384
12.2882116	2,567.56876	69.6669098	3,534.01907
13	2,528.24717	69.7880464	3,502.16274
13.45	2,585.577	70	3,344.9414
13.6409723	2,567.86876	70.0726839	3,220.69927
14.585	2,612.76964	70.1523161	297.107207
14.85055	2,575.577		

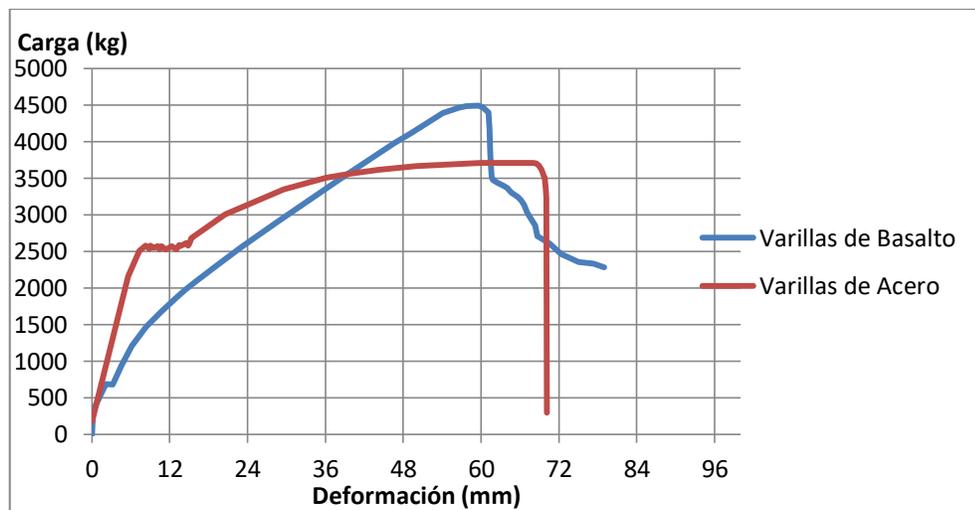
Fuente: elaboración propia.

Figura 34. Diagrama carga vs. deformación para varillas de acero



Fuente: elaboración propia.

Figura 35. Diagrama carga vs. deformación para varillas de basalto y varillas de acero



Fuente: elaboración propia.

### **3.3. Ensayos a flexión**

Se realizaron ensayos a flexión, utilizando 5 vigas reforzadas con 2, 3, 4, 5, y 6 varillas de 3/8" tanto de acero como basalto, para ver su comportamiento mecánico y medir las deflexiones de cada elemento. Todas las vigas fueron reforzadas con estribos de acero de 3/8" a cada 150mm.

#### **3.3.1. Resistencias de las vigas ensayadas**

Se obtuvieron los datos de carga de ruptura máxima que resistieron los elementos a flexión, además con esta información se calculó su módulo de ruptura y momento máximo a la ruptura aplicando las ecuaciones de ACI 318-19 (ecuación 10) para el concreto reforzado con acero y las ecuaciones del ACI 404.1R sección 7.2.2a para el cálculo teórico de la resistencia del basalto.

Tomar en cuenta que el ACI 404.1R es una guía que regula el diseño de concreto reforzado con fibras de polímero aun no incorpora el basalto específicamente en su código, si puede ser una recomendación bastante acertada para utilizarse para el diseño de los elementos con basalto.

En la tabla X se encuentra el resumen de los elementos tipo viga ensayados con varillas de basalto. Todos los elementos ensayados estuvieron muy cercanos a su cálculo teórico a excepción de las últimas 2 vigas, sin embargo, se observó que el tipo de falla presentado no fue por tensión, sino por adherencia.

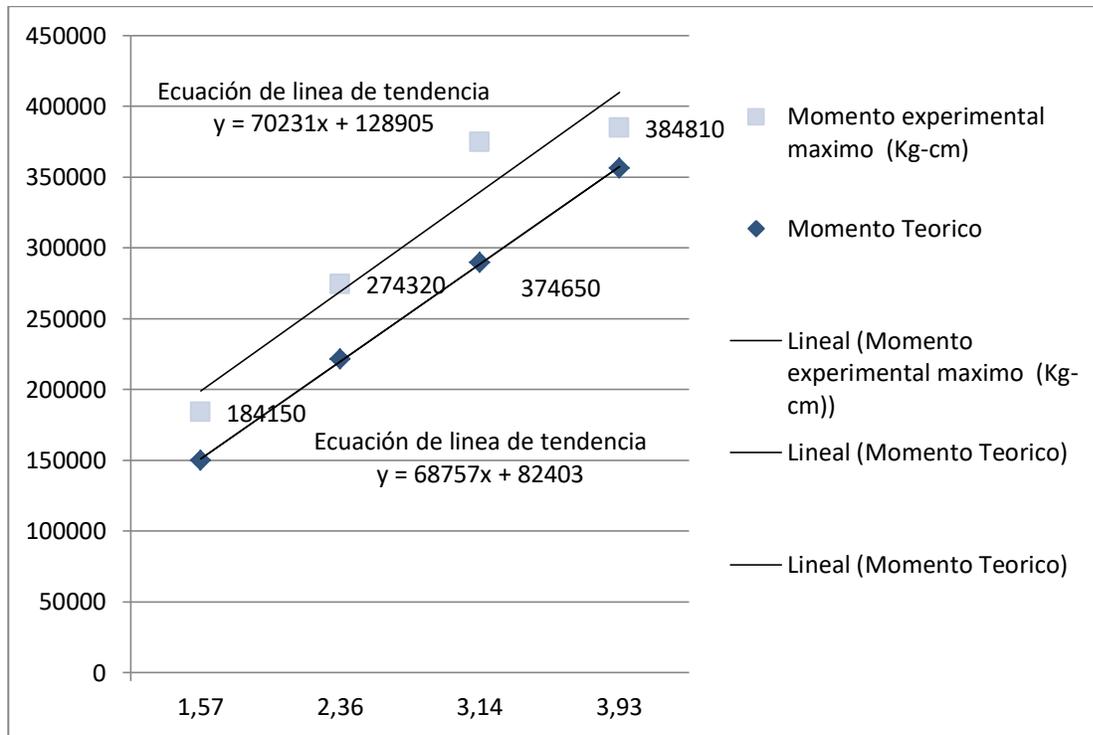
Tabla X. **Resultados de ensayos a flexión en elementos de concreto reforzados con basalto**

Elemento	Área de refuerzo (cm <sup>2</sup> )	ffu-basalto promedio en kg /cm <sup>2</sup>	Carga de grieta inicial (kg)	Carga de ruptura (Kg)	Momento experimental máximo (Kg-cm)	Momento teórico (Kg-cm)	Relación Momento experimental - teórico /Momento de Ruptura
VB-01	1.57	5,577	9,500	14,500	184,150	149,818	1.23
VB-02	2.36	5,577	9,800	21,600	274,320	221,434	1.24
VB-03	3.14	5,577	10,000	29,500	374,650	289,667	1.3
VB-04	3.93	5,577	9,000	30,300	384,810	356,266	1.09
VB-05	4.72	5,577	11,000	27,500	349,250	420,340	0.84

Fuente: elaboración propia.

En la figura 36 se realizó la comparativa lineal interpolando los datos de los resultados y se obtuvo la línea de tendencia en la cual se observa el comportamiento similar a la que sugiere el ACI440.1r. Este diagrama cabe mencionar que se eliminó la viga VB-05 ya que la falla fue por adherencia y no por flexión. Adicionalmente, estas gráficas incluyen las ecuaciones de las líneas de tendencia.

Figura 36. **Diagrama de comparación entre momentos experimentales y teóricos según ACI440.1R para elementos reforzados con basalto**



Fuente: elaboración propia.

En la tabla XI se encuentra el resumen de los elementos tipo viga ensayados con varillas de acero. Todos los elementos ensayados estuvieron muy cercanos a su cálculo teórico. Los datos que aparecen en esta tabla son: área de refuerzo en (cm<sup>2</sup>), límite de fluencia, momento teórico y experimental, así como la relación porcentual entre estos últimos.

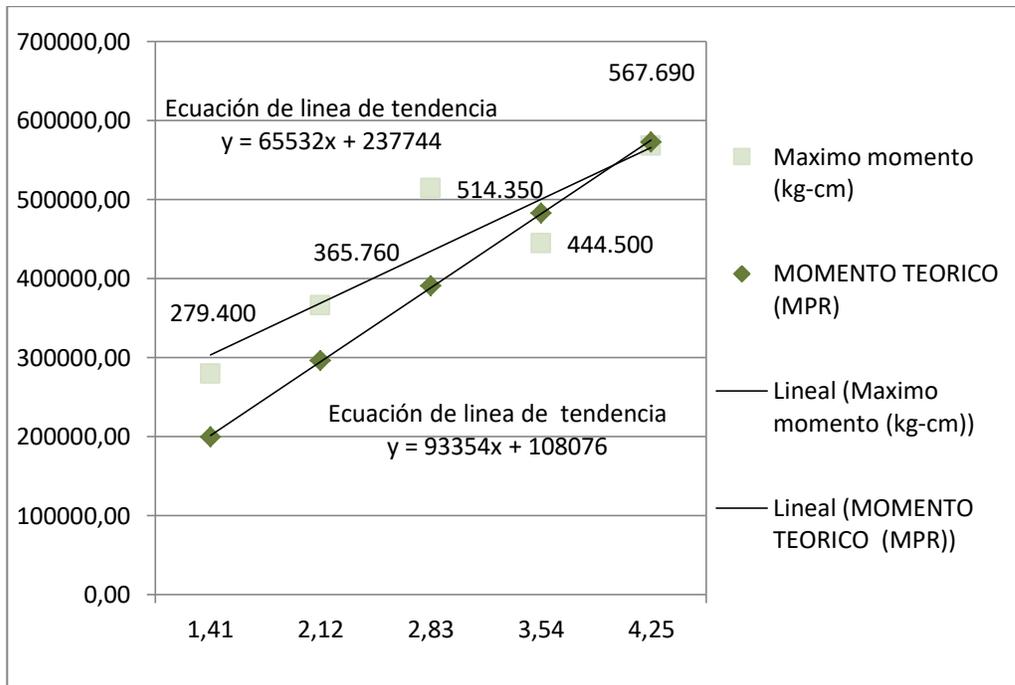
Tabla XI. **Resultados de ensayos a flexión en elementos de concreto reforzados con acero**

Elemento	Área de refuerzo (cm <sup>2</sup> )	Límite de fluencia fy (kg/cm <sup>2</sup> )	Carga donde apareció la grieta inicial (kg)	Carga de ruptura (kg)	Máximo momento (kg-cm)	Momento teórico MPR (kg-cm)	Relación Momento experimental -teórico /Momento de ruptura
VA-01	1.41	4,280.00	12,500.00	22,000.00	279,400.00	199,120.33	1.41
VA-02	2.12	4,280.00	12,500.00	28,800.00	365,760.00	295,938.60	1.24
VA-03	2.83	4,280.00	13,600.00	40,500.00	514,350.00	390,447.38	1.32
VA-04	3.54	4,280.00	19,000.00	35,000.00	444,500.00	482,646.66	0.93
VA-05	4.25	4,280.00	18,000.00	44,700.00	567,690.00	572,536.44	1.00

Fuente: elaboración propia.

En la figura 37 se encuentra la comparación entre los momentos de ruptura y máximo probable o momentos MPR de acuerdo con la estimación teórica del ACI318-19 Todos los elementos ensayados estuvieron muy cercanos a su cálculo teórico.

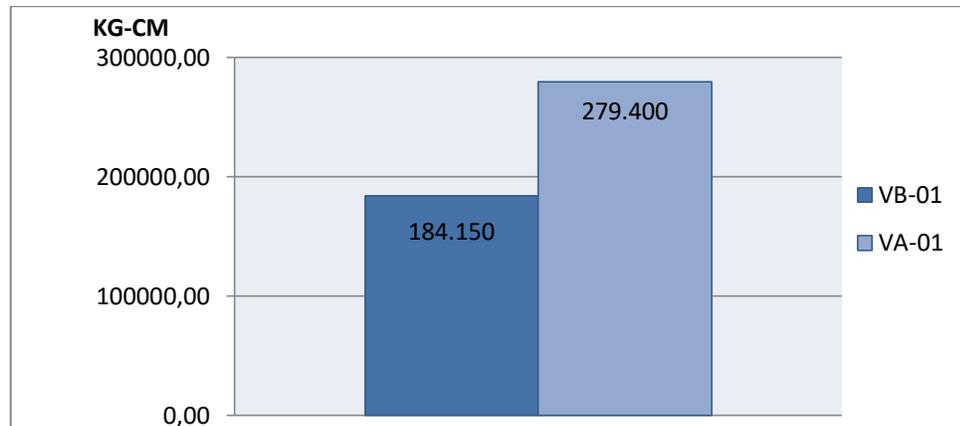
Figura 37. **Diagrama de comparación entre momentos de ruptura y momentos teóricos (MPR) para elementos reforzados con acero**



Fuente: elaboración propia.

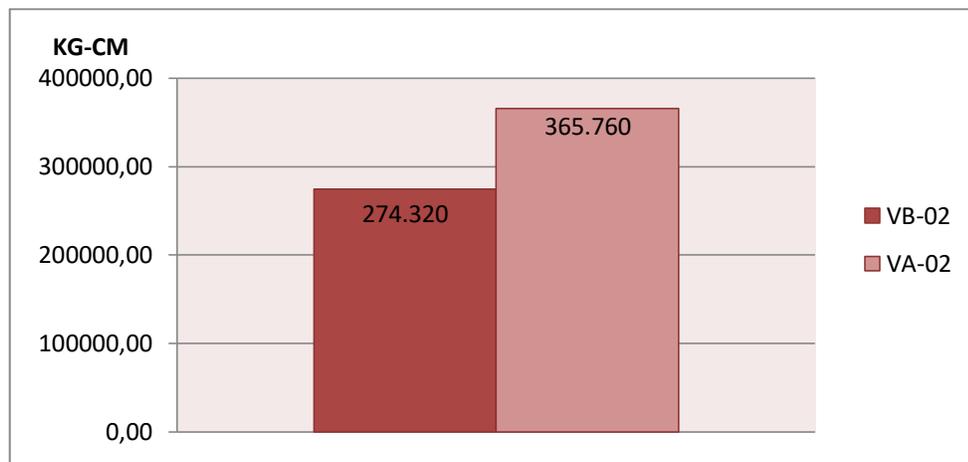
En las figuras de la 38 a la 42, que se muestran a continuación, se compararon los momentos de ruptura entre elementos reforzados con acero y elementos reforzados con basalto. Cada una de estas gráficas de barras, muestra los valores a los cuales se produjo la ruptura de cada elemento.

Figura 38. **Diagrama de comparación entre momentos de ruptura para elementos reforzados con acero y basalto en vigas VB-01 y VA-01**



Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Diagrama de comparación entre momentos de ruptura para elementos reforzados con acero y basalto en vigas VB-02 y VA-02**



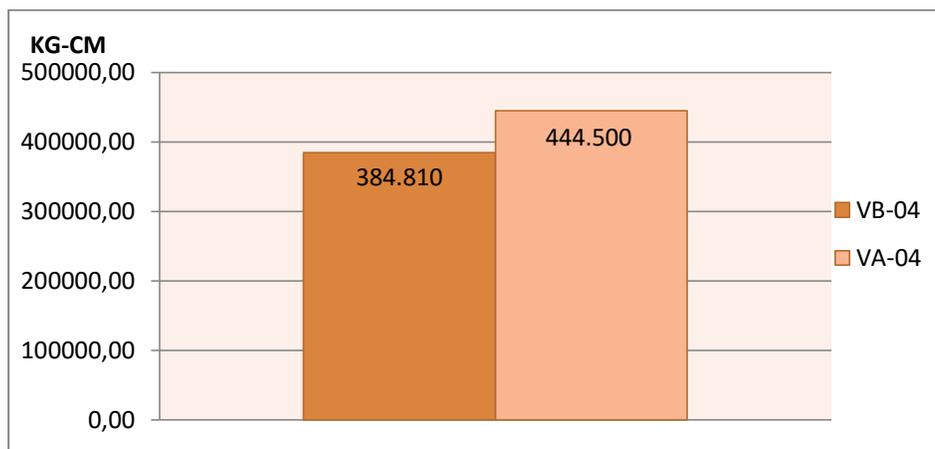
Fuente: elaboración propia.

Figura 40. **Diagrama de comparación entre momentos de ruptura para elementos reforzados con acero y basalto en vigas VB-03 y VA-03**



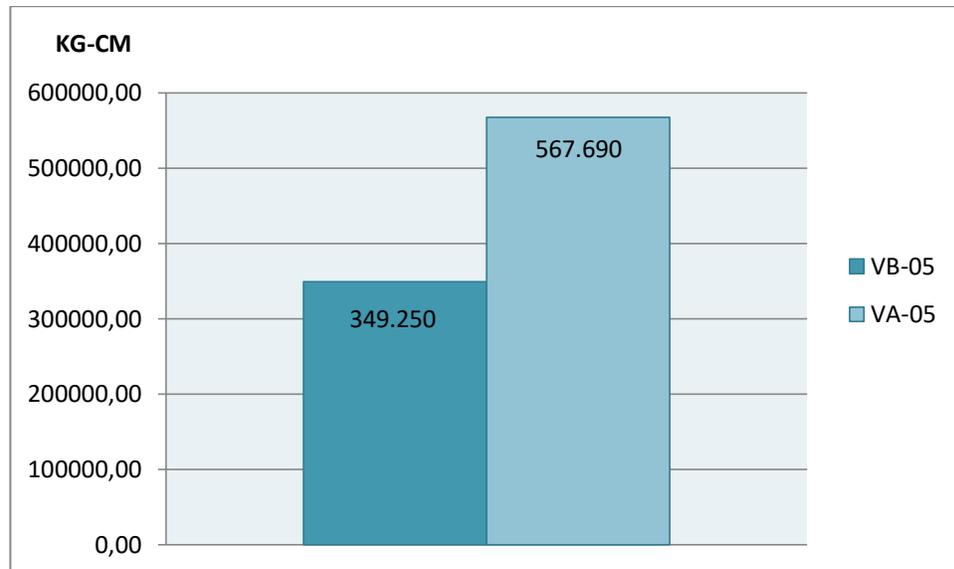
Fuente: elaboración propia.

Figura 41. **Diagrama de comparación entre momentos de ruptura para elementos reforzados con acero y basalto en vigas VB-04 y VA-04**



Fuente: elaboración propia

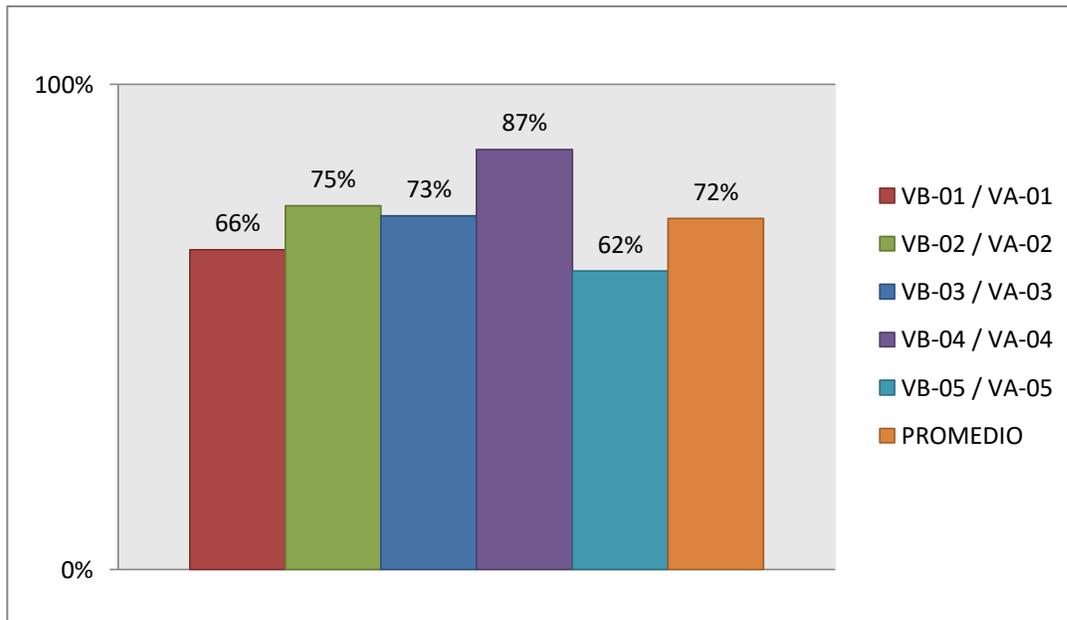
Figura 42. **Diagrama de comparación entre momentos de ruptura para elementos reforzados con acero y basalto en vigas VB-05 y VA-05**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 43 se compararon los momentos de ruptura de elementos de concreto tipo viga reforzados con acero y con basalto, y se pudo observar la capacidad adicional que desarrollan las vigas de acero respecto a las de basalto. El acero al contar con un límite plástico más extenso le provee más ductilidad y más resistencia a flexión a las vigas reforzadas con basalto.

Figura 43. **Diagrama de relación porcentual entre momento de ruptura de vigas reforzadas con basalto y acero**

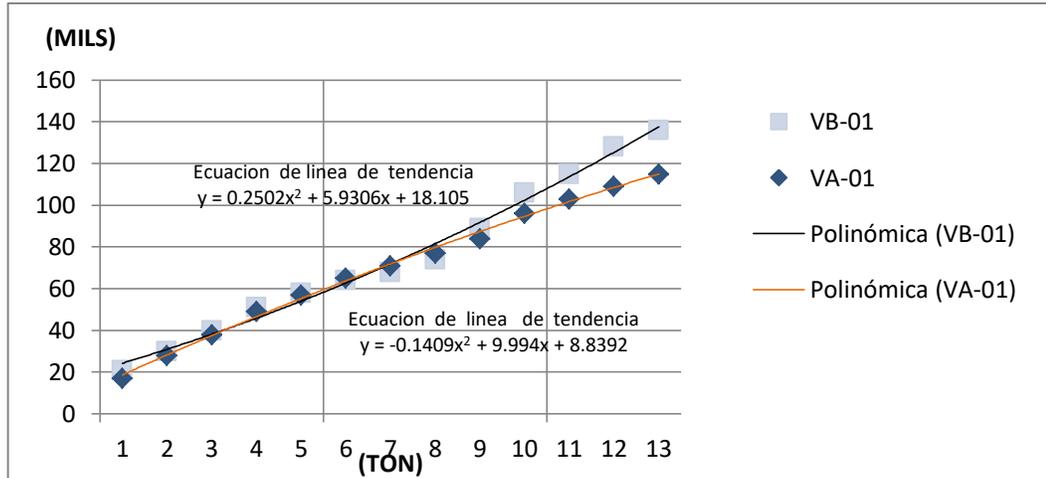


Fuente: elaboración propia.

### 3.3.2. Deflexiones en vigas ensayadas

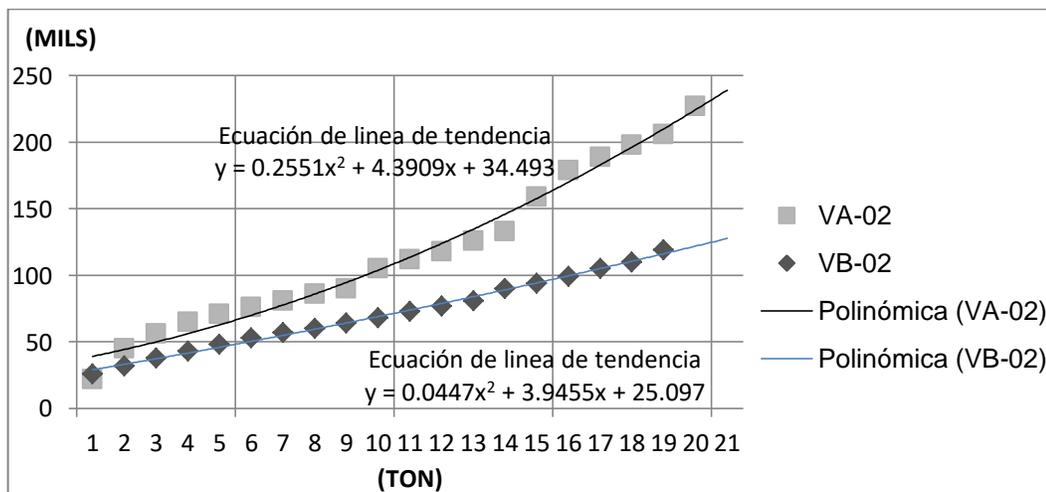
En las pruebas de flexión que se desarrollaron en el Centro de Investigaciones de la Universidad de San Carlos de Guatemala, también se realizó una medición de deflexiones utilizando su deformímetro análogo, en el cual se obtuvieron y reportaron los valores obtenidos. Estos valores se computaron para comparar estas deflexiones entre sí y obtener conclusiones sobre las deflexiones en vigas reforzadas con acero corrugado y vigas reforzadas con barras de basalto. En las figuras 44 a la 48, se muestra la comparación entre las deflexiones obtenidas con vigas reforzadas con acero y con basalto.

Figura 44. Diagrama comparativo entre deflexión de vigas reforzadas con acero VA-01 y reforzadas con basalto VB-01



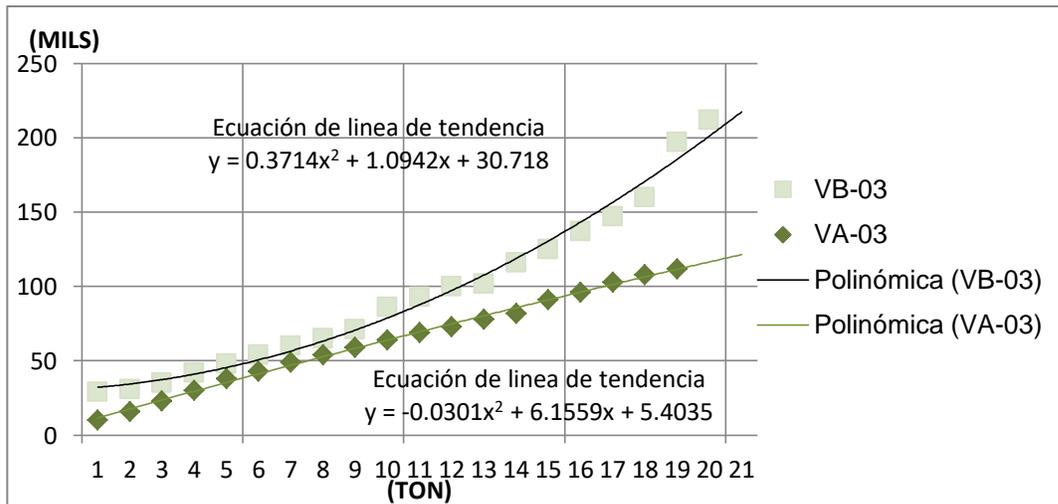
Fuente: elaboración propia.

Figura 45. Diagrama comparativo entre deflexión de vigas reforzadas con acero VA-02 y reforzadas con basalto VB-02



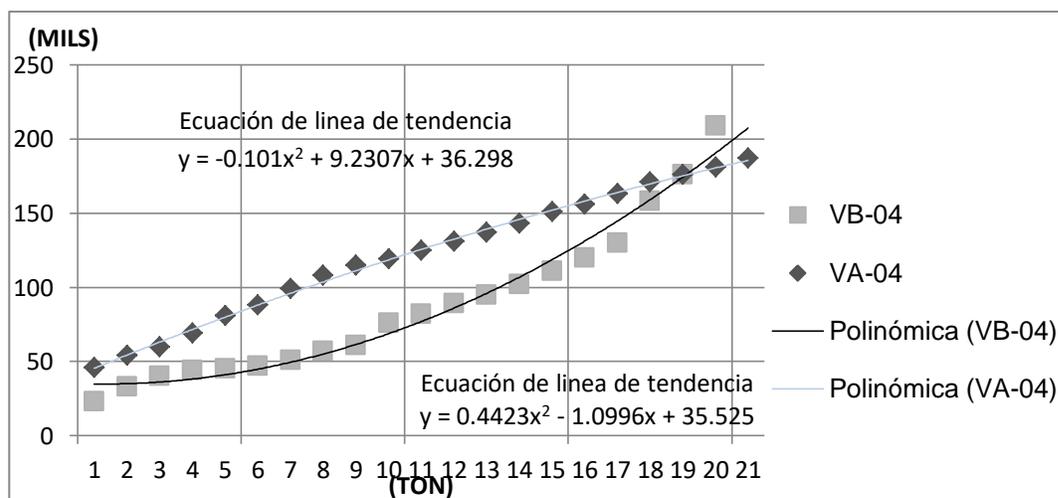
Fuente: elaboración propia.

Figura 46. **Diagrama comparativo entre deflexión de vigas reforzadas con acero VA-03 y reforzadas con basalto VB-03**



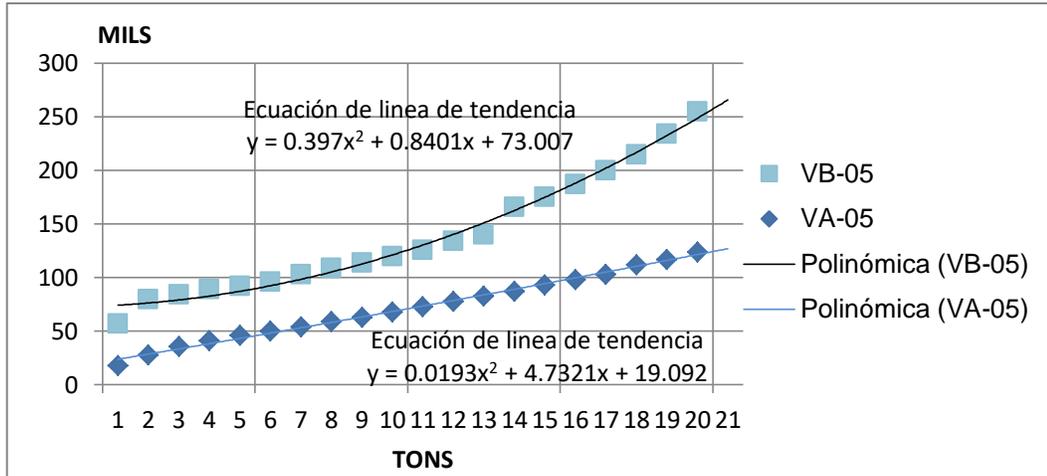
Fuente: elaboración propia.

Figura 47. **Diagrama comparativo entre deflexión de vigas reforzadas con acero VA-04 y reforzadas con basalto VB-04**



Fuente: elaboración propia.

Figura 48. **Diagrama comparativo entre deflexión de vigas reforzadas con acero VA-05 y reforzadas con basalto VB-05**



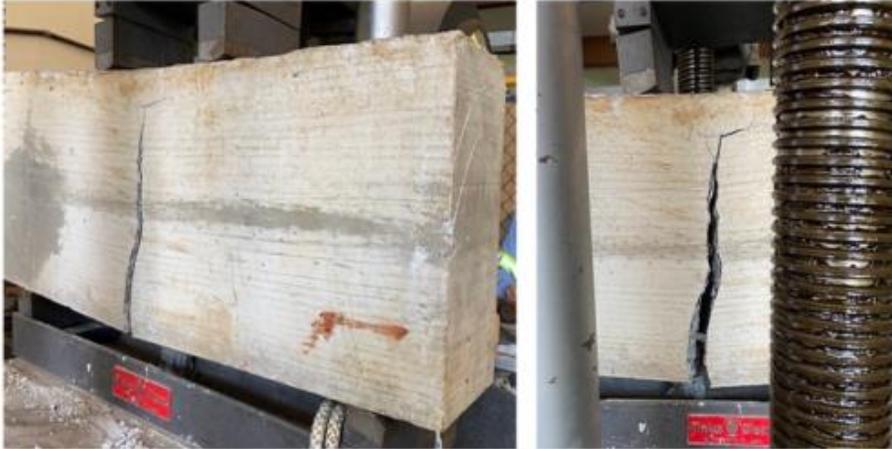
Fuente: elaboración propia.

Como se observa en las gráficas comparativas, en todos los casos, las deflexiones en las barras de basalto son mayores a las de acero, esto se debe principalmente que el acero al ser un material isotrópico se producen deflexiones con una tendencia lineal a medida que el acero va esforzándose y alcanzando su límite elástico. En el caso del basalto, a medida que las fibras se tensionan, se comienzan a romper, se producen que al contar con una sección cada vez más pequeña de fibra las deflexiones se vayan incrementando y puedan ocasionar cada vez deflexiones mayores.

### 3.3.3. Fallas en vigas ensayadas

En la figura 49 a la 51 se muestra un tipo de falla por tensión y ruptura del basalto el cual induce una grieta al centro de la viga que es donde se producen la concentración de momentos más grande. Por otro lado, estas vigas fueron reforzadas con 2, 3, y 4 varillas en la parte inferior.

Figura 49. **Fotografías de fallas de viga de concreto reforzada con basalto VB-01 durante prueba de flexión**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

Figura 50. **Fotografías de fallas de viga de concreto reforzada con basalto VB-02 durante prueba de flexión**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

Figura 51. **Fotografías de fallas de viga de concreto reforzada con basalto VB-03 durante prueba de flexión**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

En la figura 52 a la 53 se muestra una falla por desprendimiento o adherencia del concreto a las barras de basalto. Este resultado coincide con el estudio realizado por Mohsen (2016), en la cual los hallazgos experimentales de su estudio demuestran que una mayor cantidad de concentración de varillas de basalto tiende a dar resultados de desprendimiento el refuerzo o fallas por adherencia. Así mismo se puede observar en la capacidad de estas una reducción en la última viga resistiendo el 81 % de lo esperado.

Figura 52. **Fotografías de fallas de viga de concreto reforzada con basalto VB-04 durante prueba de flexión**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

Figura 53. **Fotografías de fallas de viga de concreto reforzada con basalto VB-05 durante prueba de flexión**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

En las figuras 54 a la 58 se muestran las fallas de los elementos tipo viga reforzados con acero corrugado, tal como se puede observar la mayoría de estas vigas falla por flexión en la base a excepción de la VA-04 que presenta una falla por cortante-compresión. Este resultado es consecuente de las propiedades mecánicas de las barras de acero, que al ir alcanzando el límite plástico van desarrollando fisuras a lo largo de las zonas de tensión de la viga hasta alcanzar la falla.

Figura 54. **Fotografías de fallas de viga de concreto reforzada con acero VA-01 durante prueba de flexión**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

Figura 55. **Fotografías de fallas de viga de concreto reforzada con acero VA-02 durante prueba de flexión**



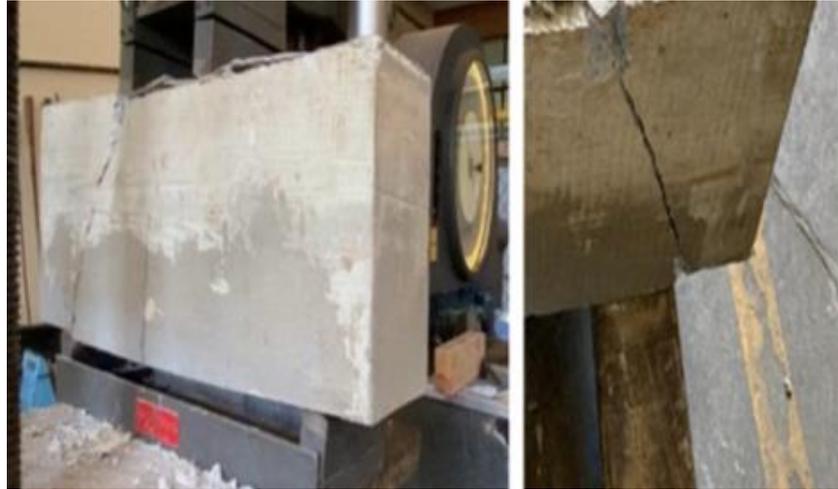
Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

Figura 56. **Fotografías de fallas de viga de concreto reforzada con acero VA-03 durante prueba de flexión**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

Figura 57. **Fotografías de fallas de viga de concreto reforzada con acero VA-04 durante prueba de flexión**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

Figura 58. **Fotografías de fallas de viga de concreto reforzada con acero VA-05 durante prueba de flexión**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

### 3.3.4. Ensayos de dobleces de barras

Para hacer el doblez de 180° se utilizó la norma guatemalteca Coguanor NGO 36 011 en su sección 7.4.4 la cual menciona la metodología para la realización de dobleces en barras de refuerzo y recomienda el doblez de 180°, esta prueba evalúa la ductilidad de los elementos.

Tal como se muestra en la tabla XII las varillas de basalto presentaron fallas de corte al realizarse estas pruebas, este resultado era esperado, sin embargo, con el fines didácticos se realizaron estas pruebas para obtener las conclusiones y recomendaciones de este material.

Tabla XII. **Propiedades de las varillas ensayadas**

Elemento	Longitud de la barra	Área de Refuerzo (cm <sup>2</sup> )	Ángulo de doblado
LB-1	100cm	0.785	Falla
LB-2	100cm	0.785	Falla
LB-3	100cm	0.785	Falla
LA-1	100cm	0.707	Satisfactorio doblez a 180°
LA-2	100cm	0.707	Satisfactorio doblez a 180°
LA-3	100cm	0.707	Satisfactorio doblez a 180°

Nota: LA =Varilla de acero; LB = Varilla de basalto

Fuente: elaboración propia.

Tal como se muestra en la Figura 58 las varillas de basalto al ser dobladas en un ángulo de 180 grados, 90 grados o 45 grados, pierden su integridad estructural, fracturándose y eliminando el revestimiento de basalto con el que vienen fabricadas.

Figura 59. **Fallas en varillas de basalto por dobleces de 180°**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

### 3.3.5. Ensayos de adherencia

Para hacer estos ensayos de adherencia se realizaron 4 testigos de concreto de cilindros de 15cm de diámetro y 30 cm de alto con una longitud de embebimiento de 30cm. Los testigos fueron probados utilizando sistema de extracción hidráulico calibrado específicamente para cada prueba. Estos ensayos fueron realizados por el laboratorio CONLAB, en Guatemala. Los resultados se muestran en la tabla XIII.

Tabla XIII. **Propiedades de los elementos probados por adherencia**

Elemento	Longitud de la barra	Área de Refuerzo (cm <sup>2</sup> )	Rango de Carga Máxima Aplicada (lb)	Carga Máxima Aplicada (kg)	Esfuerzo de Adherencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Falla
A-001	100cm	0.707	7,648.00	3,476.36	39	Falla tensión
A-002	100cm	0.707	7,648.00	3,476.36	39	Falla tensión
B-001	100cm	0.785	10,194.00	4,633.64	49	Falla tensión
B-002	100cm	0.785	7,648.00	3,476.36	37	Falla tensión

Fuente: elaboración propia.

Figura 60. **Fallas en varillas de basalto por ensayo de adherencia (*pull-out*)**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

Figura 61. **Fallas en varillas de acero por ensayo de adherencia (*pull-out*)**



Fuente: [fotografía de Jorge Raúl Sánchez Tello]. (Guatemala, Guatemala 2020). Colección particular. Guatemala.

## 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La comparación de los resultados teóricos obtenidos mediante los ensayos de laboratorio a flexión, compresión, tensión y adherencia se debe abordar tomando en cuenta que existen elementos que pudieron influir en los resultados como como la calidad de los materiales, las condiciones no aptas, la mano de obra, toma de registros de forma manual, falta de disponibilidad de equipo adecuado, error humano para recolectar datos de las muestras, fabricación y desviación estándar de los equipos de laboratorio, entre otras.

Este trabajo de investigación es un aporte a los estudios que existen sobre varillas de basalto y su uso en la construcción tales como el estudio de Patnaik (2009) y el de Hinostroza (2018), en el que se estudian las aplicaciones de la fibra de basalto, sin embargo, se le adiciona un valor agregado como lo es la comparativa directa con elementos reforzados con acero corrugado en igualdad de condiciones. Se informan los hallazgos obtenidos bajo los diversos esfuerzos mecánicos como lo son la compresión, tensión y flexión, y condiciones como adherencia.

Se comprobó que, aunque el ACI 440.1R (2015), regula el uso concreto con varillas de aramida (AFRP), fibra de carbón (CFRP), fibra de vidrio (GFRP), puede proveer guías y bases de diseño que pueden ser utilizadas para el diseño de elementos estructurales con Basalto (BFRP).

#### **4.1. Ensayos a compresión**

Tal como se mostró en el capítulo 3 se fabricaron 6 columnas cortas de medidas de 150mmx150mmx600mm reforzadas con 4 varillas de 10mm tanto en acero como en basalto y estribos de 10mm @150mm. En la tabla VI y VII se encuentra el resumen de los elementos tipo columna ensayados tanto con varillas de acero como con varillas de basalto.

En promedio los 3 elementos reforzados con acero estuvieron 1 % arriba de su cálculo teórico según se muestra en la tabla VI, y los 3 elementos reforzados con basalto estuvieron un 3 % arriba de su cálculo teórico según lo muestra la tabla VII. Además, se observó que debido a los estribos de acero se utilizaron tanto para las columnas reforzadas con basalto como con acero, los elementos se mantuvieron confinados, lo cual permitió alcanzar la capacidad solicitada.

Para el cálculo teórico de carga axial máxima se usó la ecuación 6 del numeral 1.3.2.1 de este documento y fue aplicable tanto para columnas reforzadas con acero como basalto. En promedio las columnas reforzadas con basalto reportaron alrededor de un 10 % más de resistencia que los elementos reforzados con varillas de acero, sin embargo, cabe mencionar que el área de refuerzo de las barras de basalto es en promedio un 10 % mayor que el área de las barras de acero.

También se observó que, en algunas de las columnas reforzadas longitudinalmente con varillas de basalto, se produjo un corte justo en el contacto entre el estribo y la varilla longitudinal, esto se pudo observar ya que el basalto provee una menor capacidad a cortante respecto a su capacidad en tensión.

Este corte en las varillas de basalto se pudo observar que sucedía debido al estar sujeto al incremento exponencial de cargas externas. Por el contrario, el caso de las columnas reforzadas con acero las fallas presentadas fueron por compresión dado que el acero iba cediendo y conteniendo el núcleo de concreto hasta que esta fallara.

Adicionalmente se observó que para esfuerzos de compresión pura en elementos de concreto reforzados con basalto la ecuación 4, provee resultados consistentes y cercanos a los experimentales.

El ACI 440.1R (2015), recomienda que cuando se realice el diseño de elementos a compresión de concreto reforzado con una fibra de polímero (FRP) no tome en cuenta la contribución de este refuerzo en compresión, tanto en columnas como en vigas. Este material al ser relativamente nuevo aún carece de suficiente investigación por lo que se debe tomar en cuenta solo la resistencia del concreto.

#### **4.2. Ensayos a tensión**

Se realizaron pruebas de tensión en varillas de diámetro 10mm tanto de acero como basalto. El área de las varillas de basalto es de  $0.785\text{cm}^2$  y de acero es de  $0.707\text{cm}^2$ . Respecto a la ruptura, el basalto tuvo un resultado aproximadamente del 121 % de capacidad respecto al acero y esto es explicable ya que el acero posee una zona plástica que permite desarrollar gran capacidad después de la fluencia y el basalto carece de esta zona sin embargo la capacidad elástica del basalto es mayor que la del acero.

Según los resultados se puede observar que este material no es apto para ser utilizado en zonas donde se requiera alta ductilidad, y las fallas que se

pueden esperar son más del tipo frágil en vez de dúctiles. Por otro lado, se pudo observar que para desarrollar una correcta tensión en elementos de concreto armado se debe asegurar tener la apropiada longitud de desarrollo, separación entre varillas y recubrimientos adecuados.

### **4.3. Ensayos a flexión**

Como se mencionó en el capítulo 3, se fabricaron 10 vigas de medidas de 310mx210mmx1000mm reforzadas con 2, 3, 4, 5 y 6 varillas tanto en acero como en basalto y estribos de 10mm @150mm. Estos ensayos experimentales dieron un resultado cercano al cálculo teórico, teniendo una diferencia del 18 % en promedio respecto a lo calculado según se muestra en la figura 43.

En el caso de las vigas de concreto reforzadas con acero, los momentos máximos teóricos se obtuvieron a partir de la ecuación No.10. de este documento. En el caso de las vigas de concreto reforzadas con basalto los momentos máximos teóricos se obtuvieron a partir de la ecuación 7.2.2.g del ACI 440.1R (2015).

Se observó que las vigas reforzadas con basalto obtuvieron fallas más súbitas a diferencia de las fallas en las vigas reforzadas con acero que fueron graduales con fisuras mucho más finas y se iban incrementando según se adicionaba carga a la prueba experimental.

Las fallas en las vigas reforzadas con basalto se dividieron en 2 diferentes comportamientos, las primeras 3, VB-01, VB-02, y VB-03 se observaron con fallas en la sección inferior central de la viga, área donde se concentran los mayores esfuerzos a tensión debido al momento positivo, y estas fallaron debido a la fractura parcial o total de las varillas de basalto.

Adicionalmente, se observó el comportamiento de las últimas dos vigas VB-04 y VB-05, la cual estas contaban con 5 y 6 varillas de basalto en la cama inferior, las cuales fueron fallando debido a problemas de adherencia entre las varillas de basalto y el concreto debido a la cercanía entre barras. Este comportamiento coincide con los hallazgos obtenidos en otros documentos de investigación tales como el de Mohsen (2016), donde se afirma que es recomendable según los hallazgos de esta investigación, mantener al menos 3" de separación entre las barras para evitar problemas de adherencia y maximizar la capacidad de las varillas de basalto.

Se pudo observar también que a medida que se incrementaba la cantidad de refuerzo de basalto en las vigas, la capacidad a flexión se reducía, esto debido a que las varillas no alcanzaban a desarrollar su capacidad a tensión sino fallaban por problemas en adherencia entre las barras de basalto y concreto.

Otro dato interesante es que las vigas reforzadas con basalto comparadas con las de acero, se deflectan más en el centro del claro cuando están sujetas a cargas externas. El ACI 440.1R (2015), recomienda que las vigas reforzadas con polímeros sean diseñadas para resistir deflexiones esperadas (diseño por servicio), conjuntamente el diseño por resistencia.

Debido a que las vigas reforzadas con basalto poseen un módulo de elasticidad menor comparado con las de acero, el diseño por servicio y vibración de las estructuras cumplen un papel importante y no debe ser pasado por alto al momento del diseño de elementos con este material.

#### **4.4. Ensayos de dobleces de 180°**

En estos ensayos las varillas de acero pasaron satisfactoriamente las pruebas de la norma Coguanor NGO 36 011 en su sección 7.4.4, a diferencia de las varillas de basalto que no fueron exitosas al momento de realizar a estas pruebas. Eso se explica debido a que las varillas de basalto al ser un material frágil fabricado conjuntamente con fibras de polímero y basalto, y ser un material anisotrópico no posee las mismas características mecánicas en todas sus direcciones, pero tiene una extraordinaria capacidad a tensión, pero muy baja capacidad a corte. El basalto, al ser doblado, se comienza a romper sus fibras e, inmediatamente, comienza a perder capacidad estructural hasta que falla. El fabricante de estas varillas incluye dentro de sus catálogos una amplia variedad de formas, estribos y curvas según se requieran para la construcción.

#### **4.5. Ensayos de adherencia**

Se realizaron 4 ensayos de adherencia tipo *pull-out*, de los cuales, dos fueron realizados con barras de acero y 2 con barras de basalto. Los ensayos con barras de acero resistieron una carga en promedio de 3476kg y las de basalto una carga promedio de 4054kg. El objetivo de este ensayo era comprobar que las fallas fueran por tracción y no por problemas de adherencia con el concreto. Los cuatro especímenes superaron esta prueba ya que se pudo determinar que la falla de estos elementos fue por tracción en todos los casos.

Debido a las limitaciones de este estudio no se realizaron pruebas de adherencia por influencias de más barras, cercanías de barras, conos de fallas, así como diversas configuraciones de recubrimientos.

Sin embargo, se pudo analizar que, aunque durante los ensayos en flexión se produjeron fallas por adherencia de las barras, al contar con una separación entre barras adecuadas y un recubrimiento adecuado se puede alcanzar una adecuada adherencia y por ende obtener la máxima capacidad de las barras.



## CONCLUSIONES

1. Las varillas de basalto pueden sustituir al acero corrugado en elementos estructurales tipo columna y viga, por poseer propiedades mecánicas adecuadas para ser utilizadas como refuerzo del concreto.
2. De acuerdo con los ensayos de tensión las varillas de basalto resistieron 21 % más que las de acero, donde se observó un módulo de elasticidad menor y una zona plástica más reducida que la del acero corrugado; y en deformación presentan un valor más elevado.
3. Las columnas reforzadas con basalto soportaron 10 % más de la capacidad de compresión, que las reforzadas con acero, observando fallas que fueron súbitas y frágiles, esto debido al corte de las barras longitudinales; las vigas reforzadas con barras de basalto resistieron 38 % menos en promedio de la capacidad a flexión de las reforzadas con acero, concluyendo que mientras aumenta la cuantía de refuerzo en el basalto, las vigas pierden capacidad por problemas de adherencia.
4. Las deflexiones de los elementos reforzados con basalto fueron mayores que las reforzadas con acero; se observaron fracturas en las pruebas de dobleces a 180 grados realizadas a las varillas de basalto y en los ensayos de adherencia se verificó que las barras de basalto si tienen adecuada adherencia al concreto siempre que se proporcione suficiente área de concreto alrededor de las mismas.

5. Dentro de las ventajas de utilizar varillas de basalto se menciona que el peso de la estructura se reduce considerablemente, también se presenta alta resistencia a la corrosión y baja conducción electromagnética; mientras que las desventajas observadas son la dificultad de adquisición, ya que no existe disponibilidad en el mercado guatemalteco, y su limitado uso en estructuras que requieran disipación de energía.
  
6. Es factible el uso de barras de basalto como refuerzo de concreto armado en elementos estructurales tipo viga y columna en Guatemala, donde cumple con características similares al acero, más no es rentable para el uso cotidiano debido al elevado costo y limitada oferta de mercado para su adquisición.

## RECOMENDACIONES

1. Utilizar las investigaciones, normativas y bibliografías aplicables para el diseño de elementos que involucren el basalto como material de refuerzo, debido la información limitada sobre el basalto, además, se deben tomar en consideración las longitudes de desarrollo mínimo requeridas por el código ACI440.1R, así como evitar utilizarlo donde se espere reversión de momentos, readecuación de momentos o marcos dúctiles a momentos.
2. Utilizar varillas de basalto en áreas en las que se desee evitar la conducción electromagnética, en estructuras donde se desee reducir el peso de la carga muerta, o en situaciones donde la estructura esté sujeta a altas temperaturas, evitando su uso en zonas que requieran alta ductilidad tales como rótulas plásticas o elementos de disipación de energía.
3. Diseñar los elementos reforzados con basalto en el rango elástico, principalmente, y ser conservadores a la hora de aplicar los factores de la reducción por ductilidad estructural, ya que la zona plástica de estos elementos es muy limitada.
4. Solicitar piezas prefabricadas a los fabricantes según lo solicite el ejecutor, si se desea realizar estribos, ganchos o curvas, ya que estas no pueden ser dobladas en el sitio de construcción.

5. Tomar en cuenta los efectos de vibración, deflexión y servicio para el diseño de elementos a flexión, ya que los elementos reforzados con basalto presentan deflexiones mayores de los elementos reforzados con acero corrugado.

## REFERENCIAS

1. ACI 318s. (2019). *Requisitos de reglamento para concreto estructural*. Michigan, Estados Unidos: ACI.
2. ACI 440.1r. (2015). *Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer bars*. Michigan, Estados Unidos: ACI.
3. Al-ostaz, a. (2007). *Effect of moisture content on the coefficient of thermal expansion of concrete. Effect of moisture content on the coefficient of thermal expansion of concrete*. Recuperado de <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/24164>.
4. Alsina, J. (2006). *Historia de la geología*. España: Ediciones de Intervención Cultural.
5. Ancochea, E., Andonaegui, P., y Claro, A. (2009). *Atlas de rocas ígneas. Madrid: departamento de petrología y geoquímica*. Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid.
6. ASTM d7205. (2006). *Metodo estandar para evaluar las propiedades de tension de barras de polimero compuesto*. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/433738138/NORMAS-ASTM-docx>.

7. Aurrekoetxea, J. (2009). *Reparación de pilares con daños parciales localizados*. (Tesis de doctorado). Universidad de Burgos, España. Recuperado de [file:///C:/Users/casa/Downloads/Aurrekoetxea\\_Aurrekoetxea.pdf](file:///C:/Users/casa/Downloads/Aurrekoetxea_Aurrekoetxea.pdf).
8. Barreros, J. (2014). *Sistemas constructivos i*. Quito, Ecuador: Universidad Central del Ecuador.
9. Berrocal, L. (2007). *Resistencia de materiales*. España: McGraw-Hill. Recuperado de [https://www.academia.edu/40898660/Resistencia\\_de\\_materiales\\_Resistencia\\_de\\_materiales](https://www.academia.edu/40898660/Resistencia_de_materiales_Resistencia_de_materiales).
10. Blaguru, P., Nanni, A. y Giancaspro, J. (2009). *Frp composites for reinforced and prestressed concrete structures*. Nueva York, Estados Unidos: Editorial Taylor and Francis.
11. De León, E. (2017). *Comparación de la resistencia a la compresión de hormigón a base de cemento, para uso general en la construcción con agregados grueso de caliza y basalto expuesto al fuego*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/8347/1/Elfego%20Bernabe%20De%20Le%C3%B3n%20Rivera.pdf>.
12. Desastres, D. (2017). *Tipos de fallas de columnas*. Recuperado de <https://obras.expansion.mx/construccion/2017/09/21/fallas-estructurales-en-columnas-que-debes-identificar#pid=slide-0>.
13. Flores, F., Vargas, K., y Loza, D. (2014). *Teoría de los materiales de concreto*. Perú: Caja Negra.

14. Gálvez, E. (2014). *Comportamiento del concreto reforzado en vigas bajo efectos de torsión basado en ACI 318-08*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_3818\\_C.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3818_C.pdf).
15. García, A. (2005). *Consideraciones generales sobre concreto reforzado*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/02/02\\_1325.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/02/02_1325.pdf).
16. García, J. (2013). *Estructuras de hormigón presensado armadas con FRP*. España: Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/34682/ESTRUCTURAS%20DE%20HORMIGON%20PRETENSADO%20CON%20FRP.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
17. Garcia, M. (2016). *Estimación del efecto de las fibras metálicas sobre la resistencia a la flexión de vigas de concreto, mediante la técnica de velocidad de pulso ultrasónico*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/57876/2592335.2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
18. Gonzáles, O. y Villegas, F. (2005). *Aspectos fundamentales del concreto reforzado*. México: Limusa. Recueraddo de [https://www.academia.edu/31152430/gonzales\\_cuevas\\_aspectos\\_fundamentales\\_del\\_concreto\\_reforzado\\_4ta\\_edici%c3%b3n\\_](https://www.academia.edu/31152430/gonzales_cuevas_aspectos_fundamentales_del_concreto_reforzado_4ta_edici%c3%b3n_).

19. Gorde, J., y Deepa, J. (Diciembre, 2013). Review of application of basalt fiber in civil engineering. *IJLTEMAS*, vol II(XII), pp. 54-58.
20. Harmsen, T. (2002). *Diseño de estructuras de concreto armado*. Lima, Perú: Fondo Editorial Pontificia Universidad Católica del Perú.
21. Hayden, H., Moffat, W. y Wulff, J. (1965). *La estructura y propiedades de los materiales vol. III, comportamiento mecanico*. New York, USA: Wiley.
22. Hibbeler, R. (2011). *Mecánica de materiales*. México: Pearson. Recuperado de <https://doku.pub/documents/mecanica-de-materiales-russell-c-hibbeler-8va-edicionpdf-408r9zjwyxlx>.
23. High, C. (2013). *Use of basalt fibers for reinforced concrete structures*. (Tesis de maestría). Universidad Estatal de Carolina del Norte, Estados Unidos. Recuperado de <https://repository.lib.ncsu.edu/bitstream/handle/1840.16/9256/etd.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
24. Hinostroza, J. (2018). *Estudio del comportamiento estructural de vigas de concreto reforzadas con varillas de basalto*. (Tesis de maestría). Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú. Recuperado de [http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/11604/HINOSTROZA\\_YUCRA\\_ESTUDIO\\_COMPORAMIENTO.pdf?sequence=4&isAllowed=y](http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/11604/HINOSTROZA_YUCRA_ESTUDIO_COMPORAMIENTO.pdf?sequence=4&isAllowed=y)

25. Huelva, M. (2 de junio, 2007). *Estrategias para evaluar estructuras de hormigón armado con patologías por falta de adherencia*. [Mensaje de blog]. Recuperado de [https://digital.csic.es/bitstream/10261/6315/1/BIA\\_Molina\\_Huelva.pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/6315/1/BIA_Molina_Huelva.pdf).
26. Khayat, K. (2014). *Roller compacted concrete: field evaluation and mixture optimization*. Estados Unidos: Missouri University of Science and Technology. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/264734306\\_roller\\_compacted\\_concrete\\_field\\_evaluation\\_and\\_mixture\\_optimization](https://www.researchgate.net/publication/264734306_roller_compacted_concrete_field_evaluation_and_mixture_optimization).
27. Magaña, A. (2016). *Diseño de concreto reforzado*. Mexico: Instituto Tecnológico de Villa Hermosa.
28. Martínez, J. y Guerrero, P. (2004). *Fundamentos de concreto reforzado*. Calí, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana. Recuperado de [https://www.academia.edu/35237292/FUNDAMENTOS\\_DE\\_CONCRETO\\_REFORZADO\\_TEXTO\\_FACULTAD\\_DE\\_INGENIERIA\\_N%C3%BAmero\\_y\\_L%C3%ADnea](https://www.academia.edu/35237292/FUNDAMENTOS_DE_CONCRETO_REFORZADO_TEXTO_FACULTAD_DE_INGENIERIA_N%C3%BAmero_y_L%C3%ADnea).
29. McCormac, J., y Brown, R. (2011). *Diseño de concreto reforzado*. México: Alfaomega.
30. McKenzie, W., Donaldson, C., y Guilford, C. (1996). *Atlas de rocas ígneas y sus texturas*. Barcelona, España: Editorial Masson.

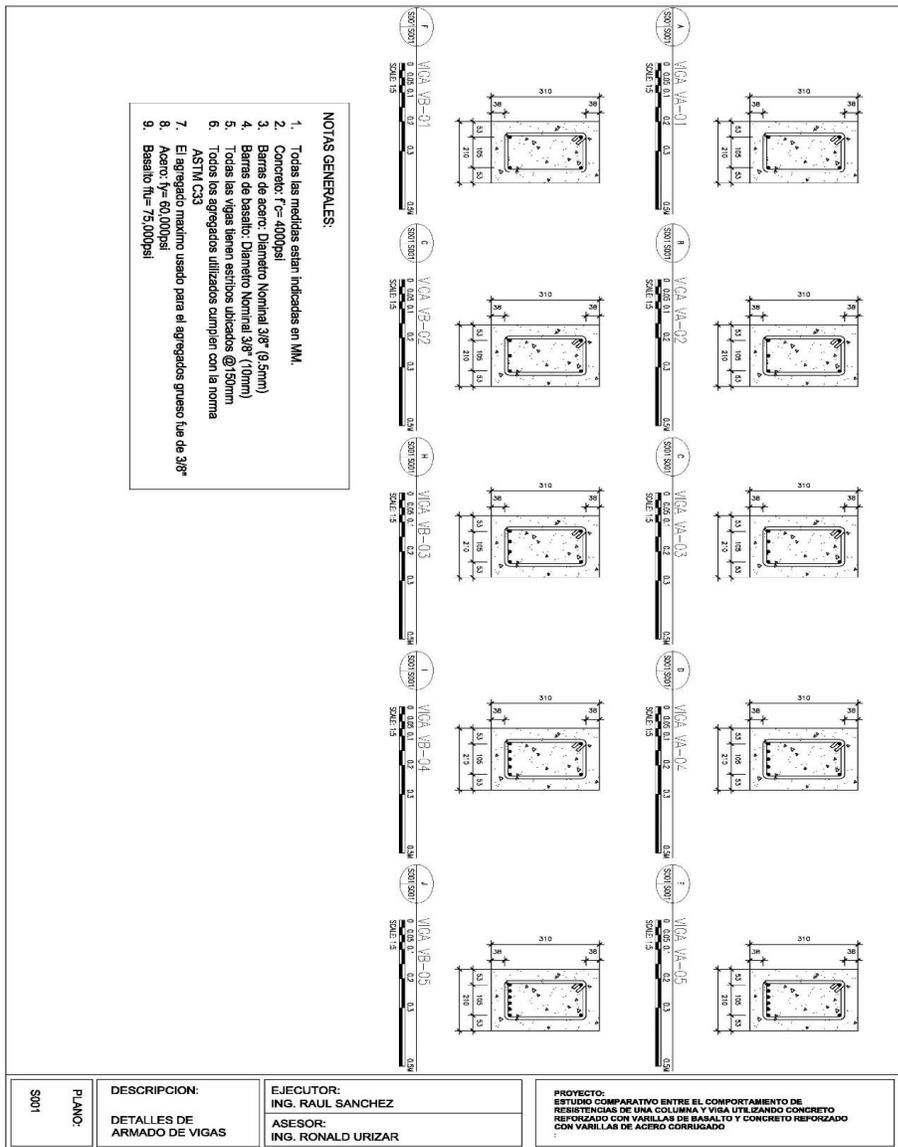
31. Mohsen, I., Ovitigala, T., y Ibrahim, M. (agosto de 2016). Shear behavior of basalt fiber reinforced concrete beams with and without basalt frp stirrups. *Journal of Composites for Construction*, vol 20(4), pp. 1-11.
32. Nilson, A. W. (1995). *Diseño de estructuras de concreto*. México: McGraw-Hill.
33. Olivos, O. (2014). *Modelo técnico económico para la toma de decisiones de renovación de redes secundarias de agua potable en la zona norte de Lima*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Ingeniería, Perú. Recuperado de <https://1library.co/document/y9gl2gjq-modelo-tecnico-economico-decisiones-renovacion-secundarias-potable-norte.html>.
34. Padilla, L. (11 de octubre, 2018). *Resistencia a la compresión del concreto*. [Mensaje de blog]. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/328199204\\_resistencia\\_a\\_la\\_compresion\\_del\\_concreto](https://www.researchgate.net/publication/328199204_resistencia_a_la_compresion_del_concreto).
35. Patnaik, A. (4 de noviembre, 2009). Applications of basalt fiber reinforced polymer. [Mensaje de blog]. Recuperado de [http://provenperformancechemicals.com/pdf/University\\_of\\_Akron\\_Oh\\_Basalt\\_Testing.pdf](http://provenperformancechemicals.com/pdf/University_of_Akron_Oh_Basalt_Testing.pdf).
36. Patnaik, A., Miller, I. y Adhikiari, S. (12 de septiembre, 2013). *Basalt FRP minibar reinforced concrete*. [Mensaje de blog]. Recuperado de [https://concrete.fsv.cvut.cz/fcproceedings/pdf/2013/023\\_oral\\_20\\_Short\\_PATNAIK\\_Anil.pdf](https://concrete.fsv.cvut.cz/fcproceedings/pdf/2013/023_oral_20_Short_PATNAIK_Anil.pdf).

37. Poveda, J. (2012). *Metodología de diseño de materiales compuestos de matriz poliolefínica reforzados con fibras discontinuas para aplicaciones en transporte*. (Tesis de doctorado). Universidad de Valladolid, España. Recuperado de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/2743/TESIS298-130508.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
38. Ruiz, A. (3 de septiembre, 2018). *Bond evaluation of gfrp reinforcing bars embedded in concrete under aggressive environments*. [Mensaje de blog]. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/327405996\\_bond\\_evaluation\\_of\\_gfrp\\_reinforcing\\_bars\\_embedded\\_in\\_concrete\\_under\\_aggressive\\_environments](https://www.researchgate.net/publication/327405996_bond_evaluation_of_gfrp_reinforcing_bars_embedded_in_concrete_under_aggressive_environments).
39. Saravanan, S., y Rohith, R. (noviembre, 2016). Investigation of structural members with basalt rebar reinforcement as an effective alternative of standard steel rebar. *Tech structures*, vol 33(S3), pp.1422-1429.
40. Starokadomsky, D., Reshetnyk, M., Ishenko, A., y Rassohin, D. (mayo, 2019). Epoxy composites reinforced with bazaltfibre filled for osteo-paleo-prostheses and external implants. *Biomedical Journal of Scientific and Technical Research*, vol. 18(1), pp. 13236-13241.
41. Sunny, J. Prabhakaran, P. (julio, 2016). Experimental study on properties of concrete reinforced with basalt bars. *Ernakulam*, vol 03(07), pp. 2395-0056.

42. Tarelo, H. (2016). *Materiales, rocas*. México: Facultad de Arquitectura, UMSNH. Recuperado de [https://hctarelo.weebly.com/uploads/4/6/9/7/46979447/01\\_rocas\\_01.pdf](https://hctarelo.weebly.com/uploads/4/6/9/7/46979447/01_rocas_01.pdf).
43. Valles, P. (2013). *Estudio comparativo entre barras corrugadas de acero y de basalto para su uso en edificación*. (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Valencia, España. Recuperado de [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/49438/TrabajoFinalGrado\\_PaulaVallesPla.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/49438/TrabajoFinalGrado_PaulaVallesPla.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
44. Zhogyu, I., Xian, G., y Li, H. (junio, 2013). Experimental study on the mechanical properties of basalt fiber and pultruded bfrp plates at elevated temperatures. *Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control*, vol. 23(5), pp. 277-284.

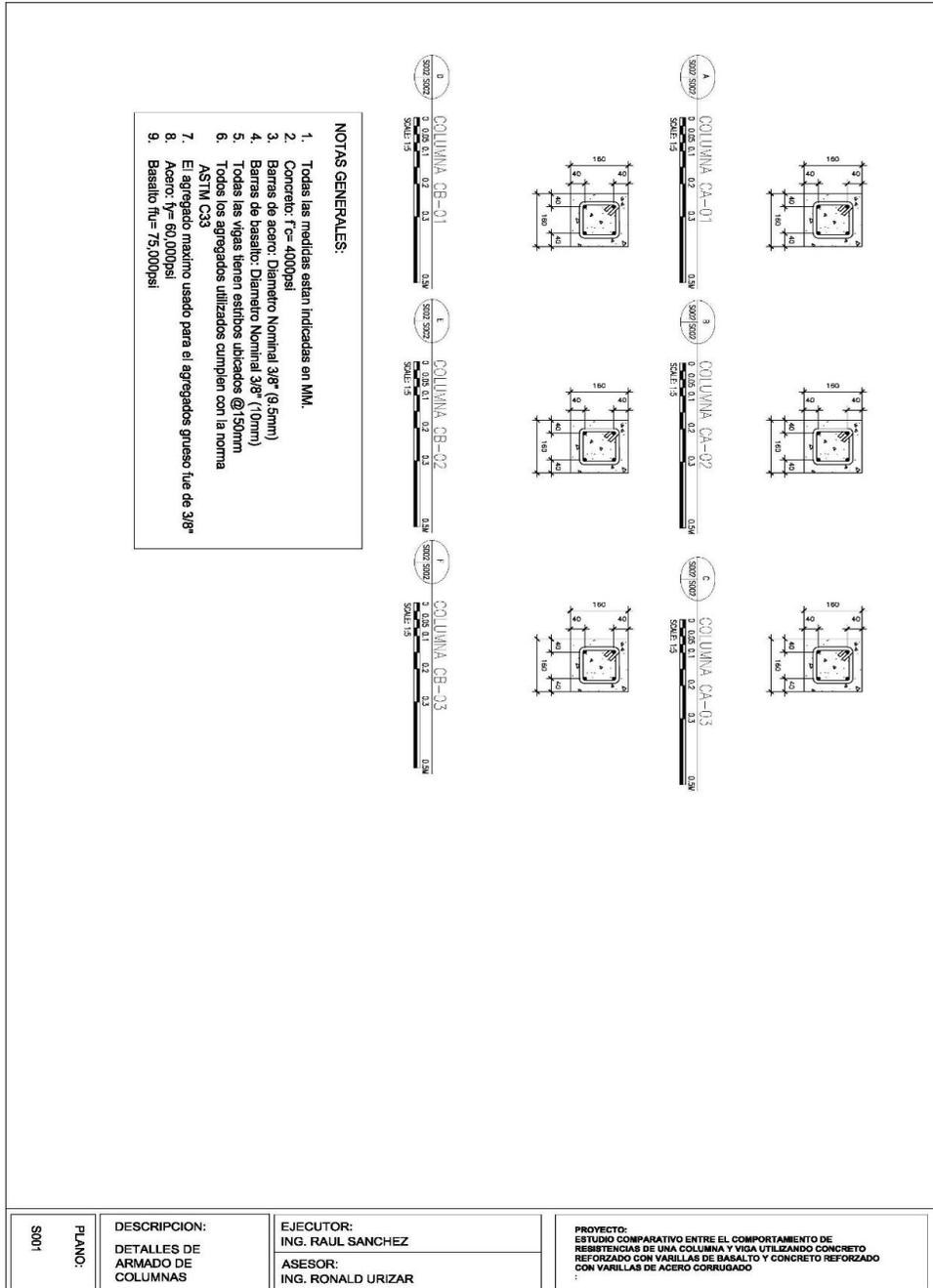
# APÉNDICES

## Apéndice 1. Plano de la realización de un elemento estructural tipo viga



Fuente: elaboración propia, utilizando AutoCAD 2020.

## Apéndice 2. Plano de la realización de un elemento estructural tipo columna



Fuente: elaboración propia, utilizando AutoCAD 2020.

# ANEXOS

## Anexo 1. Resistencia de los cilindros de concreto de acuerdo con la norma ASTM C39



concreto • materiales • suelos

Orden de Trabajo No. 22434  
 Fecha de impresión: 05/10/2020  
 17:30:49  
 SOFT-GDC-005 Rev. 0

### INFORME DE RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

ASTM C39 | COGUANOR NTG-41017h1

Cliente:

Contacto:

Proyecto:

Dirección:

Residente:

Fecha Fundición:

Proveedor:

Estructura:

Ubicación:

Fc diseño (psi):

Temp Concreto °C:

Temp Ambiente °C:

Muestra por:

Concreto Tipo:

Guía Camión:

Revenimiento:  pulg

% Aire:

Peso Unit (kg/m³):

Transporte por:

F.C.E. = Factor de conversión por esbeltez N.I. = No Indica

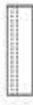
Id Interna	Id Cliente	Ensayo	Edad (días)	Masa (kg)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Relación h/d	F.C.E.	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia (Mpa)	Resistencia (psi)	Falla Tipo	% Fc
113777	CL	26/09/2020	35	13.02	153.75	300.00	1.95	1	18537.15	625.7	33.8	4,900	2	122%
113778	C2	26/09/2020	35	12.74	153.75	301.00	1.96	1	18528.70	623.3	33.6	4,880	2	122%
113779	C3	26/09/2020	35	13.06	153.50	300.00	1.95	1	18499.77	636.2	34.4	4,990	2	125%

Ensayos realizados en Máquina No. 1 con calibración más reciente realizada el 18 de febrero de 2020. Los resultados se relacionan solamente a los items sometidos a ensayo.

**Observaciones:**

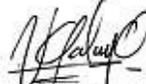
Proyecto: Estudio Comparativo entre el Comportamiento de Resistencias de Columna y Viga Utilizando Concreto Reforzado con Varillas de Basalto y Concreto Reforzado con Varillas de Acero Corrugado.







Tipo de Falla



Ing. Victor A. Galvez Ochoa  
Gerente de Laboratorio  
Colegiado 6269

- INFORME DIGITAL -

CONLAB, S.A. - 10 avenida 16-86 "C" zona 11, Guatemala - Tel. 2473-2332 - Email: info@conlab.com.gt

Prohibida la reproducción del presente informe sin autorización de CONLAB a menos que se haga de manera íntegra.

Fuente: CONLAB, S.A.

## Anexo 2. Resistencia de columnas de concreto reforzadas con acero



Orden de trabajo NO. 20495  
Fecha de Impresión: 6/10/20

### DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN - COLUMNAS

Cliente / Interesado:	<input type="text" value="Jorge Raul Sanchez Tello"/>	Estructura:	<input type="text" value="Especímenes de elementos tipo columna"/>	
Contacto / Atención a:	<input type="text" value="Jorge Raul Sanchez Tello"/>	Ubicación:	<input type="text" value="N.I."/>	
Proyecto:	<input type="text" value="Ver Observaciones"/>	Concreto tipo:	<input type="text" value="4000 psi"/>	MR (psi): <input type="text" value="---"/>
Dirección:	<input type="text" value="Ciudad de Guatemala"/>	% Aire:	<input type="text" value="--"/>	Slump (pulg): <input type="text" value="---"/>
		Masa Unitaria (kg/m <sup>3</sup> ):	<input type="text" value="---"/>	Temp. Concreto °C: <input type="text" value="---"/>

ID Cliente	ID Interna	Hechura	Ensayo	Edad (Días)	Masa (kg)	Largo (mm)	Ancho 1 (mm)	Ancho 2 (mm)	Carga Máxima (kN)	Resistencia a Compresión (MPa)	Resistencia a Compresión (psi)
CA-1	113978	22/08/20	2/10/20	41	34.9	576.0	155.0	153.0	517.3	22	3160
CA-2	113979	22/08/20	2/10/20	41	35.7	591.0	160.0	161.0	494.8	19	2790
CA-3	113980	22/08/20	2/10/20	41	32.8	580.0	157.0	160.0	624.8	25	3610
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

**Observaciones:**

Proyecto: Estudio Comparativo entre el Comportamiento de Resistencias de un Columna y Viga Utilizando Concreto Reforzado con Varillas de Basalto y Concreto Reforzado con Varillas de Acero Corrugado.

  
Ing. Víctor A. Gálvez Ochoa  
Gerente de Laboratorio  
Colegiado 6269

10 Avenida 16-86 "C" Zona 11, Colonia Mariscal, Guatemala | Teléfono: 2473 2332 | Email: info@conlab.com.gt

Fuente: CONLAB, S.A.

### Anexo 3. Resistencia de columnas de concreto reforzadas con basalto



Orden de trabajo NO. 20496  
Fecha de Impresión: 6/10/20

#### DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN - COLUMNAS

Cliente / Interesado:

Contacto / Atención a:

Proyecto:

Dirección:

Estructura:

Ubicación:

Concreto tipo:  MR (psi):

% Aire:  Slump (pulg):

Masa Unitaria (kg/m<sup>3</sup>):  Temp. Concreto °C:

ID Cliente	ID Interna	Hechura	Ensayo	Edad (Dias)	Masa (kg)	Largo (mm)	Ancho 1 (mm)	Ancho 2 (mm)	Carga Máxima (kN)	Resistencia a Compresión (MPa)	Resistencia a Compresión (psi)
CB-1	113981	22/08/20	2/10/20	41	31.5	577.0	155.0	153.0	514.8	22	3150
CB-2	113982	22/08/20	2/10/20	41	30.5	582.0	149.0	166.0	620.5	25	3640
CB-3	113983	22/08/20	2/10/20	41	31.5	580.0	158.0	149.0	602.0	26	3710
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Observaciones:

Proyecto: Estudio Comparativo entre el Comportamiento de Resistencias de san Columnas y Vigas Utilizando Concreto Reforzado con Varillas de Basalto y Concreto Reforzado con Varillas de Acero Corrugado.



**Ing. Víctor A. Gálvez Ochoa**  
Gerente de Laboratorio  
Colegiado 6269

10 Avenida 16-86 "C" Zona 11, Colonia Mariscal, Guatemala | Telefono: 2473 2332 | Email: info@conlab.com.gt

Fuente: CONLAB, S.A.

## Anexo 4. Resultado de resistencia de barras de basalto a tensión



Orden de trabajo NO. **OM-216-A**  
 Fecha de ensayo: 2020-10-26  
 Fecha de impresión: 2020-10-29

### INFORME DE RESULTADOS

#### RESISTENCIA A TRACCIÓN DE VARILLAS DE BASALTO Y CORRUGADAS PARA REFUERZO DE CONCRETO

Ciente / Interesado: Jorge Raul Sanchez Tello

Proyecto: Ver observaciones

Contacto / Atención a: Jorge Raul Sanchez Tello

Dirección: Ciudad de Guatemala

Identificación Elemento			CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ESPÉCIMEN							ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN				
Especimen	Tipo	ID	Díametro Nominal (mm)	Díametro (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Peso Líneal (kg/m)	Alto de Corruca (mm)	Ancho de Corruca (mm)	Espaciamiento Corruca (mm)	Carga de Fluencia (kg)	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)	Carga Máxima (kg)	Esfuerzo Máximo (Mpa)	% Elongación
1	Basalto	VB-3	10.00	9.24	67.06	0.132	1.34	6.05	11.0	2,740	341	4,333	540	12.00%
2	Basalto	VB-4	10.00	9.18	66.19	0.132	1.30	6.11	11.0	3,456	431	4,455	555	6.50%



**Ing. Víctor A. Gómez Ochoa**  
 Colegiado 6269  
 Gerente de Laboratorio

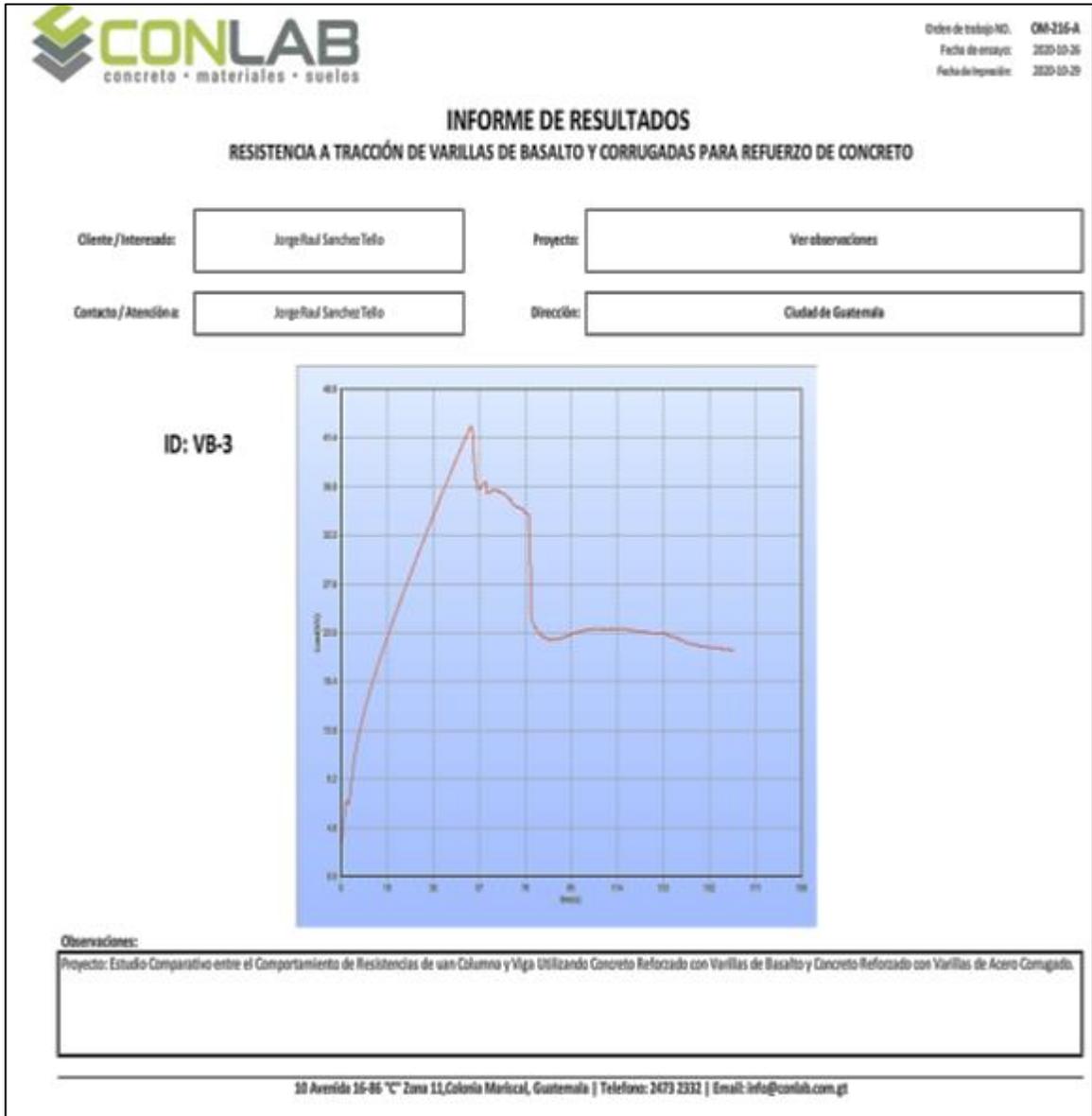
**Observaciones:**

Proyecto: Estudio Comparativo entre el Comportamiento de Resistencias de un Columna y Viga Utilizando Concreto Reforzado con Varillas de Basalto y Concreto Reforzado con Varillas de Acero Corrugado.

10 Avenida 16-86 "C" Zona 11, Colonia Mariscal, Guatemala | Teléfono: 2473 2332 | Email: info@conlab.com.gt

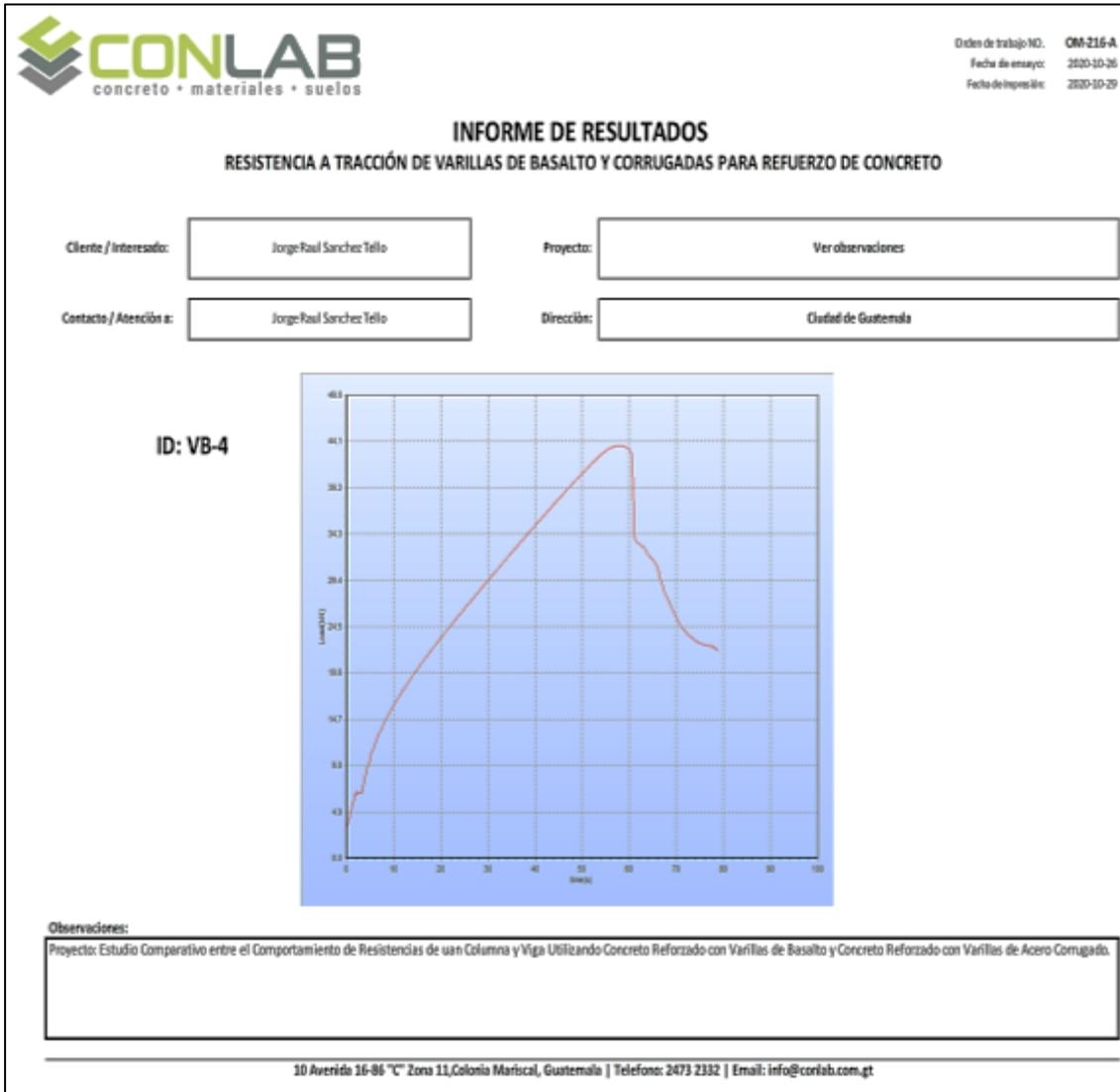
Fuente: CONLAB, S.A.

Anexo 5. Resultado de resistencia de barras de basalto a tensión



Fuente: CONLAB, S.A.

Anexo 6. Resultado de resistencia de barras de basalto a tensión



Fuente: CONLAB, S.A.

Anexo 7. Resultado de resistencia de barras de acero a tensión



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



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

---

O.T. No. 40601 INFORME No. 73-M  
 INTERESADO: JORGE RAUL SANCHEZ TELLO  
 PROYECTO: TESIS DE MAESTRIA "ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE EL COMPORTAMIENTO DE RESISTENCIAS DE UNA COLUMNA UTILIZANDO CONCRETO REFORZADO CON VARILLAS DE BASALTO Y VARILLAS DE ACERO CORRUGADO.  
 ASUNTO: ENSAYO DE TENSION Y DOBLADO EN BARRAS DE ACERO Y BASALTO, ENSAYO DE FLEXION EN VIGAS DE CONCRETO.  
 FECHA: GUATEMALA, 08 DE OCTUBRE DE 2020.

**ANTECEDENTES**  
 El estudiante JORGE RAUL SANCHEZ TELLO, CARNE No. 100023558, de la Maestría de Estructuras de la Escuela de Estudios de Postgrado, solicitó a este Centro de Investigaciones de Ingeniería que se realizara, ensayo de tensión y doblado en barras de acero y basalto así como también ensayo de flexión en vigas de concreto. Los ensayos en cuestión son parte del trabajo de tesis, "**ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE EL COMPORTAMIENTO DE RESISTENCIAS DE UNA COLUMNA UTILIZANDO CONCRETO REFORZADO CON VARILLAS DE BASALTO Y VARILLAS DE ACERO CORRUGADO**".

**RESULTADOS VARILLAS DE ACERO**

No. correlativo	Peso kg/m	*Diámetro mm	*Perímetro mm	*Área cm <sup>2</sup>	Espaciamiento Long mm	Ancho ribete mm	Altura mm
4	0.464	8.68	27.27	0.59	11.4	2.97	0.78
5	0.464	8.68	27.27	0.59	11.3	2.95	0.72
6	0.464	8.68	27.28	0.59	11.2	2.95	0.72

Especificaciones	0.560	9.5	29.9	0.71	6.7	3.6	0.38
	NOMINAL	NOMINAL	NOMINAL	NOMINAL	MAXIMO	MAXIMO	MINIMO

Esfuerzo a tensión Mpa		Alargamiento %	No. De varilla	Grado	Prueba de doblado según Norma
Fluencia	Máximo	20 cms			
352.90	511.05	20.00	03	No cumple	Si paso
366.02	510.36	19.00	03	No cumple	Si paso
448.90	593.23	18.00	03	60	Si paso
Especificaciones: 420-540**		550**			14.00

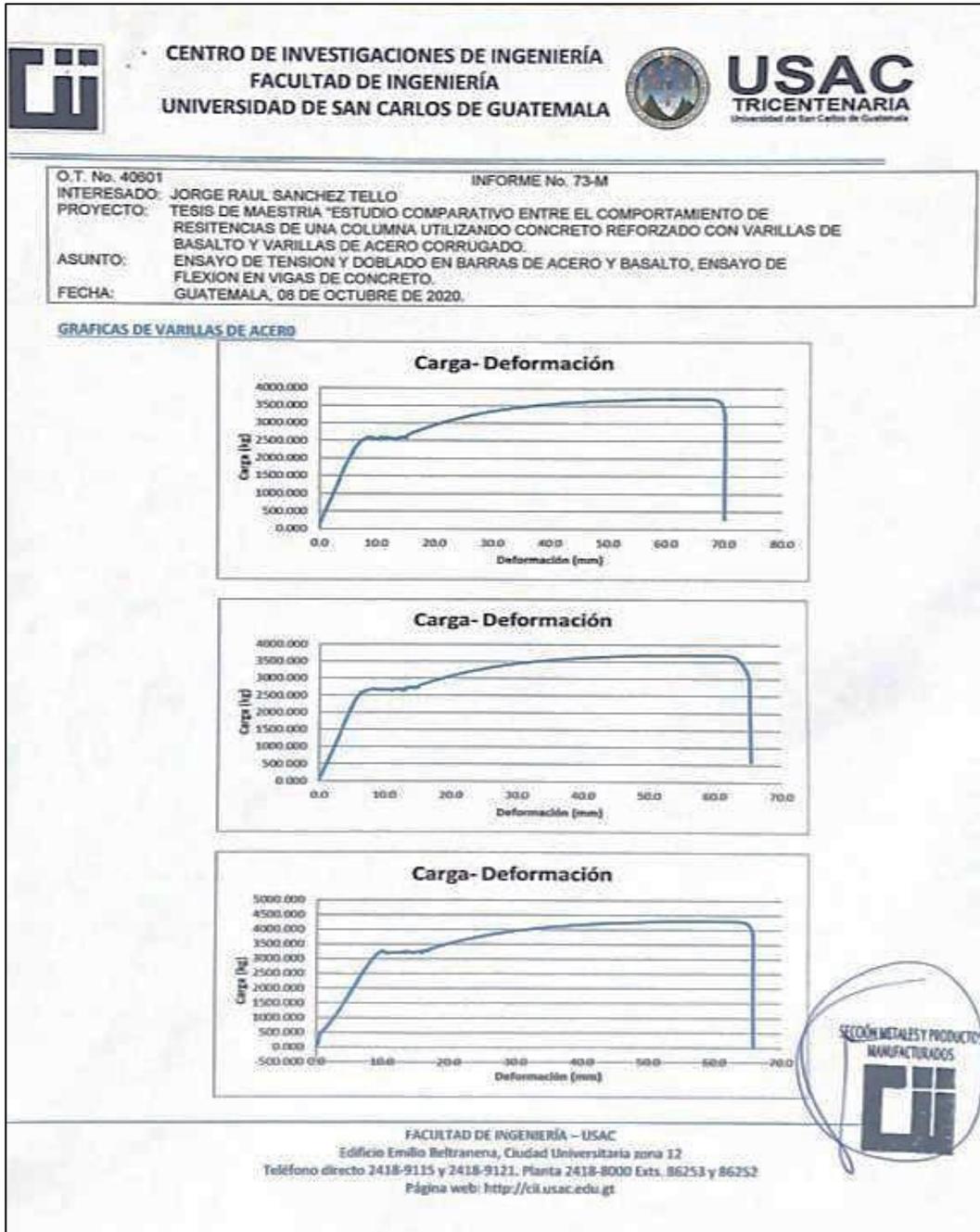
Datos calculados sobre el peso por unidad de longitud. Observación: se acepta una tolerancia de 6% por debajo de la masa unitaria nominal de la barra. \*Las especificaciones utilizadas en los presentes ensayos son de la Norma ASTM A 706. CORRUGA EN "X", IDENTIFICACION W



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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, USAC.

Anexo 8. **Resultado de resistencia de barras de acero a tensión; curvas carga-deformación**



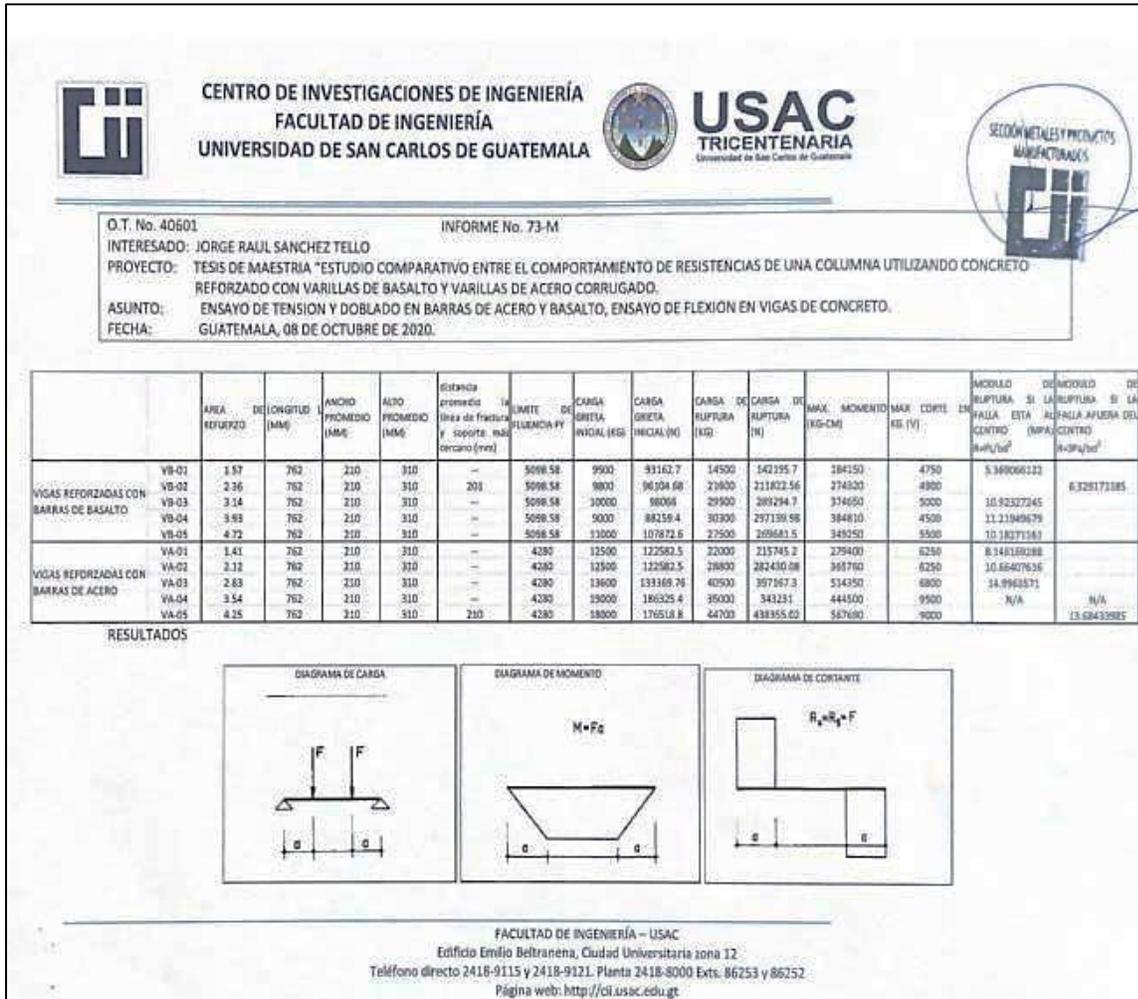
Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, USAC.

Anexo 9. Resultado de dobleces de barras de basalto

		<b>CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA</b> <b>UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA</b>				<b>USAC</b> <b>TRICENTENARIA</b> <small>Universidad de San Carlos de Guatemala</small>	
O.T. No. 40601		INFORME No. 73-M					
INTERESADO: JORGE RAUL SANCHEZ TELLO							
PROYECTO: TESIS DE MAESTRIA "ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE EL COMPORTAMIENTO DE RESITENCIAS DE UNA COLUMNA UTILIZANDO CONCRETO REFORZADO CON VARILLAS DE BASALTO Y VARILLAS DE ACERO CORRUGADO.							
ASUNTO: ENSAYO DE TENSION Y DOBLADO EN BARRAS DE ACERO Y BASALTO, ENSAYO DE FLEXION EN VIGAS DE CONCRETO.							
FECHA: GUATEMALA, 08 DE OCTUBRE DE 2020.							
<b>RESULTADOS VARILLAS DE BASALTO</b>							
No. correlativo	Peso kg/m	*Diámetro mm	*Perímetro mm	*Área cm <sup>2</sup>	Espaciamiento Long mm	Ancho ribete mm	Altura mm
1	0.138	8.91	27.99	0.62	10	--	0.80
2	0.138	8.91	27.99	0.62	10	--	0.79
3	0.137	8.91	27.99	0.62	10.2	--	0.94
		<b>Esfuerzo a tensión Mpa</b>		<b>Alargamiento %</b>		<b>Prueba de doblado</b>	
		Fluencia		20 cms		No. De varilla	
		Máximo					
		--		--		03	
		228.56				No paso	
		--		--		03	
		304.48				No paso	
		--		--		03	
		286.29				No paso	

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, USAC.

Anexo 10. Resultado resistencias de vigas de concreto reforzado con acero y basalto



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, USAC.

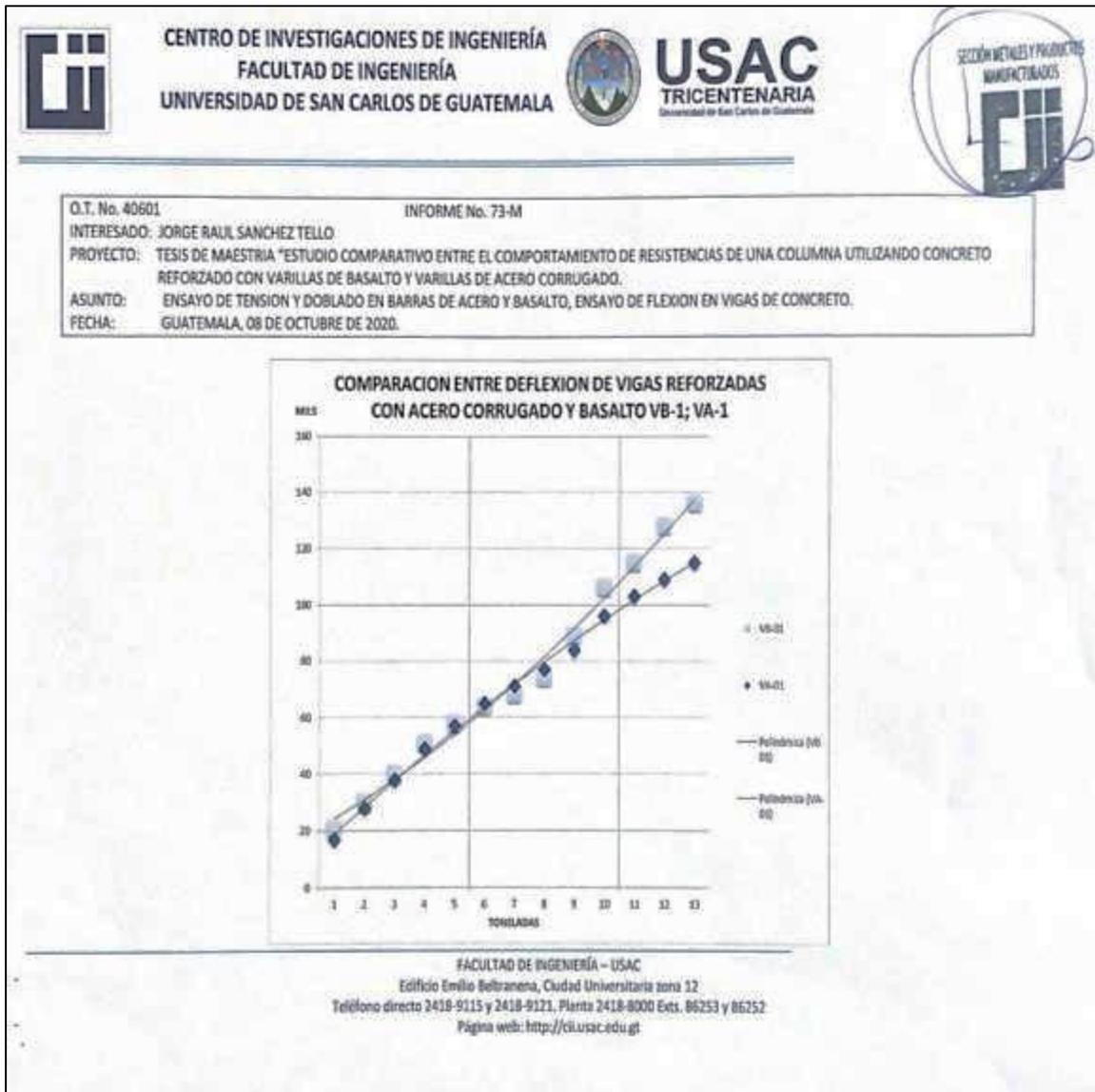
Anexo 11. Resultado deformaciones en de vigas de concreto reforzado con acero y basalto

CARGA (KG)	DEFLEXIONES VIGAS REFORZADAS CON ACERO										DEFLEXIONES VIGAS REFORZADAS CON BASALTO										
	VA-01	VA-02	VA-03	VA-04	VA-05	VA-06	VA-07	VA-08	VA-09	VA-10	VB-01	VB-02	VB-03	VB-04	VB-05	VB-06	VB-07	VB-08	VB-09	VB-10	
1000	17	17	26	26	10	10	46	46	18	18	21	21	22	22	29	29	23	23	57	57	
2000	28	28	32	32	16	16	54	54	28	28	30	30	45	45	31	31	33	33	80	80	
3000	38	38	38	38	23	23	60	60	36	36	40	40	56	56	35	35	40	40	84	84	
4000	49	49	43	43	30	30	69	69	41	41	51	51	65	65	42	42	44	44	89	89	
5000	57	57	48	48	38	38	81	81	46	46	58	58	71	71	48	48	45	45	92	92	
6000	65	65	53	53	43	43	88	88	50	50	64	64	76	76	54	54	47	47	96	96	
7000	71	71	57	57	49	49	99	99	54	54	68	68	81	81	60	60	51	51	103	103	
8000	77	77	60	60	54	54	108	108	59	59	74	74	86	86	65	65	57	57	109	109	
9000	84	84	64	64	59	59	115	115	63	63	89	89	90	90	71	71	61	61	114	114	
10000	96	96	68	68	64	64	119	119	68	68	106	106	105	105	86	86	76	76	120	120	
11000	103	103	73	73	69	69	125	125	73	73	115	115	112	112	93	93	82	82	126	126	
12000	109	109	77	77	73	73	131	131	78	78	128	128	118	118	100	100	89	89	134	134	
13000	115	115	81	81	78	78	137	137	83	83	136	136	126	126	102	102	95	95	140	140	
14000	146	146	90	90	82	82	143	143	87	87	151	151	133	133	116	116	102	102	166	166	
15000	194	194	94	94	91	91	151	151	93	93			159	159	125	125	111	111	175	175	
16000	234	234	99	99	96	96	156	156	98	98			179	179	137	137	120	120	187	187	
17000	285	285	105	105	103	103	163	163	103	103			189	189	147	147	130	130	200	200	
18000			110	110	108	108	171	171	112	112			198	198	160	160	158	158	215	215	
19000			119	119	112	112	176	176	117	117			206	206	197	197	176	176	234	234	
20000					116		181	181	124	124			227	227	212	212	209	209	255	255	
21000					120		187	187													
22000					124		192	192													
23000					129		196	196													
24000					134		202	202													
25000					158		209	209													

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

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, USAC.

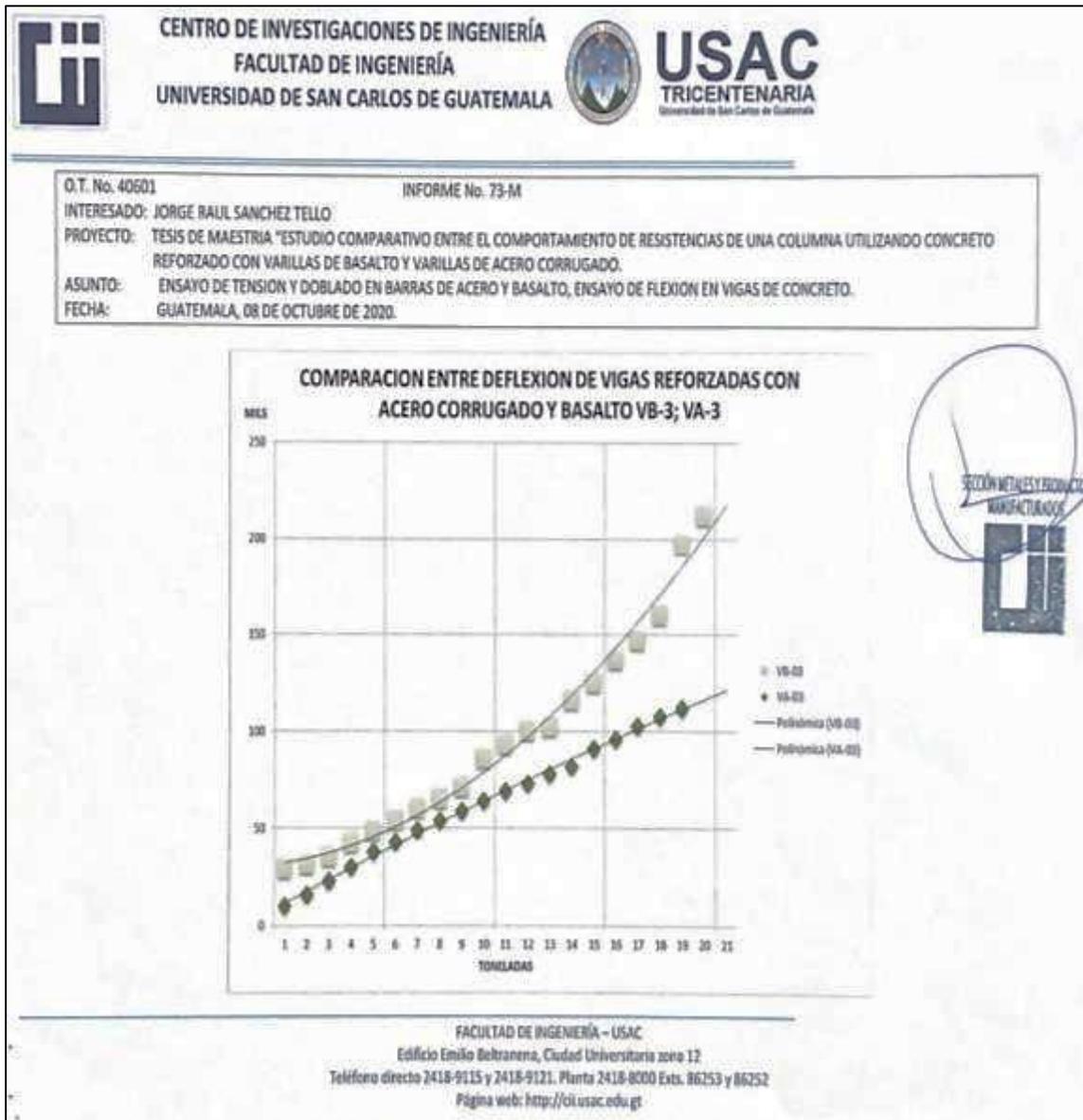
Anexo 12. **Comparación entre deflexión de vigas reforzadas con acero corrugado y basalto**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, USAC.

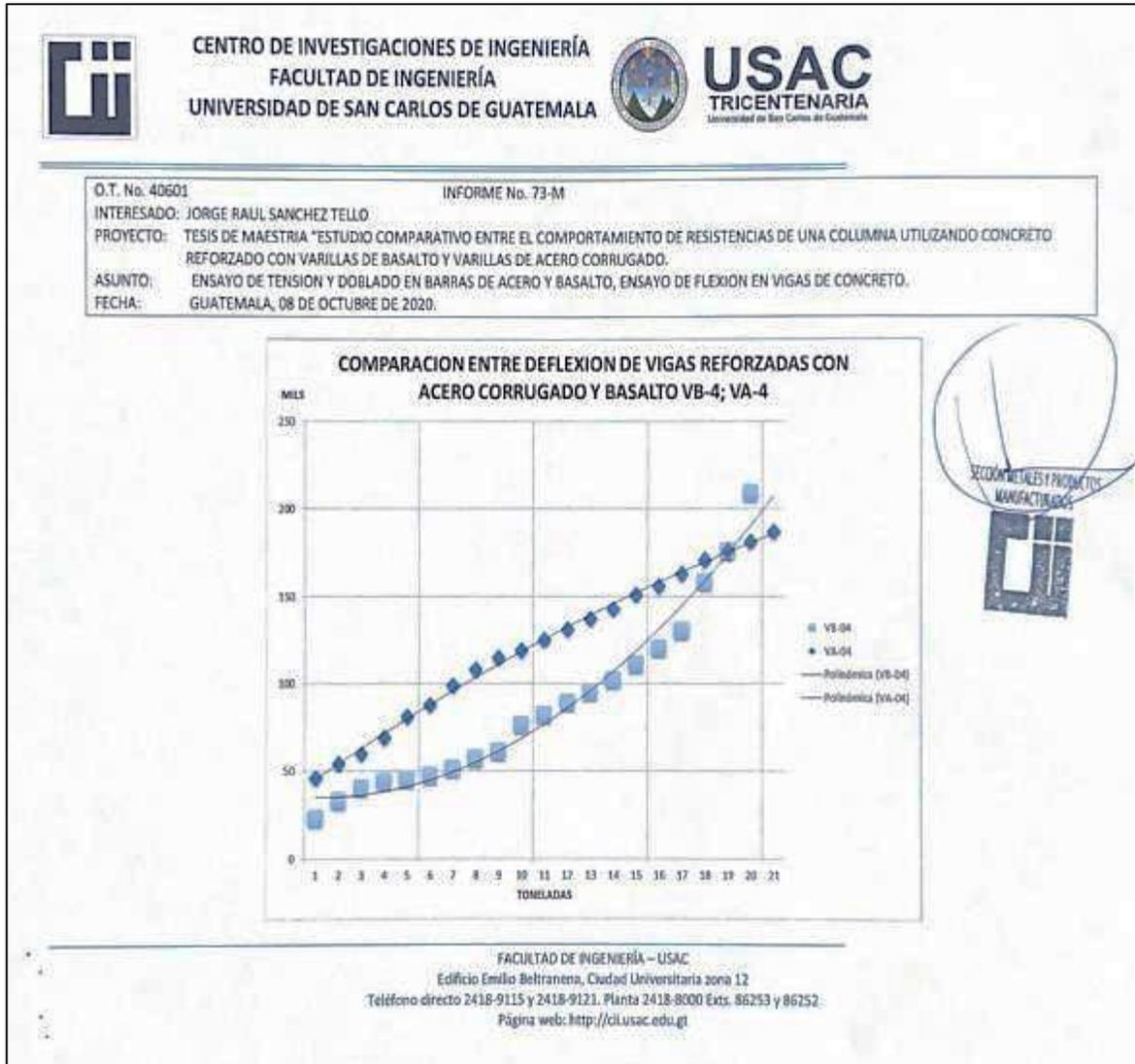


Anexo 14. **Comparación entre deflexión de vigas reforzadas con acero corrugado y basalto**



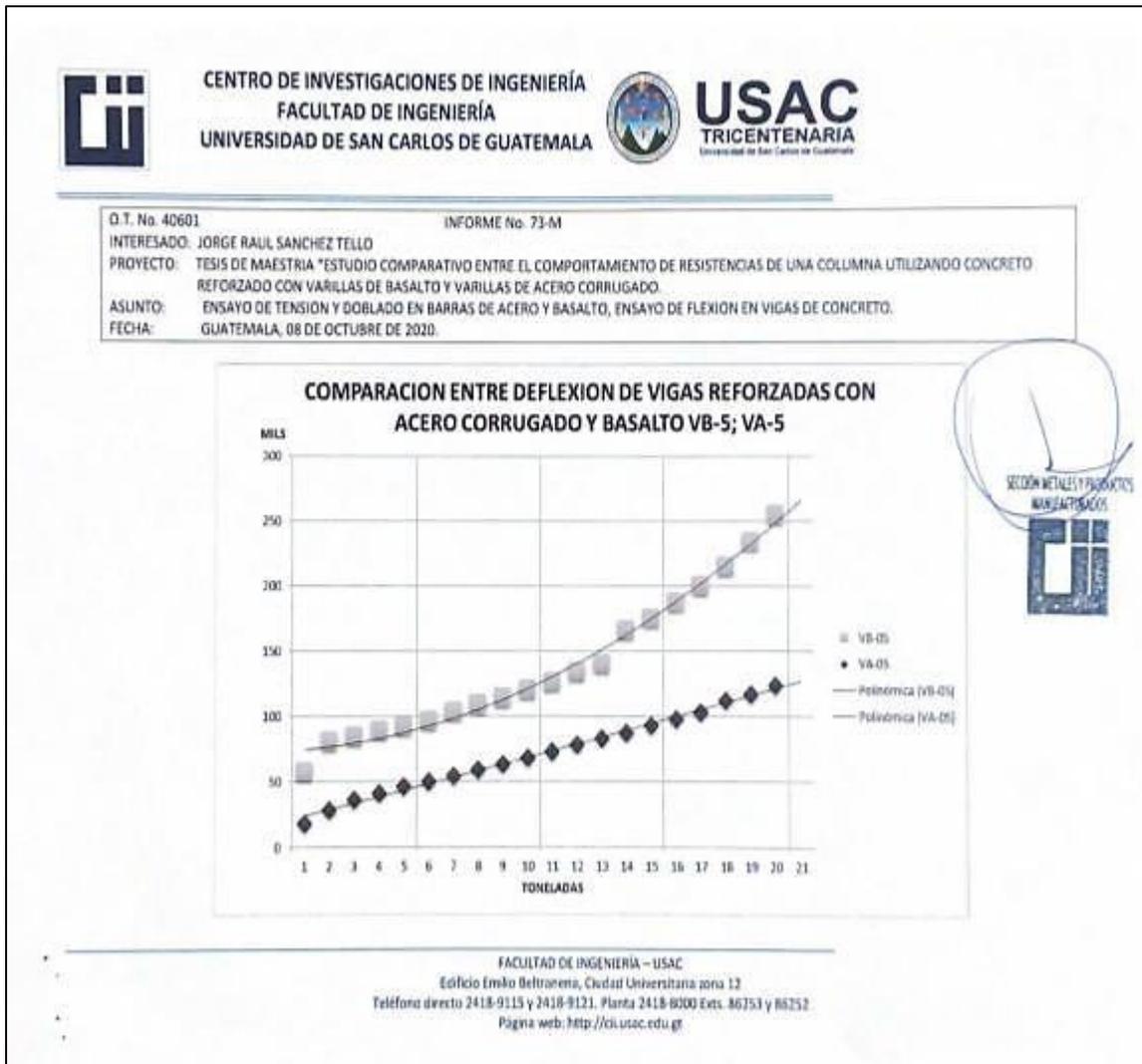
Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, USAC.

Anexo 15. **Comparación entre deflexión de vigas reforzadas con acero corrugado y basalto**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, USAC.

Anexo 16. **Comparación entre deflexión de vigas reforzadas con acero corrugado y basalto**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, USAC.

Anexo 17. **Resultado de prueba de adherencia en especímenes de concreto**



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



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

---

D.T. No. 40601 INFORME No. 73-M  
 INTERESADO: JORGE RAUL SANCHEZ TELLO  
 PROYECTO: TESIS DE MAESTRIA "ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE EL COMPORTAMIENTO DE RESISTENCIAS DE UNA COLUMNA UTILIZANDO CONCRETO REFORZADO CON VARILLAS DE BASALTO Y VARILLAS DE ACERO CORRUGADO."  
 ASUNTO: ENSAYO DE TENSION Y DOBLADO EN BARRAS DE ACERO Y BASALTO, ENSAYO DE FLEXION EN VIGAS DE CONCRETO.  
 FECHA: GUATEMALA, 08 DE OCTUBRE DE 2020.

**PRUEBA DE ADHERENCIA**

Numero de muestra	Carga Kg		Carga Lb		Tipo de falla
	Cedente	Máxima	Cedente	Máxima	
1	0.00	4,400	0.00	9,700.00	Fallo varilla
2	3,200	7,054.72	4,200	9,259.32	Fallo varilla
3	3,200	7,054.72	4,420	9,744.33	Fallo varilla

**Notas:** -Por ser el resultado dato de carga última, se recomienda utilizar el factor de seguridad que recomienda el fabricante.  
 - El presente informe unicamente es para la muestra identificada en el mismo.  
 Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

Atentamente,

  
 M.Sc. Inj. Pablo Christian De Leon  
 Jefe de Metales y Productos  


/cbr

Vo.Bo.

  
 Inga. Telma Maricela Cano Morales  
 DIRECTORA C.I.I.  


---

FACULTAD DE INGENIERÍA – USAC  
 Edificio Esillo Beltrameña, Ciudad Universitaria zona 12  
 Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Ext. 86253 y 86252  
 Página web: <http://ci.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, USAC.

Anexo 18. **Calibración de jacking system para ensayo pull-out**

FORCAM-GDC-006-A  
OM 216-VA-1



CONLAB, S.A. - 10 avenida 16-86 "C" zona 11, - Tel. 2473.2332 - Email: info@conlab.com.gt

<b>CUSTOMER / CLIENTE:</b>	Ing. Raúl Sanchez	<b>DATE / FECHA:</b>	26/10/20
<b>PROJECT / PROYECTO:</b>	Estudio Comparativo entre el Comportamiento de Resistencias de una Columna y Viga Utilizando Concreto Reforzado con Varillas de Basalto y Concreto Reforzado con Varillas de Acero Corrugado.		
<b>ADDRESS / DIRECCIÓN:</b>	Guatemala		
<b>SAMPLE TYPE / TIPO DE MUESTRA:</b>	Varilla de Acero 3		
<b>TECHNICIAN WHO PERFORMED TESTS / LABORATORISTA:</b>	José Mazariegos		

D-tendon	0.375 in	0.95 cms
A-tendon	0.110 in <sup>2</sup>	0.71 cm <sup>2</sup>
Fluencia	75000 psi	5284 kg/cm <sup>2</sup>
Fluencia	517 Mpa	36 kg/cm <sup>2</sup>

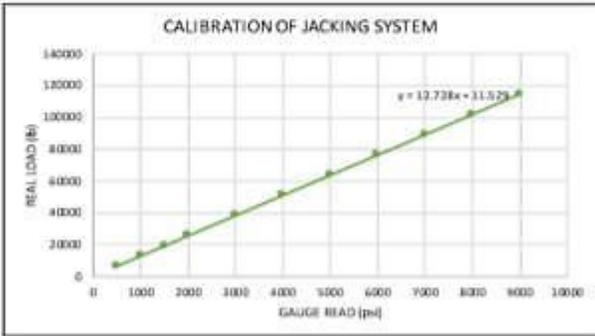
  

Load (lb)	Gauge Read (psi)	Hold Time (min)
2557	200	1
5103	400	UMS
7648	600	UMS
10194	800	UMS
12740	1000	UMS
15285	1200	UMS
17831	1400	UMS
20376	1600	UMS
22922	1800	UMS
25468	2000	UMS

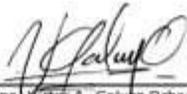
\*UMS = Until Movement Stabilizes  
 \*\* Recorded at 1, 2, 5 and 10 minutes  
 \*\*\* Recorded at 1, 2, 5, 10, 20, 30, 50 and 60 minutes

Calibration Chart - 60 Ton RAM

GUAGE READ (psi)	CALCULATED LOAD (lb)	REAL LOAD (lb)	ERROR %
500	6365	6363	-0.04%
1000	12730	12738	0.06%
1500	19095	19110	-0.08%
2000	25460	25490	-0.12%
3000	38190	38245	-0.14%
4000	50920	50960	-0.08%
5000	63650	63583	0.11%
6000	76380	76298	0.11%
7000	89110	89083	0.03%
8000	101840	101820	0.02%
9000	114570	114643	-0.07%



\_\_\_\_\_  
José Mazariegos  
Técnico



\_\_\_\_\_  
Ing. Víctor A. Galvez Ochoa  
Colegiado 6269  
Gerente de Laboratorio

Fuente: CONLAB, S.A.



Anexo 20. Calibración de *jacking system* para ensayo *pull-out*

FORCAM-GDC-006-A  
OM 216-VA-2



CONLAB, S.A. - 10 avenida 16-86 "C" zona 11, - Tel. 2473.2332 - Email: info@conlab.com.gt

---

<b>CUSTOMER / CLIENTE:</b> Ing. Raúl Sanchez	<b>DATE / FECHA:</b> 26/10/20
<b>PROJECT / PROYECTO:</b> Estudio Comparativo entre el Comportamiento de Resistenias de un Columna y Viga Utilizando Concreto Reforzado con Varillas de Basalto y Concreto Reforzado con Varillas de Acero Corrugado.	
<b>ADDRESS / DIRECCIÓN:</b> Guatemala	
<b>SAMPLE TYPE / TIPO DE MUESTRA:</b> Varilla de Acero 2	
<b>TECHNICIAN WHO PERFORMED TESTS / LABORATORISTA:</b> José Mazariegos	

D-tendon	0.375	in	0.95	cms
A-tendon	0.110	in <sup>2</sup>	0.71	cm <sup>2</sup>
Fluencia	75000	psi	5284	kg/cm <sup>2</sup>
Fluencia	517	Mpa	36	kg/cm <sup>2</sup>

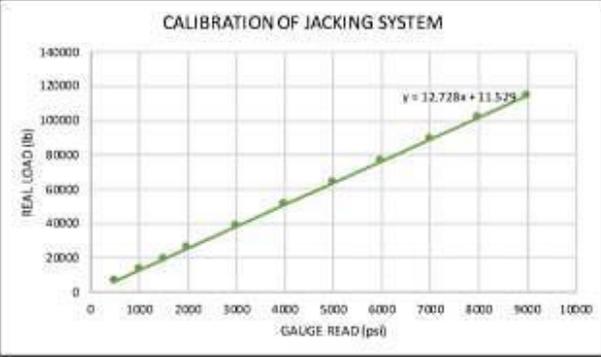
Load (lb)	Gauge Read (psi)	Hold Time (min)
2557	200	1
5103	400	UMS
7648	600	UMS
10194	800	UMS
12740	1000	UMS
15285	1200	UMS
17831	1400	UMS
20376	1600	UMS
22922	1800	UMS
25468	2000	UMS

\*UMS = Until Movement Stabilizes  
 \*\* Recorded at 1, 2, 5 and 10 minutes  
 \*\*\* Recorded at 1, 2, 5, 10, 20, 30, 50 and 60 minutes

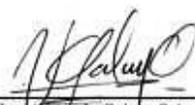
---

Calibration Chart - 60 Ton RAM

GAUGE READ (psi)	CALCULATED LOAD (lb)	REAL LOAD (lb)	ERROR %
500	6365	6363	0.04%
1000	12730	12738	-0.06%
1500	19095	19110	-0.08%
2000	25460	25490	-0.12%
3000	38190	38245	-0.14%
4000	50920	50960	-0.08%
5000	63650	63583	0.11%
6000	76380	76298	0.11%
7000	89110	89083	0.03%
8000	101840	101820	0.02%
9000	114570	114645	-0.07%



\_\_\_\_\_  
José Mazariegos  
Técnico

  
 \_\_\_\_\_  
 Ing. Víctor A. Galvez Ochoa  
 Colegiado 6269  
 Gerente de Laboratorio

Fuente: CONLAB, S.A.



Anexo 22. Calibración de *jacking system* para ensayo *pull-out*

FORCAM-GDC-006-A  
OM 216-VB-1



CONLAB, S.A. - 20 avenida 16-86 "C" zona 11, - Tel. 2473.2332 - Email: info@conlab.com.gt

CUSTOMER / CLIENTE: Ing. Raul Sanchez	DATE / FECHA: 26/10/20
PROJECT / PROYECTO: Estudio Comparativo entre el Comportamiento de Resistencias de un Columna y Viga Utilizando Concreto Reforzado con Varillas de Basalto y Concreto Reforzado con Varillas de Acero Corrugado.	
ADDRESS / DIRECCIÓN: Guatemala	
SAMPLE TYPE / TIPO DE MUESTRA: Varilla de Basalto 1	
TECHNICIAN WHO PERFORMED TESTS / LABORATORISTA: José Mazariegos	

D-tendon	0.375 in	0.95 cms
A-tendon	0.110 in <sup>2</sup>	0.71 cm <sup>2</sup>
Fluencia	75000 psi	5284 kg/cm <sup>2</sup>
Fluencia	517 Mpa	36 kg/cm <sup>2</sup>

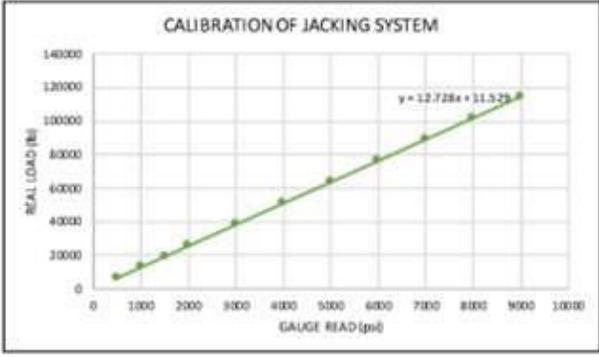
Load (lb)	Gauge Read (psi)	Hold Time (min)
2557	200	1
5103	400	UMS
7648	600	UMS
10194	800	UMS
12740	1000	UMS
15285	1200	UMS
17831	1400	UMS
20376	1600	UMS
22922	1800	UMS
25468	2000	UMS

\*UMS = Until Movement Stabilizes  
 \*\* Recorded at 1, 2, 5 and 10 minutes  
 \*\*\* Recorded at 1, 2, 5, 10, 20, 30, 50 and 60 minutes

---

Calibration Chart - 60 Ton RAM

GAUGE READ (psi)	CALCULATED LOAD (lb)	REAL LOAD (lb)	ERROR %
500	6365	6363	0.04%
1000	12730	12738	-0.06%
1500	19095	19110	-0.08%
2000	25460	25490	-0.12%
3000	38190	38245	-0.14%
4000	50920	50960	-0.08%
5000	63650	63583	0.11%
6000	76380	76298	0.11%
7000	89110	89083	0.03%
8000	101840	101820	0.02%
9000	114570	114645	-0.07%



\_\_\_\_\_  
José Mazariegos  
Técnico

\_\_\_\_\_  
Ing. Victor A. Galvez Ochoa  
Colegiado 6259  
Gerente de Laboratorio

Fuente: CONLAB, S.A.



Anexo 24. **Calibración de jacking system para ensayo pull-out**

FORCAM-GDC-006-A  
OM 216-VB-1



CONLAB, S.A. - 10 avenida 16-86 "C" zona 11, - Tel. 2473.2332 - Email: info@conlab.com.gt

<b>CUSTOMER / CLIENTE:</b>	Ing. Raúl Sanchez	<b>DATE / FECHA:</b>	26/10/20
<b>PROJECT / PROYECTO:</b>	Estudio Comparativo entre el Comportamiento de Resistencias de un Columna y Viga Utilizando Concreto Reforzado con Varillas de Basalto y Concreto Reforzado con Varillas de Acero Corrugado.		
<b>ADDRESS / DIRECCIÓN:</b>	Guatemala		
<b>SAMPLE TYPE / TIPO DE MUESTRA:</b>	Varilla de Basalto 2		
<b>TECHNICIAN WHO PERFORMED TESTS / LABORATORISTA:</b>	José Mazariegos		

D-tendon	0.375	in	0.95	cms
A-tendon	0.110	in <sup>2</sup>	0.71	cm <sup>2</sup>
Fluencia	75000	psi	5284	kg/cm <sup>2</sup>
Fluencia	517	Mpa	36	kg/cm <sup>2</sup>

Load (lb)	Gauge Read (psi)	Hold Time (min)
2557	200	1
5103	400	UMS
7648	600	UMS
10194	800	UMS
12740	1000	UMS
15285	1200	UMS
17831	1400	UMS
20376	1600	UMS
22922	1800	UMS
25468	2000	UMS

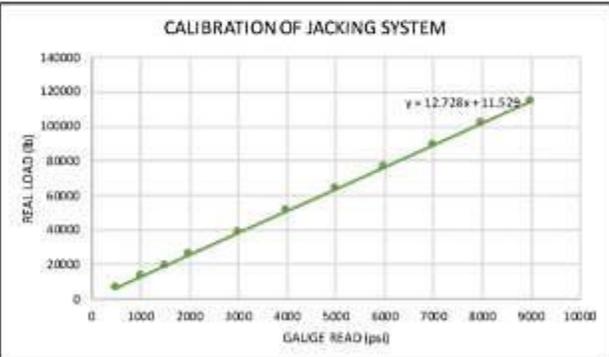
\*UMS = Until Movement Stabilizes  
 \*\* Recorded at 1, 2, 5 and 10 minutes  
 \*\*\* Recorded at 1, 2, 5, 10, 20, 30, 50 and 60 minutes

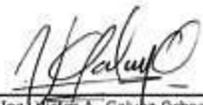
---

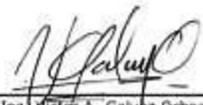
Calibration Chart - 60 Ton RAM

GAUGE READ (psi)	CALCULATED LOAD (lb)	REAL LOAD (lb)	ERROR %
500	6365	6363	0.04%
1000	12730	12738	-0.06%
1500	19095	19110	-0.08%
2000	25460	25490	-0.12%
3000	38190	38245	-0.14%
4000	50920	50960	-0.08%
5000	63650	63583	0.11%
6000	76380	76298	0.11%
7000	89110	89083	0.03%
8000	101840	101820	0.02%
9000	114570	114645	-0.07%



  
 José Mazariegos  
 Técnico

  
 Ing. Víctor A. Galvez Ochoa  
 Colegiado 6269  
 Gerente de Laboratorio

Fuente: CONLAB, S.A.



Anexo 26. **Factura compra de barras de basalto a SMARTER BUILDING SYSTEMS**

SMARTER BUILDING SYSTEMS LLC					
4 Porter Ave. Newport, RI 02840 USA   Phone: 401.481.8422   Email: nick@smarter-building-systems.com					
<b>INVOICE #</b>	001-UnivSanCarlosGuatemala	<b>DATE:</b>	March 4, 2020		
<b>CUSTOMER</b>	Raúl Sánchez	<b>PO#:</b>			
<b>EMAIL</b>	raul.sanchez@binarq.com	<b>PHONE:</b>	(502) 56980077		
<b>COMPANY</b>	University San Carlos de Guatemala				
<b>BILLING DETAILS</b>	PayPal Invoice	<b>TERMS:</b>	On Receipt		
<b>SHIPPING ADDRESS</b>	Paula Guzman   Traffic Department Agency International Forwarding Inc. 8500 NW 30th Terrace Miami, FL 33122 ( USA ) 305-513-4142   305-513-4850 pguzman@aiforwarding.com				
PRO-FORMA INVOICE					
PRODUCT ID	PRODUCT NAME & DESCRIPTION	QTY	UNIT	PRICE	TOTAL
BRB-10	<b>Basalt rebar, diameter 10mm.</b> 30 lengths, each 2.4 meters	72	METER	\$5.38	\$387.29
CUTTING	<b>Cutting Fee</b>				\$40.00
<b>NOTES:</b>				<b>SUBTOTAL</b>	\$427.29
	Ship FedEx Ground			<b>SALES TAX</b>	\$0.00
				<b>SHIPPING</b>	\$71.87
				<b>TOTAL US\$</b>	<b>\$499.16</b>
<p><b>PRICE QUOTES-</b> Materials quote valid for 7 days unless noted otherwise. Shipping quote valid for 7 days (domestic), 1-2 days (international). Final costs to be confirmed at time of order completion. Unit prices based on total order. Quantity changes may change unit prices. Final price may be adjusted for current shipping costs and/or changes to customs tariffs where applicable.</p> <p><b>REFUND &amp; RETURN POLICY</b> All orders are classified as custom, therefore not eligible for return or payment refund. If product supplied is proven to be damaged a refund will be made.</p> <p><b>GENERAL TERMS &amp; CONDITIONS</b> 1. All terms are EXW (Ex-works INCOTERMS 2012); PURCHASERS is to arrange for own shipping or to specify shipping details (ie., Carrier, Type, etc.) a. Should the PURCHASER request Smarter Building Systems LLC (SBS) to make the necessary shipping arrangements, SBS will provide the PURCHASER with an estimate of the shipping charges. All Shipping Charges are due in full upon Invoice. <i>International orders: PURCHASER responsible for all customs duties/import taxes/fees unless stated otherwise above.</i> b. For Shipping and Customs, the proper HTS (HS) code to use for Basalt products is 6815.99.4000 2. Payment Terms: Payment with Order (unless otherwise agreed to by Smarter Building Systems LLC). 3. Smarter Building Systems LLC has the right to change prices without prior notice. Final pricing, volumes &amp; weights to be confirmed at time of order.</p> <p><b>PAYMENT TYPES ACCEPTED:</b> MASTERCARD, VISA, DISCOVER, AMEX, PAYPAL, COMPANY CHECK, ACH BANK DEPOSIT/ WIRE TRANSFER.</p>					

Fuente: Smarter Building Systems.