



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

**COMPARACIÓN DE RESISTENCIA A FLEXIÓN ENTRE VIGAS DE CONCRETO
REFORZADO FUNDIDAS CON SISTEMA FORMAVIGA Y MÉTODOS TRADICIONALES**

Juan Sebastian Vásquez Henning
Asesorado por el Ing. Juan Luis Vásquez Asturias

Guatemala, noviembre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPARACIÓN DE RESISTENCIA A FLEXIÓN ENTRE VIGAS DE CONCRETO
REFORZADO FUNDIDAS CON SISTEMA FORMAVIGA Y MÉTODOS TRADICIONALES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JUAN SEBASTIAN VÁSQUEZ HENNING

ASESORADO POR EL ING. JUAN LUIS VÁSQUEZ ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Córdova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADORO	Ing. Dennis Salvador Argueta Mayorga
EXAMINADOR	Ing. Dario Francisco Lucas Mazariegos
EXAMINADOR	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

COMPARACIÓN DE RESISTENCIA A FLEXIÓN ENTRE VIGAS DE CONCRETO REFORZADO FUNDIDAS CON SISTEMA FORMAVIGA Y MÉTODOS TRADICIONALES

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 13 de mayo del 2020.

Juan Sebastian Vásquez Henning

Guatemala, 07 de octubre de 2021.

Ingeniero.

Hugo Montenegro.

Coordinador de Materiales de Construcción y Obras Civiles.

Estimado Ingeniero Montenegro.

Por este medio le saludo y deseo éxitos en sus actividades. El motivo de la presente es para dejar constancia que he revisado y aprobado el informe final del trabajo de graduación titulado: "Comparación de resistencia a flexión entre vigas de concreto reforzado fundidas con sistema de Formaviga y métodos tradicionales de fundición in situ", elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Civil, Juan Sebastian Vasquez Henning, quien se identifica con el registro académico 201504541 y con el CUI 2995 63146 0101.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo.

Atentamente,



Juan Luis Vásquez Asturias.

Ingeniero Civil.

Asesor.

JUAN LUIS VASQUEZ ASTURIAS
INGENIERO CIVIL
COLEGIADO 3155



Guatemala, 7 de octubre de 2021

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

Estimado Ingeniero Fuentes,

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **“COMPARACIÓN DE RESISTENCIA A FLEXIÓN ENTREVIGAS DE CONCRETO REFORZADO FUNDIDAS CON SISTEMA FORMAVIGA Y MÉTODOS TRADICIONALES”**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil **Juan Sebastian Vásquez Henning**, quién contó con la asesoría del Ing. Juan Luis Vásquez Asturias.

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

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco
Coordinador del área de Materiales de Construcción y obras civiles

FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC





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

El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Juan Luis Vásquez Asturias y del Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco al trabajo de graduación del estudiante Juan Sebastian Vásquez Henning **COMPARACIÓN DE RESISTENCIA A FLEXIÓN ENTRE VIGAS DE CONCRETO REFORZADO FUNDIDAS CON SISTEMA FORMAVIGA Y MÉTODOS TRADICIONALES**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Sin otro particular, le saludo muy atentamente.

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Armando Fuentes Roca

Director Escuela Ingeniería Civil

Guatemala, noviembre 2021

/mrrm.

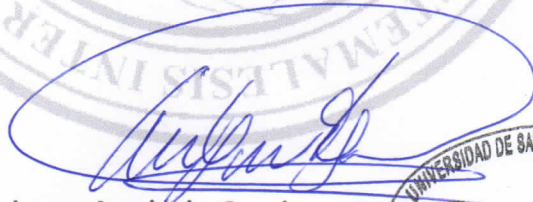


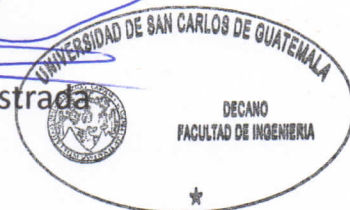


DTG.614.2021

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 Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **COMPARACIÓN DE RESISTENCIA A FLEXIÓN ENTRE VIGAS DE CONCRETO REFORZADO FUNDIDAS CON SISTEMA FORMAVIGA Y MÉTODOS TRADICIONALES**, presentado por el estudiante universitario: **Juan Sebastian Vásquez Henning**, 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, noviembre de 2021

AACE/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por la vida y las oportunidades.

Mis padres

Stephanie Henning y Juan Luis Vásquez, por su amor y apoyo incondicional durante toda mi vida.

Mis abuelos

Por sus consejos y apoyo.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi <i>alma mater</i> y lugar para formarme como profesional.
Facultad de Ingeniería	Por formarme y darme las herramientas para afrontar y resolver las diversas problemáticas que afectan al país.
Mi padre	Por su guía como asesor en esta investigación, y por todas las enseñanzas a lo largo de la carrera y la vida.
Mis hermanas	Por su apoyo y cariño.
Mi familia	Por ser una importante influencia en mi vida y por los valores que me han inculcado.
Mis amigos	Por su apoyo y por todos los momentos vividos que han hecho de estos años de estudios más placenteros.
Mi novia	Melissa Brenes, por su apoyo y cariño incondicional.

PreCon

Por su apoyo brindado durante este trabajo de investigación, y por ser el lugar donde se me dio la oportunidad de iniciar mi carrera como profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. CONCRETO REFORZADO	1
1.1. Generalidades del concreto reforzado.....	1
1.2. Propiedades del concreto reforzado.....	2
1.2.1. Resistencia a compresión.....	2
1.2.2. Resistencia a tensión.....	4
1.2.2.1. Módulo de ruptura del concreto	4
1.2.2.2. Prueba radial (hendido)	5
1.2.3. Resistencia a corte	5
1.2.4. Tenacidad.....	5
2. MIEMBROS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A FLEXION SIMPLE.....	7
2.1. Vigas de concreto reforzado.....	7
2.1.1. Tipos de vigas.....	7
2.2. Vigas sometidas a flexión	9
2.3. Tipos de fallas por flexión	10
2.3.1. Falla por tensión	10
2.3.2. Falla por compresión	10

2.3.3.	Falla balanceada	11
2.4.	Resistencia y deformación de miembros sometidos a cortante	12
2.5.	Deformación máxima y ductilidad de miembros sometidos a flexión.....	12
2.5.1.	Control de deflexiones.....	13
2.5.1.1.	Servicio de las estructuras	13
2.5.1.2.	Efectos sobre elementos no estructurales.....	13
2.5.1.3.	Efectos sobre elementos estructurales.....	14
2.6.	Métodos de fabricación de los elementos	14
2.6.1.	Fundición in situ	15
2.6.1.1.	Colocación de formaleta y entarimado en obra	17
2.7.	Prefabricados	18
2.7.1.	Elementos pretensados.....	19
2.7.2.	Elementos postensados	20
2.7.3.	Formaviga de PreCon	21
3.	ENSAYO DE FLEXION DE VIGAS DE CONCRETO REFORZADO	25
3.1.	Descripción del ensayo	25
3.2.	Muestreo	25
3.3.	Equipo	26
3.4.	Procedimiento del ensayo	26
3.5.	Cálculos	26
4.	MARCO METODOLOGICO	29
4.1.	Enfoque.....	29

4.2.	Propuesta de vigas	29
4.3.	Diseño de vigas	29
4.3.1.	Dimensiones	30
4.3.2.	Diseño por flexión	30
4.3.2.1.	Cálculos	31
5.	FABRICACION Y ENSAYO DE VIGAS	35
5.1.	Fabricación de los elementos	35
5.1.1.	Formavigas	35
5.1.2.	Vigas tradicionales.....	45
5.2.	Ensayo de vigas	49
5.2.1.	Material y equipo a utilizar	49
5.2.2.	Procedimiento de ensayo	49
6.	RESULTADOS	51
6.1.	Ensayos previos	51
6.1.1.	Resistencia a compresión de los testigos de concreto	51
6.2.	Vigas fundidas por método tradicional.....	52
6.2.1.	Carga y deflexión	52
6.2.2.	Gráficas	53
6.2.3.	Análisis de resultados.....	55
6.2.4.	Módulo de ruptura.....	58
6.3.	Vigas fundidas con sistema de formaviga	58
6.3.1.	Carga y deflexión.....	59
6.3.2.	Gráficas	60
6.3.3.	Análisis de resultados.....	62
6.3.4.	Módulo de ruptura.....	64
6.4.	Comparación de resultados.....	65

6.4.1.	Carga máxima soportada	66
6.4.2.	Módulo de ruptura	66
6.4.3.	Deformación máxima de los elementos	67
7.	INTEGRACIÓN DE COSTOS Y TIEMPOS DE EJECUCIÓN	69
7.1.	Comparación de tiempos	69
7.1.1.	Vigas tradicionales	69
7.2.	Programa de ejecución	73
7.2.1.	Vigas fundidas in situ	73
7.2.2.	Sistema de formavigas	74
7.3.	Análisis de resultados	76
7.3.1.	Ventajas del sistema prefabricado de formavigas ...	77
7.3.2.	Desventajas del sistema prefabricado de formavigas.....	79
	CONCLUSIONES.....	81
	RECOMENDACIONES	83
	BIBLIOGRAFÍA.....	85
	ANEXOS.....	89

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Curva de esfuerzo-deformación unitaria del concreto	3
2.	Viga de borde	8
3.	Viga interior	9
4.	Tipos de fallas en vigas	11
5.	Fundición in situ de vigas y losa	16
6.	Encofrado y entarimado de elementos en obra	17
7.	Instalación de viga pretensada	20
8.	Instalación de segmentos de viga postensada en puente	21
9.	Detalle de ormaviga	23
10.	Armado de formaviga	36
11.	Moldura de formavigas	37
12.	Moldura de formavigas	38
13.	Colocación de armado y formaleta para formavigas	39
14.	Fundición de formavigas	40
15.	Formaviga desencofrada antes y después de lavar a presión (superficie interna rugosa)	41
16.	Detalle testigos de formaviga	42
17.	Testigos de formaviga	43
18.	Formavigas fundidas	44
19.	Formavigas desencofradas	44
20.	Detalle de diseño de vigas	45
21.	Armado de acero de refuerzo en vigas tradicionales	46
22.	Colocación de armadura en molde	47

23.	Fundición de vigas tradicionales	47
24.	Vigas tradicionales fundidas	48
25.	Colocación de formaviga para ensayo	50
26.	Gráfica carga - deflexión de viga tradicional 1	54
27.	Gráfica carga - deflexión de viga tradicional 2	54
28.	Ensayo viga 01 tradicional	56
29.	Ensayo viga 02 tradicional	57
30.	Gráfica carga - deflexión de formaviga 1	61
31.	Gráfica carga - deflexión de formaviga 2	61
32.	Ensayo formaviga 1	63
33.	Ensayo formaviga 2	64
34.	Planta ejemplo para análisis de costos	72
35.	Detalle de vigas para análisis de costos	72

TABLAS

I.	Dimensiones de vigas	30
II.	Datos de diseño	31
III.	Resistencia teórica de elementos	34
IV.	Resultados de ensayos a compresión de cilindros de concreto de formavigas (casarón)	51
V.	Resultados de ensayos a compresión de cilindros de concreto de vigas	52
VI.	Carga y deflexiones en vigas tradicionales	53
VII.	Módulo de ruptura de vigas tradicionales	58
VIII.	Carga y deflexiones en formavigas	59
IX.	Módulo de ruptura de formavigas	65
X.	Comparación de la carga máxima	66
XI.	Comparación del módulo de ruptura	66

XII.	Deflexión máxima.....	67
XIII.	Dimensiones de vigas con sistema in situ.....	73
XIV.	Tiempo de ejecución para método in situ.....	73
XV.	Integración de costo directo método in situ	74
XVI.	Dimensiones de vigas con formaviga.....	75
XVII.	Tiempo de ejecución con sistema de formavigas.....	75
XVIII.	Integración de costo directo sistema formaviga	76
XIX.	Diferencia en costo de mano de obra.....	77

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
@	A cada
As	Área de acero
Cm ²	Centímetros cuadrados
Kg-m	Kilogramo metro
Lbf	Libras fuerza
Lb/pulg ²	Libra por pulgada cuadrada
fy	Límite de fluencia del acero
MPa	Mega pascal
MR	Módulo de ruptura
Mu	Momento último
N	Newton
No.	Número de octavos de pulgada de la varilla de acero
f'c	Resistencia a la compresión del concreto

GLOSARIO

Acero de refuerzo	Varillas de acero, alambre, o mallas que se funden con los elementos de concreto con el fin de aportar resistencia a los esfuerzos.
ACI	American Concrete Institute (Instituto Americano del Concreto).
ASTM	Sociedad americana para el ensayo e inspección de los materiales (American Society for Testing and Materials).
Carga	Fuerza que incide directamente sobre las estructuras generando esfuerzos, que causan movimientos y deformaciones de estas.
COGUANOR	Comisión Guatemalteca de Normas, es el organismo nacional de normalización y certificación de Guatemala.
Compresión	Esfuerzo causado por la aplicación de una carga o cargas, que tienden a aplastar o reducir el volumen de un elemento.
Concreto	Mezcla de un aglomerante (generalmente cemento), agregados gruesos y finos, agua, y aditivos.

Concreto reforzado	Combinación del concreto y acero en un mismo elemento.
Deformación	Cambio en el tamaño o forma de un cuerpo al ser sometido a esfuerzos.
Esfuerzo	Medida de la fuerza aplicada por unidad de área en la sección transversal de un elemento.
Falla	Defecto de un material o elemento, en donde pierde su integridad estructural.
Flexión	Esfuerzo producido en un elemento debido a fuerzas o cargas aplicadas en dirección perpendicular al eje longitudinal.
Formaleta	Molde para contener el concreto en estado plástico mientras endurece y que le da la forma del elemento a medida que el concreto fragua.
Formaviga	Elemento de concreto reforzado prefabricado, en forma de “U” que sirve como formaleta y parte del elemento estructural, para formar una viga de concreto reforzado.
Fundición in situ	Fundición de concreto realizada en la ubicación final de los elementos de concreto reforzado.

Losa	Elemento estructural de cubierta, que tiene la función de transmitir las cargas a los elementos tipo viga.
Luz libre	Distancia libre entre los apoyos que soportan un elemento estructural.
Módulo de ruptura	Tensión máxima que puede soportar un elemento causada por la aplicación de cargas que generan tensión.
Obra falsa	Son todos los materiales y equipos que sirven para sostener un elemento mientras este no pueda soportar su propio peso. Esto incluye formaleta, puntales, <i>trickets</i> , parales de madera, tablones, entre otros.
Postensado	Elementos estructurales que se les aplica un esfuerzo de compresión mediante cables de presfuerzo que se tensan posterior a la fundición del elemento.
Prefabricado	Elemento de concreto reforzado fabricado previamente a su puesta en servicio en obra o ubicación final.
Presforzado	Elementos de concreto reforzado que están sometidos a un esfuerzo de compresión inducido, con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas.

Pretensado

Elementos estructurales de concreto reforzado que se les aplica un esfuerzo de compresión mediante cables de presfuerzo previamente tensados antes de fundir el elemento.

Viga

Elemento estructural que tiene la función de transmitir las cargas verticales de las losas hacia las columnas.

RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se describen y comparan procesos constructivos para vigas de concreto reforzado elaborados mediante dos métodos, fundición in situ y sistema prefabricado de formaviga. Se analiza el comportamiento de estos elementos al ser sometidos a un ensayo de flexión simple, y se comparan los resultados entre ambos sistemas.

El capítulo uno describe al lector las generalidades del concreto reforzado con sus características y propiedades, también se mencionan los ensayos básicos para determinar las propiedades mecánicas del concreto.

El capítulo dos describe los elementos de concreto reforzado tipo viga y se describen algunos tipos de estas, así también como sus propiedades y características estructurales. También se describen los dos sistemas de fabricación de estos elementos: fundición tradicional in situ, y prefabricados.

Al final de este capítulo se describe el sistema de formavigas, patentado por la empresa PreCon, y se detalla el proceso de fabricación de este, características, y ejemplos de aplicación.

El capítulo tres describe el método de ensayo realizado en este trabajo, que corresponde a un ensayo de flexión simple para un elemento de concreto reforzado tipo viga.

En el capítulo cuatro y cinco se detalla el cálculo para el diseño de las vigas a ensayar, el proceso de fabricación de estas, y el procedimiento de ensayo de

las probetas. Para los ensayos se decidió someter dos vigas de concreto reforzado por cada tipo de sistema, haciendo un total de cuatro vigas.

En el capítulo seis describe los resultados obtenidos de los ensayos. Aquí se analizan los resultados de deflexión y módulo de ruptura para cada viga, y se presenta una comparación entre los resultados de una pareja de vigas fabricadas con un sistema y el otro.

Para finalizar, en el capítulo siete se presenta una integración de costos y tiempos para una edificación ficticia, creada con fines de ejemplo para presentar una comparativa entre un sistema constructivo y otro, y en base a esto demostrar las ventajas económicas y de ahorro de tiempo que pueden darse al utilizar un método u otro.

OBJETIVOS

General

Realizar un análisis para determinar las diferencias de utilizar un sistema tradicional de construcción de vigas de concreto reforzado y el sistema prefabricado de formavigas.

Específicos

1. Analizar el comportamiento de las vigas tradicionales y las del sistema de formavigas sometidas a cargas que generen flexión simple.
2. Describir las diferencias de utilizar un sistema prefabricado de formavigas y un sistema tradicional de vigas fundidas in situ en una obra de construcción.
3. Comparar ventajas y desventajas de utilizar un método frente al otro.
4. Comparar tiempos de ejecución y costos de obra al utilizar un método tradicional y un sistema de formavigas.

INTRODUCCIÓN

El concreto armado es ampliamente utilizado como elemento estructural en las construcciones de obra civil en Guatemala. Su uso se popularizó por su buena respuesta estructural ante los terremotos de 1917 y 1918, como sus beneficios comparados a otros materiales de construcción y su buen desempeño ante cargas de servicio en estructuras.

Se basa en el criterio de varias investigaciones que han definido métodos para su diseño en los que se determina el área de sección de concreto más su refuerzo de acero. Lo anterior es en función de las cargas de servicio que actúan sobre cada elemento y la reacción que este va a ejercer ante dichas cargas de diseño.

Con enfoque en los elementos estructurales tipo viga de sección rectangular, su diseño considera únicamente al acero y al concreto en conjunto para satisfacer una unidad estructural.

Para investigar esta variante de las vigas, se tiene como uno de los objetivos analizar el comportamiento de las vigas elaboradas por métodos tradicionales contra el sistema de vigas prefabricado llamado "Forma Viga" patentado por la empresa PreCon. Esta comparación abarca, en este trabajo, la condición de resistencia de cargas que generan flexión simple en los elementos.

En este trabajo de graduación se pretende manufacturar y ensayar elementos de concreto reforzados resistentes a flexión elaborados por ambos métodos, en donde se espera que las propiedades mecánicas de estos no varíen

entre los diferentes testigos. Esto favorecería la hipótesis que el sistema prefabricado formaviga de la empresa PreCon se puede utilizar para sustituir los métodos tradicionales de entarimado y fundición in situ, lo que representa una ventaja en tiempos y costos de ejecución en las obras civiles del país.

1. CONCRETO REFORZADO

1.1. Generalidades del concreto reforzado

El concreto es un material semejante a la piedra que se obtiene mediante una mezcla proporcionada de cemento, agregados pétreos finos y gruesos, y agua; después, esta mezcla se endurece en formaletas con la forma y dimensiones deseadas.

El cemento y el agua interactúan químicamente para unir las partículas de agregado y conformar una masa sólida. Es necesario agregar agua, además de aquella que se requiere para la reacción química, con el fin de darle a la mezcla la trabajabilidad adecuada que permita llenar las formaletas y cubrir el acero de refuerzo embebido, antes de que inicie el endurecimiento.

Se pueden obtener concretos en un amplio rango de propiedades ajustando apropiadamente las proporciones de los materiales constitutivos. Un rango aún más amplio de propiedades puede obtenerse mediante la utilización de cementos especiales (alta resistencia inicial, resistencia a sulfatos), agregados especiales (fibras u otros), aditivos, y mediante métodos especiales de curado.

Estas propiedades dependen en gran medida de las proporciones de la mezcla, del cuidado con el que se mezclan los diferentes materiales constitutivos, y de las condiciones de humedad y temperatura bajo las que se mantenga la mezcla desde el momento en que se coloca en la formaleta hasta que se encuentra totalmente endurecida.

El proceso de control de estas condiciones se conoce como curado. Para evitar la producción de concretos de bajos estándares se requiere un alto grado de supervisión y control de calidad por parte de personal calificado y con experiencia durante todo el proceso, desde el diseño y proporción de las materias primas de los componentes, pasando por el mezclado y el vaciado, hasta la terminación con el curado.

1.2. Propiedades del concreto reforzado

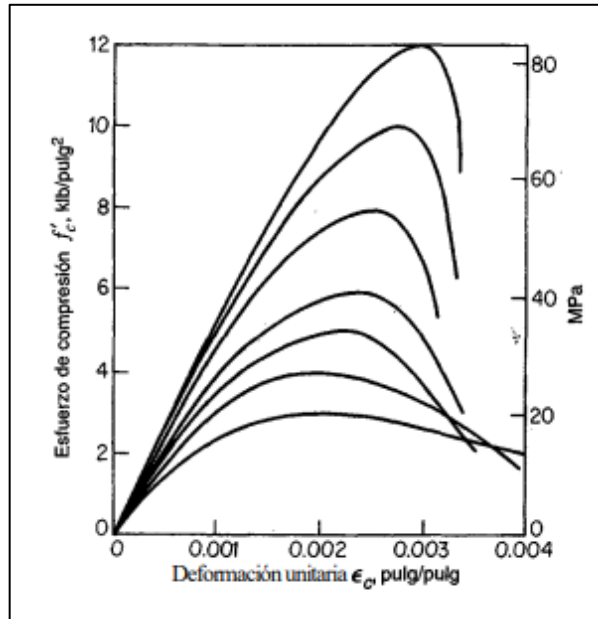
El concreto y el acero de refuerzo tienen propiedades muy distintas por separado, sin embargo, al unir estos dos materiales, se obtiene el concreto reforzado, que tiene muchas cualidades como sistema constructivo, que provee soluciones estructurales capaces de resistir eficientemente esfuerzos combinados de compresión, tensión, cortante, entre otras.

1.2.1. Resistencia a compresión

Esta es la principal cualidad del concreto. Se determina mediante el ensayo de testigos de concreto normados, la cual se realiza a los 1, 3, 7, y 28 días después de haber vertido el concreto según la norma técnica guatemalteca. El rango de resistencias últimas del concreto va de 17,23 hasta 138 MPa.

- Curva esfuerzo-deformación del concreto: cuando un testigo de concreto es ensayado en el laboratorio para conocer su resistencia a la compresión, este experimenta cierta deformación. La aplicación de cargas puede representarse por medio de una curva o diagrama de Esfuerzo - Deformación, graficando en el eje de las abscisas la deformación y en la ordenada el esfuerzo a compresión del concreto ($f'c$).

Figura 1. **Curva de esfuerzo-deformación unitaria del concreto**



Fuente: NILSON, Arthur. *Diseño de estructuras de concreto*. p. 38.

- Módulo de elasticidad: el concreto no tiene un módulo de elasticidad definido. Su valor varía con las diferentes resistencias del concreto. El módulo inicial es la pendiente del diagrama de esfuerzos vs deformaciones en el origen de la curva. El código ACI 318-19 determina la siguiente ecuación para calcular módulos de elasticidad de concretos de peso normal.

$$E_c = 4,700\sqrt{f'_c}$$

Donde

f'_c = resistencia ultima de compresión del concreto en MPa.

1.2.2. Resistencia a tensión

Esta propiedad es deficiente en el concreto y se puede obtener de los mismos testigos de concreto ensayados a compresión. El valor de la resistencia a tensión esta entre 8 % a 15 % de su resistencia a compresión. Normalmente esta resistencia se desprecia en los cálculos para el diseño de elementos, y el material que va a resistir estas fuerzas de tensión es el acero de refuerzo.

El acero estructural tiene alta resistencia a la tensión, y por eso se incluye en el diseño de los elementos de concreto reforzado, para soportar las cargas y esfuerzos que no puede soportar el concreto por sí solo.

1.2.2.1. Módulo de ruptura del concreto

Este módulo indica la tensión máxima que el concreto puede soportar antes de agrietarse y fallar. Este módulo se obtiene mediante el ensayo a flexión de una viga a escala. La ecuación para el cálculo del módulo de ruptura de concretos de peso normal según la norma ASTM C-293 es:

$$R = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Donde:

R = módulo de ruptura del concreto, en MPa

P = carga máxima aplicada indicada por la máquina, en N

L = longitud entre apoyos, en mm

b = ancho promedio del espécimen en el área de fractura, en mm

d = espesor promedio del espécimen en el área de fractura, en mm

1.2.2.2. Prueba radial (hendido)

En esta prueba se coloca un cilindro de manera horizontal y se le aplica una carga a compresión uniforme a lo largo del eje longitudinal. El esfuerzo de tensión en que ocurre la ruptura se denomina resistencia radial, y está entre un rango del 10 - 20 % de la resistencia a compresión del concreto.

1.2.3. Resistencia a corte

El principal efecto que produce la fuerza cortante en un elemento de concreto es el desarrollo de esfuerzos a tensión inclinados (grietas inclinadas), con respecto al eje longitudinal del miembro. Para evitar el desarrollo de los esfuerzos por tensión, se hace necesario reforzar las vigas de concreto con refuerzo de cortante. En el código ACI 318-19 se encuentran las especificaciones para calcular la resistencia a corte teórica de los diversos elementos de concreto reforzado.

Los métodos para el dimensionamiento de elementos de concreto sujeto a fuerza cortante se basan en un promedio de esfuerzos por cortante sobre toda la sección transversal efectiva del elemento; teniendo como puntos críticos los nudos o conexiones con otros elementos, y es en estas zonas donde debe prestarse mayor atención al diseño del refuerzo por cortante, porque en estas el refuerzo generalmente es mayor al del resto del elemento.

1.2.4. Tenacidad

Es una medida de la capacidad de absorción de energía, y se utiliza para caracterizar las posibilidades que posee el concreto reforzado de resistencia a la fractura, cuando éste está sujeto a cargas estáticas, dinámicas y de impacto.

2. MIEMBROS DE CONCRETO REFORZADO SOMETIDOS A FLEXION SIMPLE

2.1. Vigas de concreto reforzado

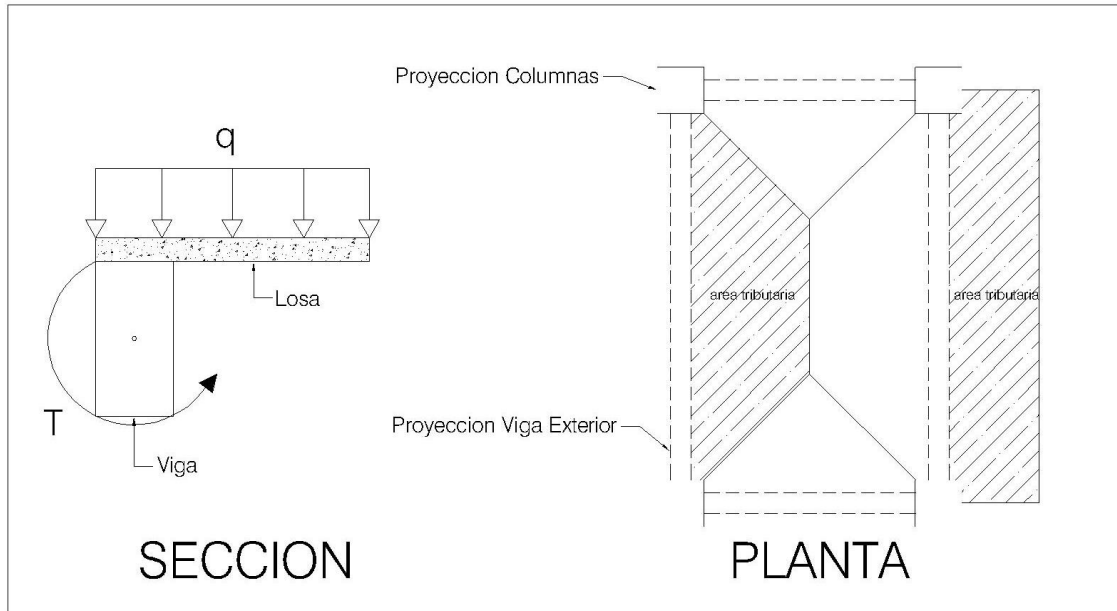
Las vigas son elementos estructurales diseñados para resistir cargas distribuidas y puntuales que al ser aplicadas provocan momentos flexionantes, fuerzas cortantes y de torsión a lo largo del elemento. Son capaces de recibir las cargas y transmitir las a las columnas u otros apoyos debido a su resistencia, rigidez y tenacidad. Existen dos tipos que se definen conforme su ubicación en una edificación: vigas de borde o de interior.

2.1.1. Tipos de vigas

- Vigas de borde: son las vigas situadas en los perímetros de la edificación. Se caracterizan por recibir cargas diferentes en sus costados, esto debido a que solo un lado longitudinal recibe la carga transmitida por la losa. Esto provoca torsión en el eje longitudinal de las vigas, además de la flexión.

La torsión es un esfuerzo generalmente poco considerado en el diseño de vigas, pero que siempre se debe calcular para verificar si esta torsión es crítica, en tal caso, se debe diseñar el elemento con un refuerzo adicional que resista los efectos de este esfuerzo, esto con más frecuencia en el caso de vigas de borde que estén en voladizo.

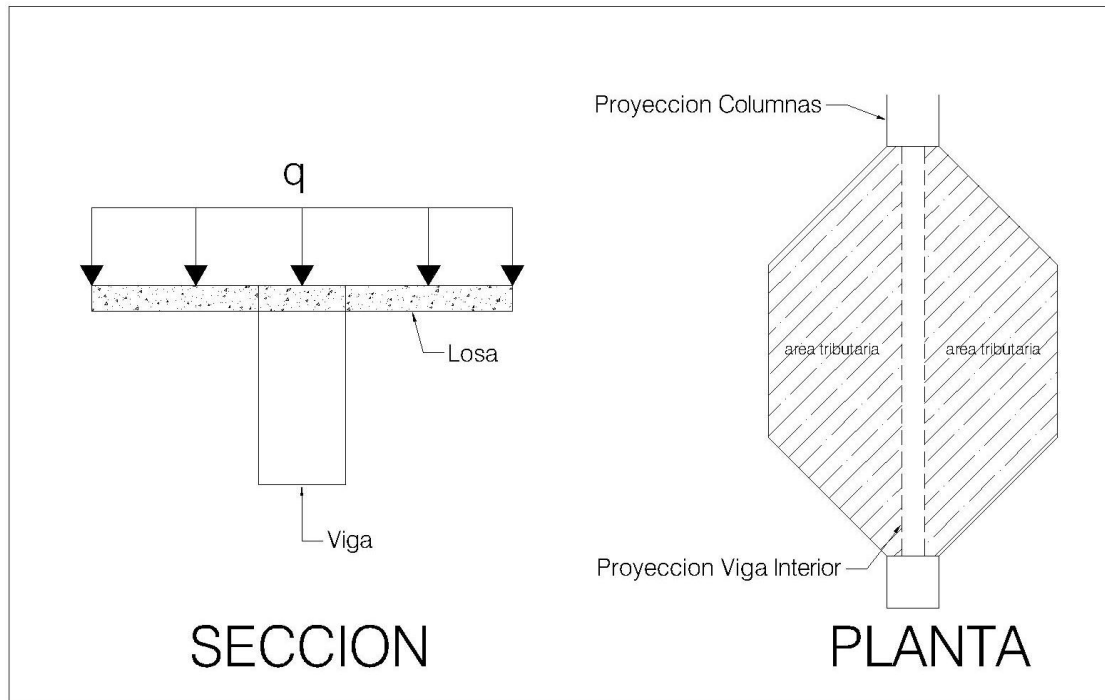
Figura 2. **Viga de borde**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2018.

- Viga interior: este tipo de viga se caracteriza por recibir las cargas transmitidas por las losas en ambos lados longitudinales. Es muy común que el área tributaria en ambos lados sea igual o muy parecida, por lo que estas vigas suelen diseñarse sin tomar en cuenta la torsión, ya que no es crítica. El esfuerzo crítico en este tipo de vigas es causado por el momento flexionante, se diseña para resistir flexión y corte.

Figura 3. **Viga interior**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2018.

2.2. Vigas sometidas a flexión

La flexión en una viga de concreto reforzada es causada por soportar una carga, puntual o distribuida a lo largo de su eje longitudinal. Al incrementarse la carga, aumenta el esfuerzo, lo que provoca que la viga pase por diferentes etapas. Estas etapas son: concreto no agrietado, esfuerzo elástico, concreto agrietado, y falla o resistencia última.

2.3. Tipos de fallas por flexión

Para un elemento con un $f'c$ conocido, la cuantía de acero de refuerzo determina el tipo de falla, ya sea de manera dúctil comúnmente llamada falla por tensión (bajo contenido de acero), de manera frágil por falla a compresión (alto contenido de acero), o una falla balanceada.

2.3.1. Falla por tensión

Si el contenido de acero de la sección es bajo, el acero alcanza la resistencia f_y de cedencia antes que el concreto alcance su capacidad máxima. Una ligera carga adicional ocasiona una elongación plástica grande del acero a través de las grietas de flexión, lo que produce un agrietamiento ancho y un aumento grande de la deformación en la fibra extrema a compresión del concreto. Este tipo de falla se debe a un momento positivo flexionante.

A este tipo de falla se le podría denominar como falla a tensión primaria. Debido a que la falla se inicia por cedencia del acero a tensión. El acero no se fractura en la resistencia a flexión de la sección, a menos que la cuantía de acero sea sumamente pequeña. Por esta razón, los códigos de diseño en concreto especifican el uso de un área de acero mínima y máxima según las dimensiones del elemento.

2.3.2. Falla por compresión

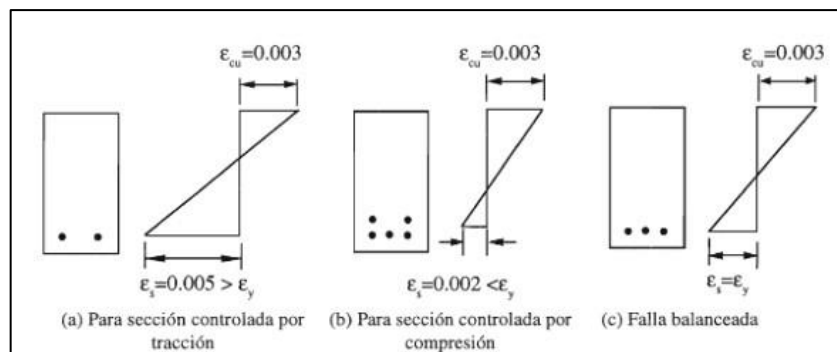
Si el contenido de acero de la sección es grande, el concreto puede alcanzar su capacidad máxima antes de que ceda el acero. En tal caso, aumenta considerablemente la profundidad del eje neutro, lo que provoca un aumento de la fuerza de compresión.

La resistencia a flexión de la sección se alcanza nuevamente cuando la deformación en la fibra a compresión extrema del concreto es cerca de 0,003. Entonces la sección falla repentinamente en forma frágil. Puede haber poca advertencia visible de la falla lo que la hace peligrosa, debido a que los anchos de las grietas de flexión en la zona a tensión del concreto en la sección de falla son pequeños, debido al bajo esfuerzo del acero.

2.3.3. Falla balanceada

Para una cuantía específica de acero, este alcanza la resistencia de cedencia f_y y simultáneamente el concreto alcanza una deformación de la fibra extrema a compresión de 0,003. Para asegurar que todas las vigas se diseñan bajo características deseables de advertencia visible si la falla es inminente, al igual que ductilidad razonable en la falla, se recomienda que la cuantía de acero a tensión de una viga reforzada no exceda 0,75 del área para una falla balanceada.

Figura 4. Tipos de fallas en vigas



Fuente: PDFCOFFEE. *Recubrimiento y espaciamiento mínimo del concreto.*

<https://pdfcoffee.com/recubrimiento-y-espaciamiento-minimo-del-refuerzo-5-pdf-free.html>.

Consulta: febrero de 2021.

2.4. Resistencia y deformación de miembros sometidos a cortante

La transmisión de cortante en las vigas de concreto reforzado se apoya fuertemente en la resistencia a tensión y compresión del concreto. En consecuencia, no es de sorprenderse que una falla a cortante por lo general sea no dúctil. Por ello, se debe intentar suprimir dicha falla. En especial, en las estructuras resistentes a sismos se pone gran atención a la ductilidad. Razón por la que en el diseño se debe asegurar que jamás ocurra una falla a cortante de forma prematura. Esto implica que cuando es esencial la ductilidad, la resistencia a cortante de la viga debe ser mayor que la resistencia máxima a flexión que este podría desarrollar.

2.5. Deformación máxima y ductilidad de miembros sometidos a flexión

El comportamiento de la curva de la gráfica de carga-deflexión de miembros de concreto reforzado indica cómo puede darse la falla, frágil o dúctil. La importancia de las características de la curva carga-deformación de los miembros es necesaria por las siguientes razones:

- No debe ocurrir la falla frágil o repentina de los miembros. En el caso extremo de que una estructura falle bajo efectos de cargas, debe desarrollar grandes deflexiones. Esto puede salvar vidas al advertir la falla e impedir un colapso repentino.
- Las distribuciones posibles de momento flexionante, fuerza cortante y carga axial, que podrían utilizarse en el diseño de estructuras estáticamente indeterminadas, dependen de la ductilidad de los miembros en las secciones críticas.

- En las regiones expuestas a sismos, una consideración muy importante en el diseño es la ductilidad de la estructura cuando se le sujeta a cargas de tipo sísmico. Ello se debe a que la filosofía actual del diseño sísmico se apoya en la absorción y disipación de energía, mediante la deformación inelástica para la supervivencia en los sismos fuertes.

2.5.1. Control de deflexiones

El uso de concreto reforzado ha permitido diseñar elementos estructurales más esbeltos y optimizados. Las estructuras modernas se diseñan con mayores claros, que a menudo no tienen muros y particiones sustanciales, de manera que los elementos no estructurales pueden estar propensos al daño. Esto debido a las deformaciones que los miembros estructurales desarrollen, considerando su dimensión y esbeltez.

2.5.1.1. Servicio de las estructuras

Los límites de servicio se relacionan con el propósito de la estructura, es decir el uso que se le va a dar. Por eso al momento de diseñar los elementos, se aplican cargas de servicio y factores estandarizados según el tipo de construcción.

2.5.1.2. Efectos sobre elementos no estructurales

Se deben limitar las deflexiones para evitar que elementos no estructurales se deformen o se dañen, lo que afecta negativamente el aspecto visual de las estructuras. Estos elementos pueden ser muros divisores, cielos falsos, pisos, juntas, entre otros.

2.5.1.3. Efectos sobre elementos estructurales

La consideración más importante es la de limitar las deflexiones de los elementos estructurales para impedir que el comportamiento estructural sea distinto al supuesto en el diseño.

En esta categoría se considera las deflexiones que provocan inestabilidad, tales como en los arcos, cascarones, columnas y vigas largas; las deflexiones que provocan un cambio en el estado de esfuerzos. Estos tales como una modificación en el área de apoyo debido a la rotación del extremo de una viga y las deflexiones que provocan efectos dinámicos que aumentan los esfuerzos.

2.6. Métodos de fabricación de los elementos

Todos los elementos de una estructura de concreto reforzado deben llevar un proceso controlado para su diseño y fabricación. Estos procesos van desde la selección de los materiales a utilizar hasta la colocación de los elementos y acabado final. Generalmente estos procesos están controlados y se rigen por normas, ya sea de comisiones nacionales o internacionales, o propias de las empresas (en caso de productos patentados por estas).

En Guatemala, la construcción es un segmento que evoluciona y se actualiza muy poco con el paso de los años, es decir que se siguen implementando métodos tradicionales que involucran mucha mano de obra e intervención de personal, cuando en países más desarrollados estos procesos ya están industrializados y automatizados. Los métodos más usados en la construcción en Guatemala son: fundición In Situ y elementos prefabricados.

2.6.1. Fundición in situ

In Situ es una expresión latina que significa “en el sitio” o “en el lugar”, es decir que la fabricación de los elementos de las estructuras se hace en el sitio exacto donde estas se pondrán en servicio.

Este método requiere la fabricación previa de un cajón o molde para el elemento, donde dentro de este se coloca la estructura de acero de refuerzo y posteriormente se vierte dentro el concreto para unificar los materiales y formar un solo elemento.

La elección de este método implica la utilización de muchos materiales adicionales a los del elemento, lo que genera mucho desperdicio porque la mayoría de estos materiales solo se utiliza una vez. Esto eleva considerablemente el costo de las obras si no se tiene un buen control y manejo de recursos. Entre estos, los más utilizados son madera, puntales, clavos, alambre de amarre, andamios, formaletas y aditivos para el desmoldado y curado del concreto.

La construcción in situ es el método constructivo más utilizado en Guatemala debido a la facilidad y flexibilidad de construir elementos con formas variadas, y se puede crear un molde específico para cada elemento sin importar su diseño; y también la facilidad de fabricación de los elementos en comparación con los prefabricados, ya que estos últimos requieren muchas veces de instalaciones y equipo especiales, así también como controles más estrictos.

Como la construcción in situ ha sido por tradición la más utilizada, vale la pena analizar y hacer comparativos de costo y tiempo de las obras, para ir transformando esta metodología en un proceso más dinámico y eficiente. Muchos

factores que suelen afectar este tipo de construcciones son los costos indirectos debido al uso de formaletas, control y desperdicio de materiales en obra, sobrecosto de mano de obra espacios en obra para almacenamiento de materiales, herramientas y personal, rendimiento y seguridad industrial del personal de obra.

Con el uso de sistemas prefabricados, subcontratos, alquileres de equipos y maquinaria especial se puede mejorar el ritmo de la construcción, la calidad de los elementos, el orden y limpieza, controles de obra, y reducción de personal directo en obra, lo que generalmente significa un ahorro en el presupuesto de la obra.

Figura 5. Fundición in situ de vigas y losa



Fuente: elaboración propia, edificio Casa San Pedrito.

2.6.1.1. Colocación de formaleta y entarimado en obra

Para un pórtico, la mayoría de los elementos fundidos requieren de un molde para fundir los elementos (cimientos, columnas, vigas, losas), llamado comúnmente formaleta, y para soportar estos moldes y elementos es necesario una estructura temporal, denominada obra falsa, que soporta los elementos antes de que estos entren en servicio. La obra falsa está compuesta por: puntales o parales, que pueden ser de madera o metal; andamios, tablas y planchas de madera o panel fenólico, que sirven como molde para la mayoría de los elementos de concreto de una obra.

Figura 6. Encofrado y entarimado de elementos en obra



Fuente: elaboración propia, edificio Casa San Pedrito.

2.7. Prefabricados

Como el nombre lo indica, son elementos o piezas fabricadas previo a ser instaladas. Este método consiste en varias etapas: diseño, fabricación, almacenamiento, transporte, y colocación. Si un proceso o elementos presentan la característica de poderse producir en fábrica o en obra y se opta por su producción en fábrica se transforman en productos prefabricados.

Dentro de los prefabricados para la construcción, los más comunes son las estructuras de acero y concreto, que como el acero puede ser más fácil de transportar e instalar, es un material de construcción que requiere más mantenimiento que el concreto y dependiendo los costos de las materias primas puede ser una opción más cara.

El uso de prefabricados de concreto en los países industrializados ha sido una experiencia de éxito para el desarrollo de estos, por su amplia utilización y aplicación en obras de infraestructura vial y edificaciones tales como vivienda en serie, hospitales, escuelas, centros comerciales, estadios, estaciones de transporte público, por mencionar algunos. También son muy utilizados para renovar o ampliar estructuras existentes, en las que la puesta en servicio lo antes posible es vital, como el caso de pasos a desnivel y aeropuertos, por ejemplo.

Dentro de los prefabricados de concreto, se puede optar al uso del concreto pre esforzado, que es una variante o especialidad del concreto armado, en el que se somete a esfuerzos adicionales de compresión, previos a su puesta en servicio.

Dicha fuerza de compresión es producida mediante el uso de cables de acero que se estiran dentro de su rango elástico para que, al momento de

regresar a su estado de relajación, la fuerza que se opone a la deformación del acero comprime el concreto para contrarrestar las fuerzas producidas por las cargas de servicio que actúan sobre el elemento, mejorando su rigidez y resistencia. Por esto, el concreto pre esforzado tiene ventajas adicionales como la reducción de la sección de la pieza (menor peso), mayor capacidad de resistencia de cargas de servicio y cobertura de claros o luces más grandes.

Por lo anterior proveen una solución constructiva eficiente en costo y calidad. Dependiendo las condiciones de la obra y su aplicación, los elementos de concreto pre esforzado pueden ser pretensados o postensados.

2.7.1. Elementos pretensados

En este, el concreto se vierte en moldes alrededor de tendones tensados, generalmente se utiliza cable de presfuerzo. El cable se tensa utilizando gatos hidráulicos y se sujetan en bancos de pretensado. Dependiendo del elemento y del diseño, el cable se puede tensar hasta un 80 % de su resistencia máxima. Una vez endurecido el concreto se liberan los cables por medio de gatos hidráulicos para que la tensión sea transmitida al elemento y sea el concreto el que la soporte a compresión.

Este método tiene la ventaja de tener mejores controles durante la fabricación y almacenamiento, pero tiene la desventaja que el transporte de estos elementos puede ser complicado si son de dimensiones muy grandes, y este es un factor limitante.

Figura 7. **Instalación de viga pretensada**



Fuente: elaboración propia, pasarela prefabricada en El Salvador, PreCon.

2.7.2. Elementos postensados

Estas estructuras tienen una armadura que se somete a tensión después de que el concreto ha fraguado. El acero debe ser colocado dentro del elemento antes de ser fundido, y debe protegerse de la adherencia mediante una envoltura que permita un deslizamiento al aplicar la fuerza de presfuerzo. El presfuerzo se aplica mediante aparatos portátiles después que el concreto ha alcanzado la resistencia especificada para el diseño. Para conservar el presfuerzo, el acero debe ser anclado mediante un sistema mecánico que minimice la pérdida de presfuerzo aplicado. Por último, los anclajes y el acero deben ser rellenados con una solución inyectada, que permita o no la adherencia entre el concreto y el acero; esto dependerá del tipo de diseño con el que se trabaje. Estas estructuras

son en su mayoría usadas en la construcción de elementos de grandes luces, donde el mejor ejemplo lo representan los puentes.

La principal ventaja de este método es que no hay limitante por tamaño del elemento. Las desventajas principales es que hay que llevar al lugar el equipo para tensar, lo que requiere espacio suficiente y personal capacitado para el manejo de este.

Figura 8. **Instalación de segmentos de viga postensada en puente**



Fuente: elaboración propia, montaje de vigas prefabricadas, PreCon.

2.7.3. Formaviga de PreCon

La formaviga es un sistema creado y patentado por PreCon, este consiste en un elemento tipo viga de sección transversal tipo “U” prefabricado, que sirve como cascarón para las vigas de una estructura. Este sistema sirve a la vez como molde de la viga que se va a fundir, y prácticamente anula el uso de formaleta.

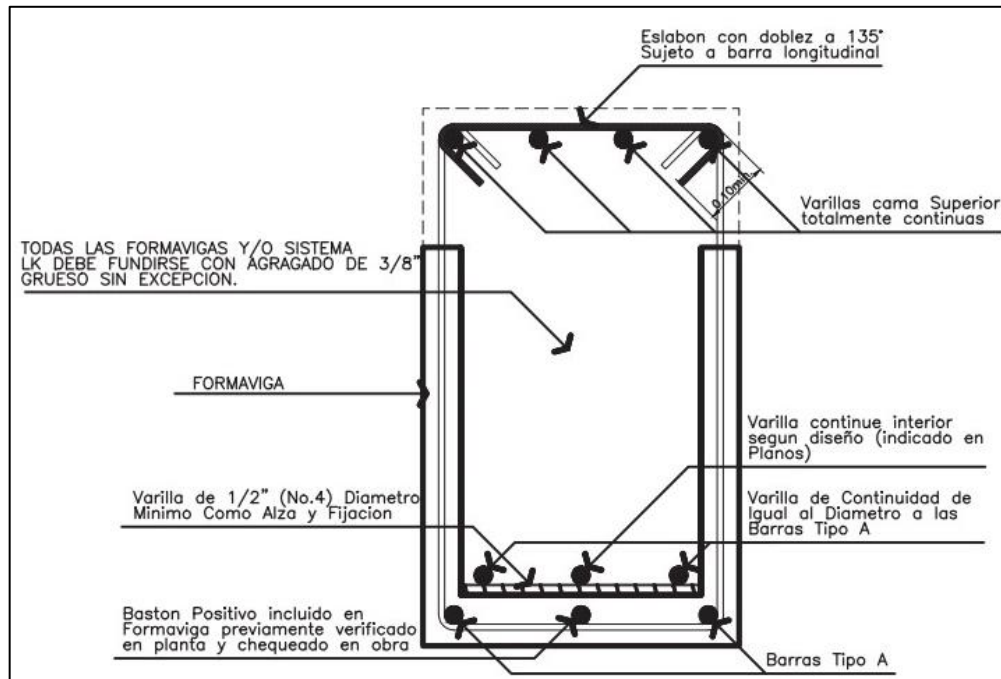
El diseño de la formaviga incluye el acero de refuerzo de corte (estribos), por lo que el tiempo de armado y cantidad de material en obra se reduce al utilizar este sistema. En las caras interiores cuenta con una superficie rugosa que permite la adherencia correcta del concreto viejo y nuevo sin la necesidad de adhesivos.

Las formavigas son fabricadas bajo las especificaciones de los clientes (dimensión de los elementos y distribución de los estribos), en una planta industrial de prefabricados, donde se utilizan moldes metálicos lo cual da un acabado liso y estético en el exterior. Para los estribos se utiliza generalmente acero grado 60 para luces de hasta 10 metros, pero este puede ser sustituido por otro grado dependiendo del diseño.

Los estribos fundidos dentro de la formaviga tienen el confinamiento y separación especificado en planos y se colocan en forma de "U" para que en obra después de colocar todo el refuerzo corrido y bastones, se cierren por medio de un eslabón. Esto facilita la colocación del refuerzo principal en obra y permite que el sistema quede integrado como cualquier viga fundida en obra, por medio del acero de refuerzo.

Adicionalmente se utilizan dos barras corridas, generalmente barras corridas de acero no.3 o no.4 grado 60 (414Mpa), para alineación y amarre de los estribos en la formaviga, también para darle estabilidad al elemento y cierta resistencia a flexión y torsión al momento de ser manipulada; esto para elementos reales utilizados en obras, para propósitos de esta investigación se decidió utilizar varillas corridas de 6,2mm de diámetro grado 70 (483Mpa), en la formaviga para amarrar los estribos y para que esta soportara la manipulación previa a los ensayos.

Figura 9. Detalle de formaviga



Fuente: Departamento de Diseño, PreCon.

El proceso de instalación de estos elementos es el siguiente:

- Primero, una vez fundidas las columnas, se procede a colocar la obra falsa que va a sostener la formaviga en su lugar.
- Segundo, con la ayuda de una grúa (o polipastos si no hay acceso para grúa) se colocan las formavigas en su lugar correspondiente; se provee un plano taller para ubicarlas en obra a modo que queden en la ubicación exacta.
- Tercero, se procede a completar el armado de las vigas que viene siendo todo el refuerzo longitudinal, bastones, y el complemento de los estribos

que son eslabones con dobleces a 135° . Cuarto, se verifica que los elementos estén correctamente armados según planos para proceder con la fundición de estos elementos junto con la losa o columnas para integrar la estructura de manera monolítica.

Las ventajas que se tienen de usar este sistema son:

- Reducción de tiempo de construcción en obra, se pueden colocar hasta 300 metros de forma viga en un día.
- Reducción de mano de obra directa en obra: albañiles, carpinteros y armadores.
- El acabado de la forma viga es liso por ser fabricada en moldes de acero, reduciendo tiempos en obra de resanes y tallados.
- Se pueden sustituir vigas armadas de secciones desde 0,25 hasta 0,50 metros de base y peraltes de 0,30 hasta 1,00 metro de alto.
- Reducción de obra falsa y desperdicios de acero en obra.

De lo anterior se puede resumir que tanto el cliente final como el contratista de la construcción salen beneficiados por los ahorros en tiempo y dinero, así como por la calidad de los productos.

3. ENSAYO DE FLEXION DE VIGAS DE CONCRETO REFORZADO

3.1. Descripción del ensayo

La norma guatemalteca que establece el método de ensayo para la determinación del esfuerzo de flexión para una viga de concreto reforzado es la Norma COGUANOR NTG 41017 h8, equivalente a la norma ASTM C293/C293 M-10. Esta norma determina el procedimiento para obtener el módulo de ruptura del elemento simplemente apoyado el cual soporta una carga aplicada al centro de la luz.

Para fines de este trabajo de investigación, se ensayaron vigas de concreto reforzado fabricadas por métodos tradicionales in situ y vigas fundidas con sistema prefabricado de formaviga para determinar y comparar si existe variación en la capacidad de resistir cargas que generan flexión en los elementos.

3.2. Muestreo

Para realizar el ensayo a flexión, se siguieron los procedimientos de muestreo y ensayo que establece la norma. Se fundieron dos vigas de concreto por cada método de fabricación, tomando en consideración que, si los resultados entre los elementos fundidos del mismo método tuvieran mucha variación, se debería fundir una tercera viga y ensayarla para eliminar los resultados del elemento que presento mayor desviación.

3.3. Equipo

El equipo utilizado para este ensayo según la norma es una máquina que permita aplicar una carga controlada al centro de la luz entre los apoyos en los extremos del elemento.

3.4. Procedimiento del ensayo

Ya curadas las probetas, identificadas y que hayan alcanzado su resistencia a compresión de diseño, se colocan en una maquina hidráulica de laboratorio, que aplica carga puntual al centro del elemento. Se coloca la probeta simplemente apoyada, verificando que los apoyos estén a la misma distancia del extremo en cada lado de esta. Ya posicionada la probeta, se le coloca un indicador para medir su desplazamiento vertical conforme se aplica la carga puntual gradualmente, con el fin de tomar medidas de carga y deflexión.

El ensayo termina al momento que el elemento falla. Se tomarán datos y se anotara el comportamiento del elemento durante el ensayo hasta su fractura, y con estos se procede a realizar los cálculos para determinar su resistencia a flexión.

3.5. Cálculos

Se calcula el módulo de ruptura con la siguiente ecuación, según la norma COGUANOR NTG 41017 h8.

$$R = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Donde:

R = Modulo de ruptura, MPa (lb/pulg²)

P = Carga máxima aplicada indicada por la máquina de ensayo, N (lbf)

L = Luz (longitud) entre apoyos, mm (pulg)

b = Ancho promedio del especimen, en la fractura, mm (pulg)

d = Altura promedio del especimen, en la fractura, mm (pulg)

4. MARCO METODOLOGICO

4.1. Enfoque

El enfoque de la investigación está en comparar el comportamiento de vigas de concreto reforzado sometidas a una carga que genera flexión, y que serán fundidas por diferentes métodos: el primero es el método tradicional de fundición in situ que requiere de un armado previo colocado dentro de una formaleta, en donde se vierte el concreto para la fundición del elemento; y el segundo método que utiliza en sistema de formaviga de PreCon, que consiste en fundir el elemento dentro de un cascarón prefabricado que funciona como formaleta.

4.2. Propuesta de vigas

Considerando el enfoque de la investigación, se fabricaron dos vigas para para el método de fundición in situ, y dos vigas para el método que utiliza formaviga. Todos los elementos tienen las mismas dimensiones y se utilizaron los mismos materiales, de manera que se espera que no exista variación considerable en los cálculos de resistencia a flexión.

4.3. Diseño de vigas

Para el diseño de vigas se determinaron dimensiones que fueran capaces de soportar el propio elemento sin generar flexión significativa, de manera que al momento del ensayo estas deflexiones fueran despreciables, utilizando como base las consideraciones de las normas de elaboración de testigos de concreto reforzado sometidos a flexión.

4.3.1. Dimensiones

Como bases de diseño se tomó en consideración que los moldes de formaviga tienen un ancho mínimo de 25 cm, y las probetas a ensayar deben cumplir con este ancho mínimo. Otros factores que se tomaron en consideración para el diseño fueron las capacidades de la máquina de ensayo y el transporte de las probetas al lugar de ensayo.

Tabla I. Dimensiones de vigas

DATOS				
Base b	25,00	cm	250,00	mm
Altura h	30,00	cm	300,00	mm
Recubrimiento r	2,50	cm	25,00	mm
Peralte efectivo d	27,50	cm	275,00	mm
Longitud efectiva L	150,00	cm	1500,00	mm

Fuente: elaboración propia.

4.3.2. Diseño por flexión

La presente investigación se enfoca en la resistencia a flexión de los diferentes elementos determinada por un ensayo en máquina de laboratorio donde las probetas están destinadas a fallar durante el ensayo, y para el diseño se consideraron únicamente las dimensiones del elemento, y la capacidad de resistencia de los materiales a utilizar (f'_c del concreto y f_y del acero).

Para el acero de refuerzo se utilizó el refuerzo mínimo para flexión en vigas no preesforzadas A_s min, determinado por las ecuaciones de la norma ACI 318-19.

Tabla II. **Datos de diseño**

DATOS				
Base b	25,00	cm	250,00	mm
Altura h	30,00	cm	300,00	mm
Recubrimiento r	2,50	cm	25,00	mm
Peralte efectivo d	27,50	cm	275,00	mm
Longitud efectiva L	150,00	cm	1 500,00	mm
f'c	4,000	psi	27,59	Mpa
fy	60,000	psi	413,78	Mpa
Ag	3/8	pulg		

Fuente: elaboración propia.

4.3.2.1. Cálculos

A continuación, se presentan los cálculos empleados para el desarrollo del diseño por flexión.

- Acero mínimo de refuerzo longitudinal:

$A_{s_{min}}$ tiene que ser mayor que:

$$a. \frac{0,25\sqrt{f'c}}{fy} * bd$$

$$b. \frac{1,4bd}{fy}$$

Entonces:

$$a. \text{ sustituyendo valores} = \frac{0,25\sqrt{27,59 \text{ MPa}}}{413,78 \text{ MPa}} * (25 * 27,5 \text{ cm})$$

$$a. = 2,18 \text{ cm}^2$$

$$b. \text{ sustituyendo valores} = \frac{1,4(25 * 27,5 \text{ cm})}{413,78 \text{ MPa}}$$

$$b. = 2,34 \text{ cm}^2$$

Se propone utilizar 2 varillas no.4 para cama superior e inferior:

$$\text{varilla no. 4} = 1,27 \text{ cm}^2$$

$$\times 2 \text{ varillas} = 2,54 \text{ cm}^2$$

$$2,54 \text{ cm}^2 > a. 2,18 \text{ cm}^2 \text{ cumple}$$

$$2,54 \text{ cm}^2 > b. 2,34 \text{ cm}^2 \text{ cumple}$$

Las dos varillas no.4 si cubren el área de acero mínima requerida.

- Estribos

El espaciamiento S debe de cumplir con los siguientes criterios:

$$S \text{ zona confinada} \leq d/4 \quad S \text{ zona central} \leq d/2$$

$$S \text{ zona central} \leq d/2$$

Entonces:

$$S \text{ zona confinada} \leq 27,5 \text{ cm} / 4 = 6,88 \text{ cm} \Rightarrow \text{se propone } 5 \text{ cm} \quad S \text{ zona central}$$

$$S \text{ zona central} \leq 27,5 \text{ cm} / 2 = 13,75 \text{ cm} \Rightarrow \text{se propone } 10 \text{ cm}$$

$$\leq 27,5 \text{ cm} / 2 = 13,75 \text{ cm} \Rightarrow \text{se propone } 10 \text{ cm}$$

Para facilidad de armado, se propone utilizar 5cm en la zona confinada y 10cm en la zona central.

- Carga teórica

Para el cálculo de la resistencia teórica a flexión que pueden soportar las vigas, se utilizó la ecuación de flexión simple para el momento último, esta se detalla a continuación:

$$As = 0,85 \frac{f'c}{fy} [(bd) - \sqrt{(bd)^2 - \frac{Mu * b}{0,003825 * f'c}}$$

Donde:

As = área de acero(cm²)

f'c = resistencia teórica a compresión del concreto (Kg/cm²)

fy = resistencia teórica a tensión del acero (Kg/cm²)

b = ancho promedio del espécimen, en la fractura (cm)

d = altura promedio del espécimen, en la fractura (cm)

Mu = momento último (Kg-m)

$$As \text{ vigas tradicionales} = 2,54 \text{ cm}^2$$

$$As \text{ Formavigas} = 2,54 \text{ cm}^2 + 2 \text{ varillas no. 3} = 3,96 \text{ cm}^2$$

Entonces, sustituyendo valores para despejar Mu para cada área de acero, se obtienen los siguientes momentos.

$$a. \text{ Mu vigas tradicionales} = 2,587,50 \text{ Kg} - m$$

$$b. \text{ Mu Formavigas} = 3,925,50 \text{ Kg} - m$$

El momento ultimo para este ensayo se calcula aplicando una carga puntual al centro de la luz libre entre apoyos, y la fórmula para el momento último se puede expresar de la siguiente manera:

$$Mu = \frac{P * l}{2}$$

Donde:

P = Carga al centro de la luz (Kg)

l = Longitud entre apoyo y punto de aplicación de carga (m)

Sustituyendo los valores de Mu en la fórmula para encontrar la P teórica, se obtiene:

$$Mu \text{ vigas tradicionales} = 2\,587,50 = \frac{P1 * l}{2}$$

$$P1 = 6\,900 \text{ Kg}$$

$$Mu \text{ Formavigas} = 3\,925,50 = \frac{P2 * l}{2}$$

$$P2 = 10\,468 \text{ Kg}$$

Tabla III. **Resistencia teórica de elementos**

	Carga Teórica	MR teórico (Mpa)
Vigas tradicionales	6 900 Kg	6,99
Formavigas	10 468 Kg	10,60

Fuente: elaboración propia.

5. FABRICACION Y ENSAYO DE VIGAS

5.1. Fabricación de los elementos

Se fabricaron en total de cuatro vigas de concreto reforzado: dos fundidas por método tradicional in situ, y dos con sistema prefabricado formaviga. Si al momento de ensayar los elementos a flexión presentaran variación considerable en los resultados, se prevé fundir y ensayar un elemento más de cada tipo a manera de obtener por lo menos dos resultados cercanos.

5.1.1. Formavigas

Para la fabricación de las formavigas se comenzó con el armado del acero de refuerzo de esta. Se colocaron dos varillas no. 3 grado 60 como guías para colocar los estribos no.3 grado 60 a cada 10 cm. Una vez colocados los estribos, se agregaron dos varillas no.3 a la mitad del estribo; estas varillas sirven como alineamiento de los estribos y le dan rigidez al elemento para su manipulación y colocación.

Figura 10. **Armado de formaviga**

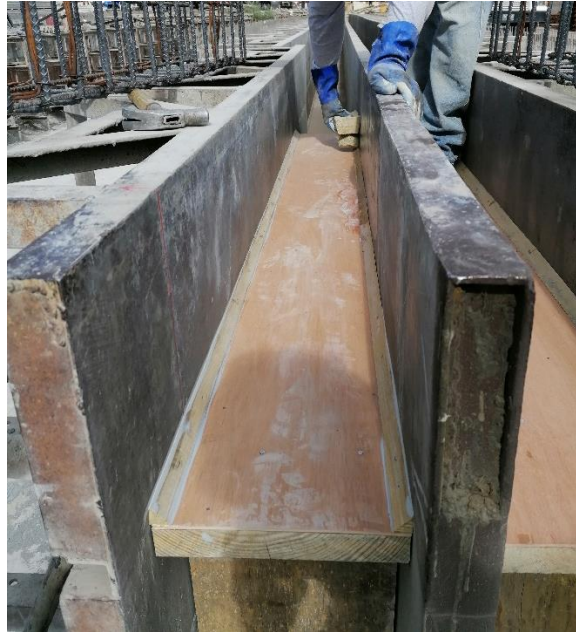


Fuente: elaboración propia, banco de armadura, Planta 1 San Miguel Petapa, PreCon.

Para finalizar el armado, se colocan cuatro izajes de retazos de cable en los extremos que sobresalen del armado, estos sirven para sujetar los elementos a la grúa al momento de su colocación. Este no aporta ninguna resistencia adicional a la formaviga.

Una vez terminado el armado, se procede a colocar este dentro de los moldes para formaviga. El banco de formaviga está construido de acero y tiene la característica que es flexible para poderse ajustar a la sección de la viga a fabricar. Las armaduras se centran, se sujetan, y se les colocan fondos de madera para ajustar la altura de viga. Con el ancho y alto requerido, se colocan contra moldes internos para formar en el prefabricado su característica forma de “U”.

Figura 11. **Moldura de formavigas**



Fuente: elaboración propia, banco de fundición de formavigas, Planta 1 San Miguel Petapa, PreCon.

A los contra moldes internos se les aplica un aditivo retardante de manera que al momento de fundir la formaviga, las caras internas de esta queden en contacto con el aditivo. Este tiene la función de retardar el fraguado del concreto en la capa superficial, lo que causa un desprendimiento de la pasta fina dejando el agregado grueso expuesto, lo que crea la superficie rugosa interna necesaria para la correcta adherencia del concreto viejo con el nuevo. Esto se logra mediante un lavado a presión al momento de desencofrar la formaviga.

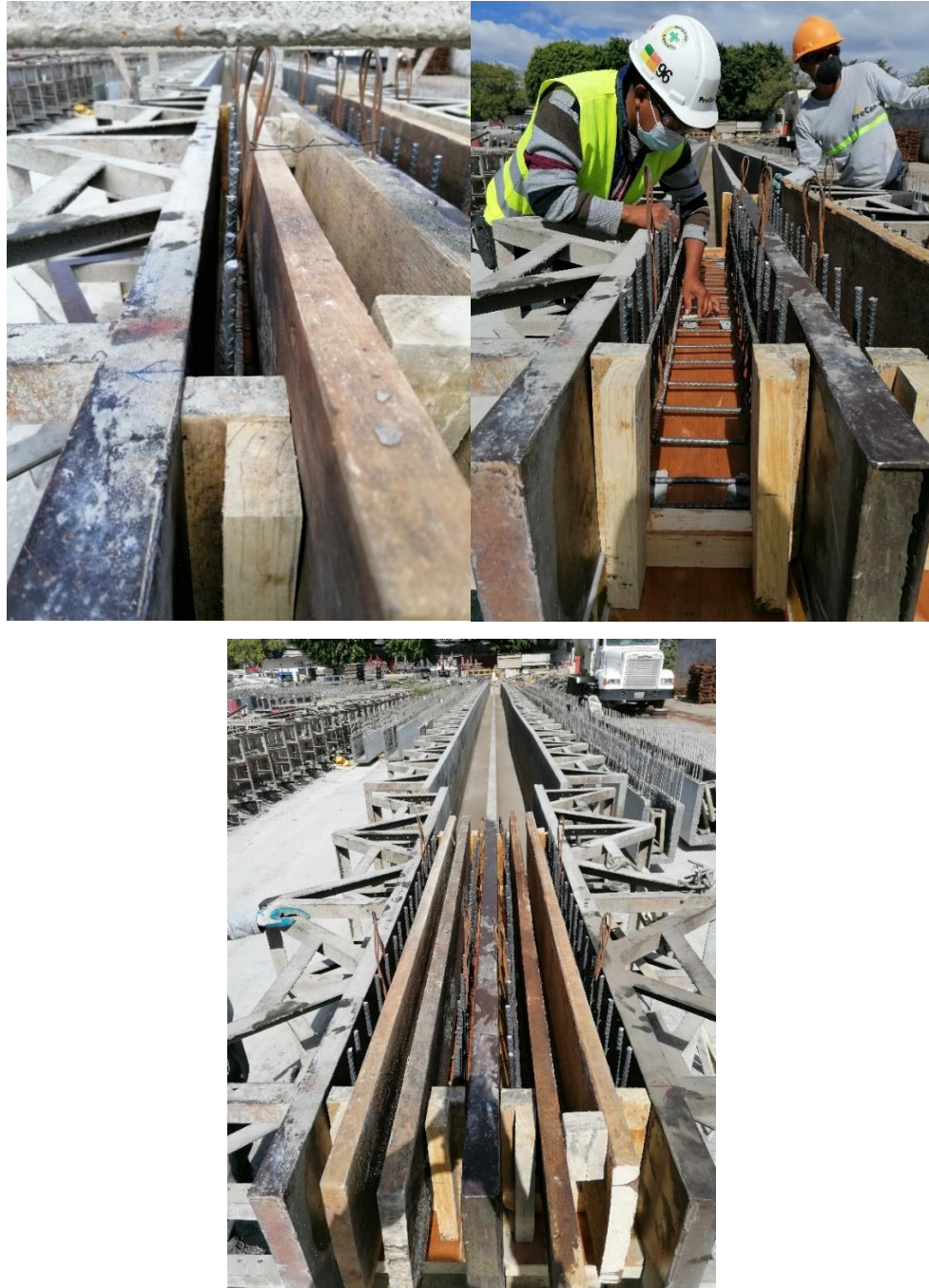
Figura 12. **Moldura de formavigas**



Fuente: elaboración propia, banco de fundición de formavigas, Planta 1 San Miguel Petapa, PreCon.

Con el molde en posición y los aditivos necesarios colocados, se procede a verter el concreto premezclado, para estos elementos se utilizó un concreto con alta resistencia inicial de 4 000 PSI (28,59 MPa), con agregado de 3/8 de pulgada. Mediante se va llenando el molde, se utiliza un vibrador de aguja para ir eliminando el aire atrapado dentro del concreto y así lograr que la mezcla llene todo el molde sin dejar vacíos o “ratoneras”. Una vez terminado de vibrar, se termina con un alisado en la parte superficial.

Figura 13. Colocación de armado y formaleta para formavigas



Fuente: elaboración propia, banco de fundición de formavigas, Planta 1 San Miguel Petapa, PreCon.

Figura 14. Fundición de formavigas



Fuente: elaboración propia, banco de fundición de formavigas, Planta 1 San Miguel Petapa, PreCon.

Las formaviga se fundieron 7 días antes de fundir los elementos completos para garantizar que el concreto de estas tuviera la resistencia adecuada.

Durante la fundición se sacaron 6 cilindros de concreto, elaborados bajo la norma ASTM C31/C31M, de los cuales se programa ensayar una pareja a los 7, 14 y 28 días después de la fundición, para obtener datos de la resistencia alcanzada del concreto.

Al día siguiente de la fundición las formavigas se desencofraron, y se realizó el lavado a presión de las caras internas de estas con una hidrolavadora, de manera que la capa superficial del concreto (la que estuvo en contacto con el

aditivo retardante), se desprenda y deje parte del agregado grueso expuesto, lo que genera una superficie rugosa que posteriormente ayuda a la buena adherencia del concreto nuevo con el viejo.

Las formavigas se colocaron en un patio de curado, donde se les aplico una capa de aditivo curador para que tuvieran el curado adecuado.

Figura 15. Formaviga desencofrada antes y después de lavar a presión (superficie interna rugosa)



Fuente: elaboración propia, banco de fundición de formavigas, Planta 1 San Miguel Petapa, PreCon.

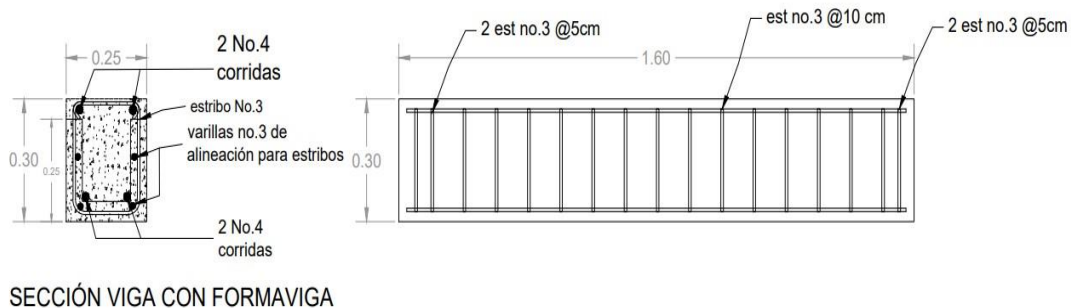
Una vez transcurridos 7 días, las formavigas se trasladaron nuevamente al banco de fundición, en donde se montaron nuevamente sobre los moldes y se prepararon para fundir el resto del elemento. Primero se limpian los elementos

con agua a presión a manera de retirar cualquier partícula suelta que afecte la adherencia del concreto fresco con las caras internas de la formaviga.

Luego se procede a colocar el acero de refuerzo según el diseño propuesto. Para los testigos se le colocaron 4 varillas No.4 corridas, 2 superiores y 2 inferiores, las cuales cumplen con la cuantía mínima de acero requerida para las dimensiones del elemento.

Después se colocaron los eslabones superiores que cierran los estribos y todo el armado queda asegurado dentro del elemento.

Figura 16. **Detalle testigos de formaviga**



Fuente. elaboración propia, empleando AutoCAD 2018.

Figura 17. **Testigos de formaviga**



Fuente: elaboración propia, banco de fundición de formavigas, Planta 1 San Miguel Petapa, PreCon.

Ya listas las formavigas y el armado, se procede a fundir los elementos. las formaviga se fundieron al mismo tiempo que las vigas tradicionales, utilizando el mismo concreto para garantizar uniformidad en los testigos. Para esto se utilizó el mismo diseño de mezcla que para las formavigas: concreto de alta resistencia inicial de 4 000 psi con agregado de 3/8 de pulgada.

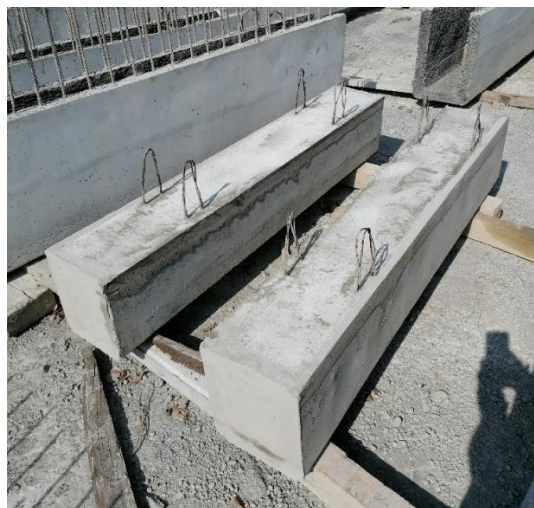
Los elementos se trasladaron a un patio de curado y se desencofraron 24 horas después de la fundición, en donde se les aplicó un aditivo curador para asegurar un curado adecuado.

Figura 18. **Formavigas fundidas**



Fuente: elaboración propia, banco de fundición de formavigas, Planta 1 San Miguel Petapa, PreCon.

Figura 19. **Formavigas desencofradas**

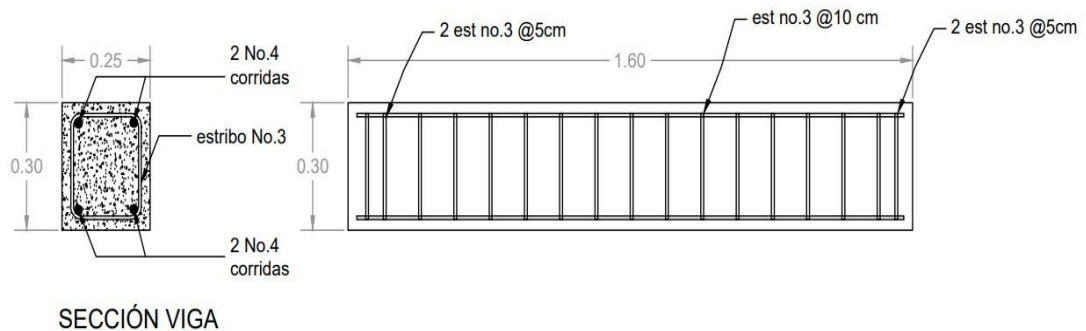


Fuente: elaboración propia, patio de almacenamiento, Planta 1 San Miguel Petapa, PreCon.

5.1.2. Vigas tradicionales

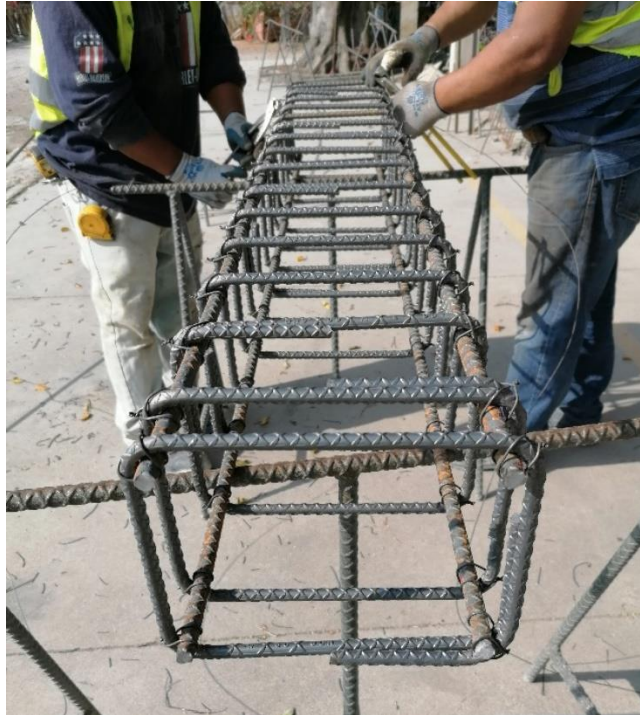
Las vigas tradicionales empiezan con el armado del acero de refuerzo, este consiste en 4 varillas longitudinales no.4 corridas en las esquinas y estribos no.3 distribuidos según el diseño. Terminado el armado del esqueleto de refuerzo, se traslada al banco de fundición donde se coloca dentro de los moldes.

Figura 20. **Detalle de diseño de vigas**



Fuente. elaboración propia, empleando AutoCAD 2018.

Figura 21. **Armado de acero de refuerzo en vigas tradicionales**



Fuente: elaboración propia, banco de armaduría, Planta 1 San Miguel Petapa, PreCon.

Una vez ubicado y colocado el refuerzo, se cierra el molde con tabloncillos de madera, colocadas a una distancia que cumplan con el recubrimiento necesario de 1 pulgada de los extremos del refuerzo. Luego se procedió con el vertido de concreto, para este se utilizó el mismo diseño de mezcla que para las formavigas, y las vigas tradicionales se fundieron al mismo tiempo que las formavigas para garantizar que los testigos fueran lo más homogéneos posible.

Figura 22. **Colocación de armadura en molde**



Fuente: elaboración propia, banco de fundición de formavigas, Planta 1 San Miguel Petapa, PreCon.

Figura 23. **Fundición de vigas tradicionales**



Fuente: elaboración propia, banco de fundición de formavigas, Planta 1 San Miguel Petapa, PreCon.

Una vez vertido el concreto, se utilizan vibradores de aguja para liberar las burbujas de aire atrapadas dentro de los elementos, que pueden generar puntos frágiles en el elemento al momento de ensayar. Después se alisa la superficie, se le aplica un aditivo curador, y se dejan los testigos a que fragüen durante 24 horas, para posteriormente retirarlos de los moldes de fundición y trasladarlos a un banco de almacenamiento, en donde se les aplica nuevamente antisol en las caras donde no se había colocado, y los testigos se quedan curando hasta el día del ensayo.

Durante la fundición se tomaron 6 cilindros de concreto como muestras, tomando las consideraciones de las normas correspondientes, los cuales se programa ensayar una pareja a los 7, 14, y 28 días después de la fundición, para obtener los datos de las resistencias del concreto.

Figura 24. **Vigas tradicionales fundidas**



Fuente: elaboración propia, patio de almacenamiento, Planta 1 San Miguel Petapa, PreCon.

5.2. Ensayo de vigas

Los testigos de vigas y formavigas se ensayaron a flexión una vez cumplidos los 28 días después de la fundición de estos. Esto para garantizar que los elementos tengan el 100 % de su resistencia de diseño.

En base al procedimiento descrito en el capítulo 3 de esta investigación se realizaron los ensayos. Tanto para las vigas fundidas de manera tradicional como para las formavigas, el procedimiento, observaciones y medidas fueron las mismas durante los ensayos. De esta manera se comparó el comportamiento, la resistencia y el tipo de falla en cada elemento.

5.2.1. Material y equipo a utilizar

Para el ensayo a flexión simple en vigas de concreto reforzado se utilizó el siguiente equipo.

- Maquina universal para ensayos
- Vigas de acero donde montar los cabezales
- Cabezales de acero con rodillo
- Cinta métrica
- Clip

5.2.2. Procedimiento de ensayo

Los elementos se ensayaron primero las dos formavigas y después las dos vigas tradicionales, siguiendo el siguiente procedimiento:

- Colocar elemento a ensayar sobre 2 apoyos simples con la ayuda de un polipasto. El elemento se colocó al centro de la máquina y se verifico que estuviera nivelada. Para esto se colocaron previamente marcas en la base de la máquina de ensayos.
- Tomar medidas de las diferentes dimensiones del elemento: longitud, ancho y altura. Se tomaron tres medidas de cada dimensión y se tomó el promedio para realizar cálculos.
- Aplicación de carga al centro del elemento de manera gradual.
- Anotar deformación con cada incremento de carga.
- Anotar carga y deformación al momento de la primera grieta en el elemento.
- Al fallar el elemento, se anota la carga ultima y la deformación máxima, y se anota el tipo de falla y la ubicación de la falla en el elemento.

Figura 25. **Colocación de formaviga para ensayo**



Fuente: elaboración propia, Sección de Metales y Productos Manufacturados, edificio T-5, USAC.

6. RESULTADOS

6.1. Ensayos previos

A continuación, se describen los ensayos y resultados de control del concreto.

6.1.1. Resistencia a compresión de los testigos de concreto

En la siguiente tabla se muestran los resultados de los ensayos de cilindros de concreto. Se ensayaron dos testigos a los 7, 14 y 28 días después de las fundiciones. Se realizaron estos controles tanto para las formaviga como para las vigas.

Tabla IV. **Resultados de ensayos a compresión de cilindros de concreto de formavigas (casarón)**

No. De cilindro	Elemento Fundido	f'c (psi)	Fecha de fundición	Fecha de ruptura	Edad (días)	Peso (Kg)	Resistencia (psi)	% de resistencia	Tipo de falla*
1	Formaviga	4 000,00	10-mar-21	17-mar-21	7	13	3 856,00	96 %	5 fracturas a los lados
2	Formaviga	4 000,00	10-mar-21	17-mar-21	7	12,78	4 040,00	101 %	5 fracturas a los lados
3	Formaviga	4 000,00	10-mar-21	24-mar-21	14	12,84	4 418,00	110 %	5 fracturas a los lados
4	Formaviga	4 000,00	10-mar-21	24-mar-21	14	12,77	4 302,00	108 %	5 fracturas a los lados
5	Formaviga	4 000,00	10-mar-21	07-abr-21	28	12,8	4 698,00	117 %	5 fracturas a los lados
6	Formaviga	4 000,00	10-mar-21	07-abr-21	28	12,79	4 800,00	120 %	5 fracturas a los lados

*Ver tipo de fallas en anexos.

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Resultados de ensayos a compresión de cilindros de concreto de vigas**

No. De cilindro	Elemento Fundido	f'c (psi)	Fecha de fundición	Fecha de ruptura	Edad (días)	Peso (Kg)	Resistencia (psi)	% de resistencia	Tipo de falla*
1	Vigas	4 000,00	17-mar-21	24-mar-21	7	13,21	4,317,00	108 %	5 fracturas a los lados
2	Vigas	4 000,00	17-mar-21	24-mar-21	7	13,17	4,397,00	110 %	5 fracturas a los lados
3	Vigas	4 000,00	17-mar-21	31-mar-21	14	12,9	4,698,00	117 %	5 fracturas a los lados
4	Vigas	4 000,00	17-mar-21	31-mar-21	14	12,43	4,867,00	122 %	5 fracturas a los lados
5	Vigas	4 000,00	17-mar-21	14-abr-21	28	12,48	5,186,00	130 %	5 fracturas a los lados
6	Vigas	4 000,00	17-mar-21	14-abr-21	28	12,48	5,270,00	132 %	5 fracturas a los lados

*Ver tipo de fallas en anexos.

Fuente: elaboración propia.

6.2. Vigas fundidas por método tradicional

El primer grupo de vigas ensayadas fueron las vigas armadas y fundidas por método tradicional.

6.2.1. Carga y deflexión

La siguiente tabla muestra las lecturas de las deflexiones tomadas durante la aplicación de carga.

Tabla VI. **Carga y deflexiones en vigas tradicionales**

VIGA 01			VIGA 02		
Lectura	Carga (kg)	Deformación (mm)	Lectura	Carga (kg)	Deformación (mm)
1	1 000,00	0	1	1 000,00	0
2	2 000,00	1	2	2 000,00	1
3	3 000,00	1	3	3 000,00	1
4	4 000,00	1	4	4 000,00	1
5	5 000,00	2	5	5 000,00	1
6	6 000,00	3	6	6 000,00	2
7	7 000,00	4	7	7 000,00	3
8 (1ra. grieta)	8 000,00	6	8	8 000,00	4
9	9 000,00	8	9 (1ra. grieta)	8 500,00	5
10	10 000,00	10	10	10 000,00	8
11 (fallo)	11 000,00	12	11	11 000,00	11
			12 (fallo)	11 500,00	13

Fuente: elaboración propia.

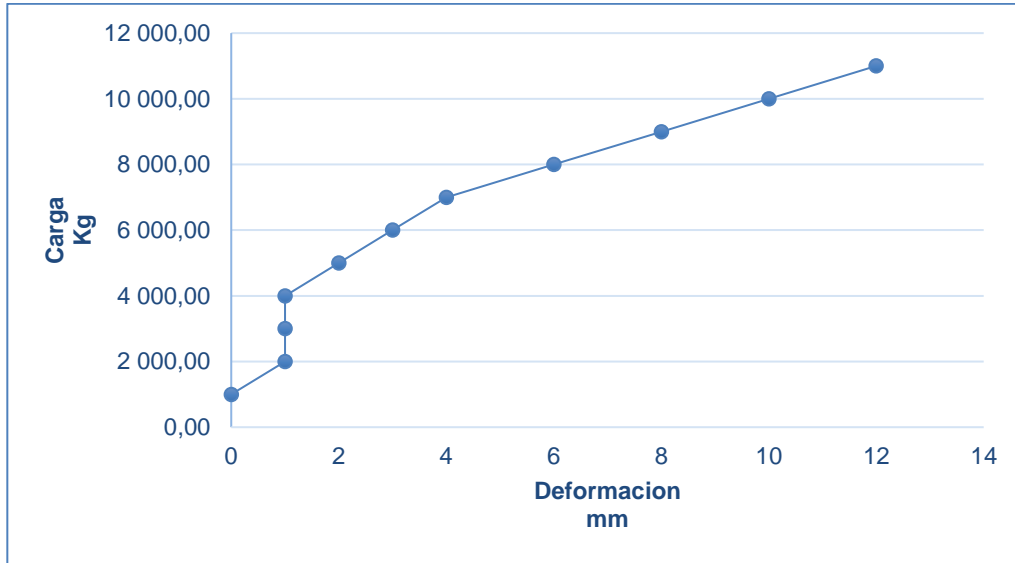
Al principio las vigas presentaron una deflexión mínima de 1 mm durante la aplicación de carga hasta llegar aproximadamente a un tercio de la carga última que soportaron. Para ambas vigas tradicionales la primera grieta apareció cuando la carga aplicada era similar: 8 000 kg para la primera viga y 8 500 kg para la segunda viga.

Ambas vigas también soportaron una carga última similar: 11 000 kg para la primera viga y 11 500 kg para la segunda viga. Ambas resistieron considerablemente más que la carga última del diseño, que era de 6 900 kg.

6.2.2. Gráficas

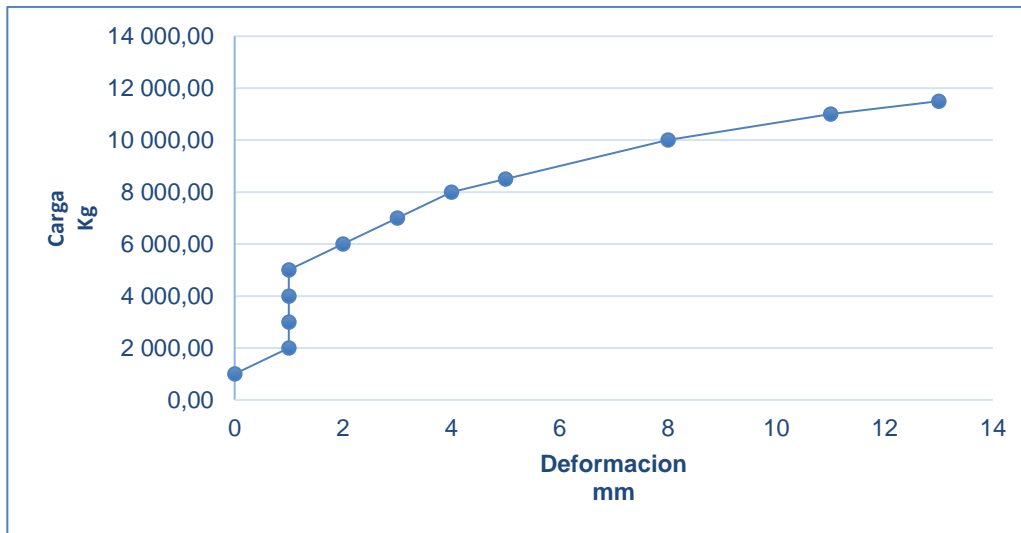
Se muestran las gráficas donde se muestra la relación entre la carga aplicada y la deformación causada por la flexión en las vigas tradicionales.

Figura 26. **Gráfica carga - deflexión de viga tradicional 1**



Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Gráfica carga - deflexión de viga tradicional 2**



Fuente: elaboración propia.

Analizando las gráficas de ambas vigas se puede apreciar que la deflexión causada por la carga tiene poca variación durante las primeras lecturas, antes de llegar a los 4 000 - 4 500 kg, en donde se observa un cambio de comportamiento: la deformación empieza a incrementar de manera lineal.

Este comportamiento se mantiene constante hasta llegar a la primera grieta de ambos elementos, en donde se observa que a partir de esa carga la razón de la deformación incrementa. Esto se debe posiblemente a que la carga sobrepasa la carga de diseño de las vigas, calculada en la sección 4.3.2.1. de este trabajo.

6.2.3. Análisis de resultados

- El comportamiento de ambas vigas tradicionales fue casi idéntico bajo la aplicación de carga, y era de esperarse porque ambos elementos fueron diseñados y elaborados con las mismas consideraciones, materiales, y condiciones.
- La primera grieta apareció en ambas vigas cuando la carga estaba en el rango de 8 000 kg a 8 500 kg y en ambos casos apareció a $L/2$ en la cara inferior de la viga, que era lo esperado.
- La carga última que soportaron las vigas fue mucho mayor a la carga de diseño. Para vigas tradicionales, la carga de diseño era de 6 900 kg, y la primera resistió una carga de 11 000 Kg (59 % más), y la segunda 11 500 Kg (66 % más). Esto debido a que, al momento de calcular la resistencia en base a los materiales y dimensiones de la viga, no se consideran factores de incremento.

Figura 28. **Ensayo viga 01 tradicional**



Fuente: elaboración propia, Sección de Metales y Productos Manufacturados, edificio T-5, USAC.

Figura 29. **Ensayo viga 02 tradicional**



Fuente: elaboración propia, Sección de Metales y Productos Manufacturados, edificio T-5, USAC.

- Ambas vigas presentaron grietas verticales al centro del elemento y no se aprecia ninguna fisura en los extremos, lo que indica que fallaron completamente por flexión.

6.2.4. Módulo de ruptura

En la siguiente tabla se muestran los resultados de los cálculos del módulo de ruptura para cada lectura tomada durante el ensayo de flexión.

Tabla VII. **Módulo de ruptura de vigas tradicionales**

VIGA 01		VIGA 02	
Lectura	MR (MPa)	Lectura	MR (MPa)
1	1,01	1	0,97
2	2,02	2	1,93
3	3,04	3	2,90
4	4,05	4	3,86
5	5,06	5	4,83
6	6,07	6	5,79
7	7,09	7	6,76
8 (1ra. grieta)	8,10	8	7,72
9	9,11	9 (1ra. grieta)	8,20
10	10,12	10	9,65
11 (fallo)	11,14	11	10,62
		12 (fallo)	11,10

Fuente: elaboración propia.

El módulo de ruptura determina la capacidad de resistencia del esfuerzo a flexión que tienen los elementos, y para ambos testigos fundidos tradicionalmente, el módulo de ruptura es casi igual, con una variación del 0,36 %.

6.3. Vigas fundidas con sistema de formaviga

El segundo grupo de vigas ensayadas fueron las vigas prefabricadas con sistema formaviga.

6.3.1. Carga y deflexión

La siguiente tabla muestra las lecturas de las deflexiones tomadas durante la aplicación de carga.

Tabla VIII. Carga y deflexiones en formavigas

Formaviga 01			Formaviga 02		
Lectura	Carga (kg)	Deformación (mm)	Lectura	Carga (kg)	Deformación (mm)
1	1 000,00	0	1	1 000,00	0
2	2 000,00	1	2	2 000,00	1
3	3 000,00	1	3	3 000,00	1
4	4 000,00	1	4	4 000,00	1
5	5 000,00	1	5	5 000,00	1
6	6 000,00	1	6	6 000,00	2
7	7 000,00	1	7	7 000,00	2
8	8 000,00	2	8 (1ra. grieta)	8 000,00	2
9 (1ra. grieta)	9 000,00	2	9	9 000,00	4
10	10 000,00	2	10	10 000,00	6
11	11 000,00	3	11	11 000,00	8
12	12 000,00	4	12	12 000,00	10
13	13 000,00	7	13	13 000,00	11
14	14 000,00	9	14	14 000,00	12
15 (fallo)	15 000,00	11	15 (fallo)	14 800,00	12

Fuente: elaboración propia.

Al principio las vigas presentaron una deflexión mínima de 1mm durante la aplicación de carga hasta llegar aproximadamente a la mitad de la carga última que soportaron. Luego la primera formaviga presento un comportamiento más rígido en comparación a la segunda. Esto se aprecia comparando las deformaciones obtenidas contra la misma carga aplicada a cada formaviga.

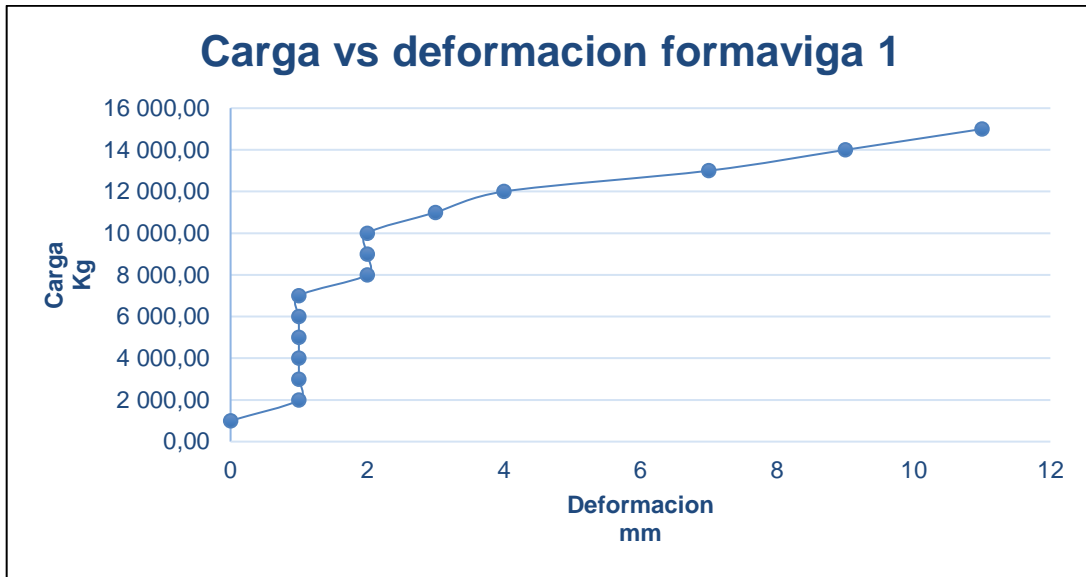
Ambas formavigas tuvieron una carga ultima muy parecida: 15,000 kg para la primera y 14,800 kg para la segunda, con deformaciones finales muy parecidas de 11 mm y 12 mm respectivamente. Esto indica en que ambas formavigas tuvieron un comportamiento casi idéntico durante el ensayo, lo cual era de esperarse porque las condiciones de ensayo fueron las mismas para ambas.

Respecto a la carga ultima teórica (calculada en la sección 4,3.2,1 de este trabajo), la carga soportada por el primer elemento fue 43 % mayor, y para el segundo elemento fue 41 % mayor. Este incremento se debe a que, al igual que las vigas tradicionales, al momento de despejar la carga teórica en la ecuación general no se consideran factores de incremento.

6.3.2. Gráficas

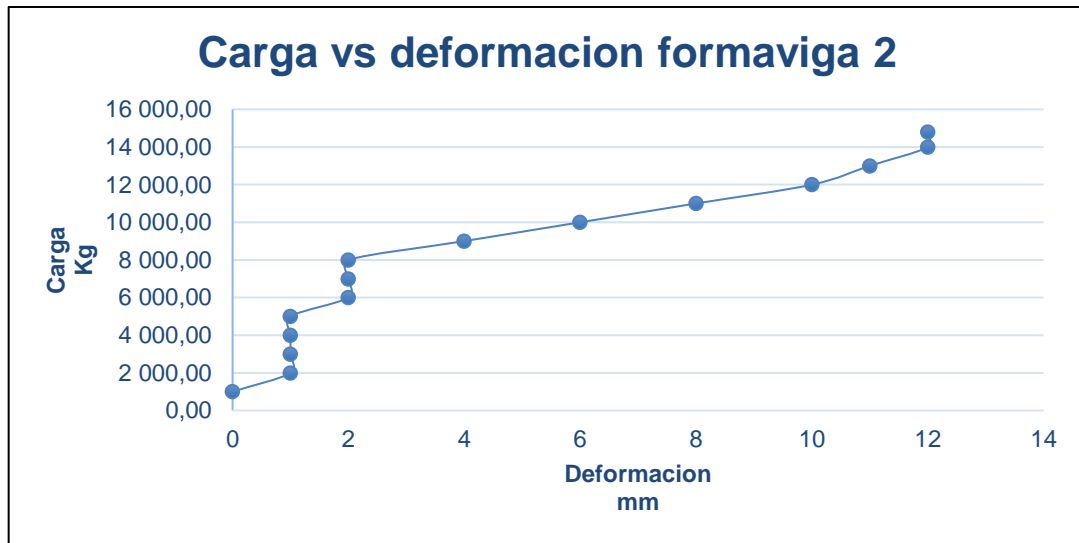
A continuación, se muestran las gráficas donde se muestra la relación entre la carga aplicada y la deformación causada por la flexión en las formavigas.

Figura 30. **Gráfica carga - deflexión de formaviga 1**



Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Gráfica carga - deflexión de formaviga 2**



Fuente: elaboración propia.

Analizando las gráficas de ambas vigas se puede apreciar que la forma en que se deformaron fue muy parecida, pero sufrieron las deformaciones bajo cargas diferentes. Ambas formavigas soportaron una carga última muy parecida, con una deformación casi idéntica.

6.3.3. Análisis de resultados

- El comportamiento de ambas vigas tradicionales fue casi idéntico bajo la aplicación de carga, y era de esperarse porque ambos elementos fueron diseñados y elaborados con las mismas consideraciones, materiales, y condiciones.
- La primera presentó la primera grieta alrededor de los 9 000 kg, y la segunda, alrededor de los 8 000 kg.
- Al momento de aparecer la primera grieta ambas formavigas presentaban la misma deformación de 2 mm, pero a partir de esta primera grieta la segunda formaviga tuvo un incremento en la deformación de manera continua en donde con cada incremento de carga se apreciaba un aumento en la deformación; en cambio la primera formaviga no tuvo mayor deformación luego de la aparición de la primera grieta. El comportamiento de la deformación de esta fue repentino, en donde se pudo apreciar incrementos considerables de deformación cuando la carga llegó a $\frac{2}{3}$ de la carga última.
- Ambas formavigas presentaron grietas verticales al centro del elemento y no se aprecia ninguna fisura en los extremos, lo que indica que fallaron completamente por flexión.

- La carga ultima que soportaron las vigas fue mucho mayor a la carga de diseño. Para las formavigas, la carga de diseño era de 10,498 kg, y la primera soporto 15,000 Kg (43 % más), y la segunda 14,800 Kg (41 % más). Esto debido a que, al momento de calcular la resistencia en base a los materiales y dimensiones de la viga, no se consideran factores de incremento.

Figura 32. **Ensayo formaviga 1**



Fuente: elaboración propia, Sección de Metales y Productos Manufacturados, edificio T-5, USAC.

Figura 33. **Ensayo formaviga 2**



Fuente: elaboración propia, Sección de Metales y Productos Manufacturados, edificio T-5, USAC.

6.3.4. Módulo de ruptura

En la siguiente tabla se muestran los resultados de los cálculos del módulo de ruptura para cada lectura tomada durante el ensayo de flexión.

Tabla IX. **Módulo de ruptura de formavigas**

Formaviga 01		Formaviga 02	
Lectura	Mr (Mpa)	Lectura	Mr (Mpa)
1	0,95	1	0,95
2	1,91	2	1,91
3	2,86	3	2,86
4	3,82	4	3,82
5	4,77	5	4,77
6	5,73	6	5,73
7	6,68	7	6,68
8	7,64	8 (1ra. grieta)	7,64
9 (1ra. grieta)	8,59	9	8,59
10	9,54	10	9,54
11	10,50	11	10,50
12	11,45	12	11,45
13	12,41	13	12,41
14	13,36	14	13,36
15 (fallo)	14,32	15 (fallo)	14,12

Fuente: elaboración propia.

El módulo de ruptura determina la capacidad de resistencia del esfuerzo a flexión que tienen los elementos, y para ambos testigos fundidos tradicionalmente, el módulo de ruptura es casi igual, con una variación del 1,41 %.

6.4. Comparación de resultados

Los cuatro elementos ensayados fueron fabricados con los mismos materiales bajo las mismas condiciones, por lo que los resultados del ensayo a flexión deberían ser idénticos entre elementos elaborados por el mismo método, pero diferentes en comparación con los elementos elaborados por el otro método.

A continuación, se presenta la comparación de los resultados de los ensayos entre los elementos fabricados por diferente método.

6.4.1. Carga máxima soportada

En la siguiente tabla se presentan los resultados del promedio de las cargas máximas soportadas por cada pareja de elementos.

Tabla X. **Comparación de la carga máxima**

Promedio vigas tradicionales	MR promedio formavigas
11,250Kg	14,900Kg

Fuente: elaboración propia.

Las formavigas soportaron 3,650 Kg más en promedio que las vigas tradicionales, lo que equivale a un incremento en la resistencia a flexión de 32,44 %, o un incremento en la capacidad de 1/3.

6.4.2. Módulo de ruptura

En la siguiente tabla se muestran los resultados del módulo de ruptura promedio por cada pareja de elementos.

Tabla XI. **Comparación del módulo de ruptura**

Promedio vigas tradicionales	MR promedio formavigas
11,12 MPa	14,22 MPa

Fuente: elaboración propia.

Por lo mismo que las formavigas soportaron una mayor carga, el módulo de ruptura incrementa de la misma forma, siendo en promedio 3,10 MPa mayor que el de las vigas tradicionales, equivalente a un incremento de 27,88 %.

6.4.3. Deformación máxima de los elementos

En la siguiente tabla se muestra la deformación máxima obtenida en los cuatro elementos ensayados.

Tabla XII. **Deflexión máxima**

Viga 01	Viga 02	Formaviga 01	Formaviga 02
12 mm	13 mm	11 mm	12 mm

Fuente: elaboración propia.

La deformación que sufrió cada tipo de elemento fue muy parecida al momento de fallar, sin embargo, se debe considerar que las formavigas soportaron una carga 32,44 % mayor que las vigas; lo que indica que su rigidez y capacidad de soportar deflexiones es mayor, gracias al refuerzo adicional que proporciona el molde “U” de la formaviga.

7. INTEGRACIÓN DE COSTOS Y TIEMPOS DE EJECUCIÓN

7.1. Comparación de tiempos

En cualquier proyecto de construcción, el análisis del tiempo de ejecución de obra es muy importante. Conforme avanza la obra, se puede observar el avance físico por unidad de tiempo (días, semanas, meses, e incluso años), y esto se refleja a través de un flujo económico, que es el dato que más atención le prestan tanto los clientes como los constructores.

Un flujo económico planeado y ordenado garantiza una correcta ejecución, y debe ir apegada a un cronograma de obra. Este cronograma es integrado y definido en la oferta económica de la obra, y posteriormente pactado mediante un contrato. Estos cronogramas son susceptibles a cambios; dependiendo de la naturaleza de las obras, se pueden producir adelantos, o más comúnmente, atrasos, los cuales repercuten directamente en el tiempo de ejecución, y por consiguiente en el costo de una obra.

Se analizan y comparan los tiempos de fabricación y puesta en servicio de los elementos tipo viga fabricados por los diferentes métodos.

7.1.1. Vigas tradicionales

El método constructivo más comúnmente utilizado para la fabricación de elementos de concreto reforzado en Guatemala es el armado y fundición en obra de los elementos estructurales, tales como: cimientos, muros, columnas, vigas, losas, entre otros.

Este sistema tiene la característica que cada paso para la fabricación de los elementos depende de que la actividad anterior esté completamente terminada; por ejemplo, no se puede fundir el concreto en un elemento hasta que no esté terminado el armado del refuerzo de acero, y a su vez este refuerzo de acero no se puede colocar si no está colocada la formaleta o moldes del elemento, y estos no pueden colocarse hasta haber colocado los puntales de obra falsa, y así sucesivamente.

Para una viga de concreto reforzado fundida in situ, comúnmente se siguen los siguientes pasos para su construcción:

- Trazo de ejes para ubicar la viga en la obra
- Colocación de puntales y formaleta, alineación con hilo
- Revisión de medidas en formaleta para que cuadren con la sección de viga a construir.
- Aplicación de desmoldante dentro del área a fundir con concreto.
- Colocación de refuerzo de acero: longitudinal, estribos y bastones.
- Verificación de ubicación del refuerzo, separación de estribos y separadores o dados para garantizar el recubrimiento requerido del refuerzo.
- Colocación del concreto, verificando previo su resistencia de diseño, vibración interna o externa para consolidar el concreto dentro del elemento.
- Tallado superficial si el elemento es independiente.
- Pasadas por lo menos 24 horas, se procede a quitar la formaleta de los laterales.
- Cuando el concreto alcanza la resistencia adecuada, se retira el resto de formaleta y puntales.
- Resane y retiro de rebabas.

Todo el proceso anterior debe ser supervisado por profesionales competentes en la materia, que sigan y conozcan los criterios, especificaciones y normativas nacionales e internacionales que apliquen, a modo de garantizar la calidad de la estructura. Es importante ponerle atención a esto porque cada elemento formara parte de una estructura que fue diseñada para trabajar en conjunto y si hay un elemento que fue mal construido o no se hizo conforme a lo especificado en planos, puede convertirse en un punto débil de la estructura.

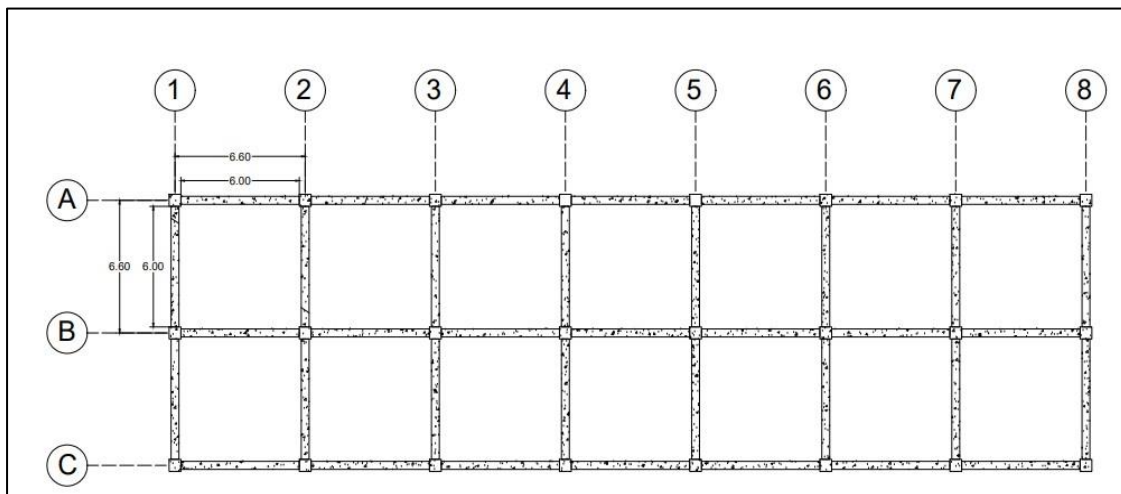
Así como se describió el proceso de la viga, se repite para todos los elementos que conforman la estructura mientras sean de concreto armado. Todo el proceso, como se mencionó anteriormente, está encadenado al resto de elementos a fundir y se debe realizar cumpliendo el cronograma de obra propuesto.

Las incidencias que pueden afectar el cronograma están relacionadas con los imprevistos de obra directamente, por ejemplo, falta de material en obra, ausencias de personal o personal poco calificado para realizar los trabajos, accidentes laborales, entre otros. Afectan también factores externos como permisos o licencias, eventos meteorológicos y falta de cumplimiento con el flujo económico. Todas estas incidencias afectan el avance de la obra y esta es susceptible a alteraciones en el cronograma y los tiempos de ejecución, lo que repercute en los costos de obra directamente.

Para el análisis de los tiempos de las vigas fundidas in situ en este trabajo, se va a enfocar en el periodo que abarca desde la colocación de obra falsa hasta el momento en que esta se retira, es decir cuando el elemento alcanza la resistencia suficiente para ser puesto en servicio.

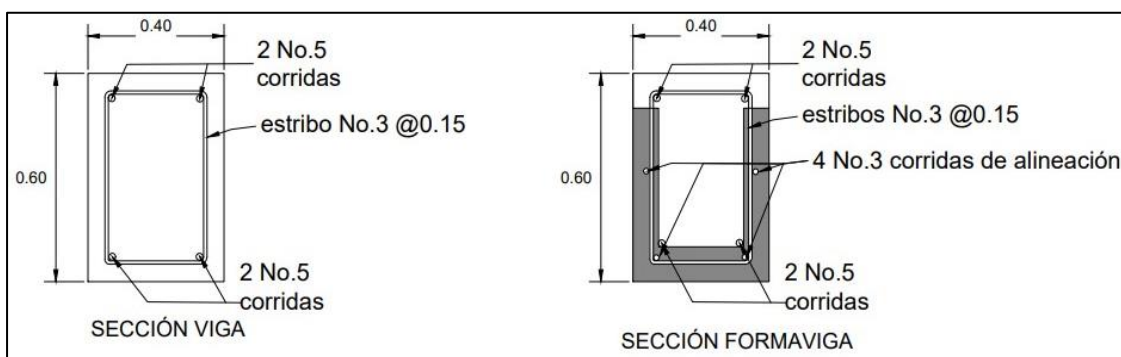
Con el fin de ejemplificar la comparación entre los dos métodos, se propone analizar una estructura de marcos rígidos de tres ejes literales y ocho ejes numerales, compuesto de un total de 37 vigas.

Figura 34. **Planta ejemplo para análisis de costos**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2018.

Figura 35. **Detalle de vigas para análisis de costos**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2018.

7.2. Programa de ejecución

Se presentan los cuadros de integración de costo directo para la planta ejemplo. Tanto para el ejercicio de vigas tradicionales fundidas in situ como para el sistema de formavigas se utilizaron precios actualizados del año 2021 en el mercado de la construcción en Guatemala.

7.2.1. Vigas fundidas in situ

Para la integración de las vigas fundidas in situ se consideraron los siguientes datos.

Tabla XIII. Dimensiones de vigas con sistema in situ

DIMENSIONES			
Vigas	Base (m)	Altura (m)	Longitud (m)
37	0,40	0,60	6,00
Volumen viga (m3)	Volumen Total (m3)		Metros lineales de viga (ml)
1,44	53,28		222,00

Fuente: elaboración propia

Tabla XIV. Tiempo de ejecución para método in situ

Tiempo de ejecución	Cantidad	Unidad
Trazo y alineación de ejes	0,5	días
Colocación de puntales, formaleta y desmoldante.	2	días
Colocación de armados	2,25	días
Revisión de armados y colocación de dados.	0,25	días
Fabricación, fundición y consolidación del concreto.	0,5	días
Tiempo de fraguado para retirar formaleta	1	días
Retiro de formaleta.	0,5	días
Curado, resane y tallado de vigas	2	días
Total días de ejecución =	9	días

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. Integración de costo directo método in situ

MATERIALES	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Varilla de acero 5/8"	ml	1 065,60	Q 11,63	Q 12 392,93
Varilla de acero 3/8"	ml	2 960,00	Q 3,91	Q 11 573,60
Alambre de amarre	lb	120,00	Q 5,60	Q 672,00
Clavos de 3"	lb	50,00	Q 6,30	Q 315,00
Concreto premezclado 4001	m3	53,28	Q 1 058,00	Q 56 370,24
Puntales telescópicos 2,10-4,10 mts	un/día	396,00	Q 5,50	Q 2 178,00
Plancha de Plywood Film Fase 3/4" x 4' x 8'	un	120,00	Q 299,00	Q 35 880,00
Paral Rústico 3" x 4" x 10'	un	50,00	Q 55,00	Q 2 750,00
Silleta piramidal 2,5cm	un	814,00	Q 0,33	Q 268,62
Curador base agua	galon	4,00	Q 27,95	Q 111,80
Cemento embolsado	saco	14,00	Q 62,00	Q 868,00
Desmoldante	galon	2,00	Q 50,00	Q 100,00
Total materiales:				Q 123 480,19
Mano de obra (a destajo)	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Total
Hechura y colocación de armadura no,3	ml	2 960,00	Q 0,84	Q 2 486,40
Hechura y colocación de armadura no,5	ml	1 065,60	Q 1,40	Q 1 491,84
Colocación y fundición de concreto con bomba (incluye operador + bomba + personal)	m3	53,28	Q 89,29	Q 4 757,37
Total m,o (a destajo):				Q 8 735,61
Mano de obra (planilla)	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Total
3 albañiles	día	9,00	Q 150,00	Q 4 050,00
3 armadores	día	3,00	Q 150,00	Q 1 350,00
6 ayudantes	día	9,00	Q 100,00	Q 5 400,00
Total m,o (planilla)				Q 10 800,00
TOTAL COSTO DIRECTO:				Q143 015,80

Fuente: elaboración propia.

El tiempo de ejecución utilizando el sistema tradicional de vigas fundidas in situ es de 9 días, y el costo por metro lineal de vigas es de Q 644,22.

7.2.2. Sistema de formavigas

Para la integración de vigas utilizando el sistema de formavigas se utilizaron las mismas dimensiones de vigas tradicionales, pero debido a que esta utiliza cierto volumen del total de la viga final, el volumen de concreto a colocar en obra

se reduce. Este se calcula tomando en cuenta solo el vacío que queda dentro de la Formaviga.

Tabla XVI. **Dimensiones de vigas con formaviga**

DIMENSIONES			
Formavigas	Base (m)	Altura (m)	Longitud (m)
37	0,40	0,60	6,00
Volumen viga - Formaviga (m3)		Volumen Total (m3)	Metros lineales de viga (ml)
0,18		38,89	222,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Tiempo de ejecución con sistema de formavigas**

Tiempo de ejecución	Cantidad	Unidad
Trazo y alineación de ejes.	0,5	días
Colocación de puntales (obra falsa)	1	días
Colocación de formavigas.	1	días
Colocación de refuerzo longitudinal.	1,5	días
Revisión de armados y colocación de dados.	0,25	días
Fabricación, fundición y consolidación del concreto.	0,5	días
Tiempo de fraguado para retirar formaleta	0	días
Retiro de obra falsa.	0,25	días
Total días de ejecución =	5	días

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. Integración de costo directo sistema formaviga

Materiales	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Total
Varilla de acero 5/8"	ml	1,065.60	Q 11.63	Q 12,392.93
Varilla de acero 3/8"	ml	888.00	Q 3.91	Q 3,472.08
Alambre de amarre	lb	35.00	Q 5.60	Q 196.00
Concreto premezclado 4001	m3	38.39	Q 1,058.00	Q 40,616.62
Puntales telescópicos 2.10-4.10 mts	un/día	148.00	Q 5.50	Q 814.00
Silleta piramidal 2.5cm	un	407.00	Q 0.33	Q 134.31
Curador base agua	galon	5.00	Q 27.95	Q 139.75
Formaviga 0.50x0.40mts (incluye estribos no.3 @0.15m)	ml	222.00	Q 296.42	Q 65,805.24
Total materiales:				Q 123,570.93
Mano de obra (a destajo)	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Total
Colocación de formaviga (incluye grúa con operador + personal calificado)	global	1.00	Q 13,857.00	Q 13,857.00
Hechura y colocación de armadura no.5	ml	1,065.60	Q 1.40	Q 1,491.84
Colocación y fundición de concreto con bomba (incluye operador + bomba + personal)	m3	38.39	Q 89.29	Q 3,427.84
Total m.o (a destajo):				Q 18,776.68
Mano de obra (planilla)	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Total
1 albañil	día	5.00	Q 150.00	Q 750.00
2 armadores	día	1.50	Q 150.00	Q 450.00
4 ayudantes	día	5.00	Q 100.00	Q 2,000.00
Total m.o (planilla)				Q 3,200.00
TOTAL COSTO DIRECTO:				Q145,547.61

Fuente: elaboración propia.

El tiempo de ejecución utilizando formavigas es de 5 días, y el costo por metro lineal de vigas es de Q 655,62.

7.3. Análisis de resultados

En la siguiente tabla se presenta la integración del costo de la mano de obra de la diferencia de días de trabajo necesarios entre el sistema tradicional de fundición in situ y el sistema de formavigas.

Tabla XIX. **Diferencia en costo de mano de obra**

Ahorro en mano de obra por diferencia de días	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Total
3 albañiles	día	4,00	Q 150,00	Q 1 800,00
3 armadores	día	1,50	Q 150,00	Q 675,00
6 ayudantes	día	4,00	Q 100,00	Q 2 400,00
Total m.o (planilla)				Q 4 875,00
Total de formaviga restando costos de mano de obra =				Q140 672,61

Fuente: elaboración propia.

Restando la diferencia de mano de obra por los días extras trabajados del sistema in situ en comparación al sistema con formavigas, el sistema de formavigas reduce el precio por metro lineal a Q 633,66.

En comparación con el precio unitario de las vigas fundidas tradicionalmente (Q 644,22) las formavigas presentan un ahorro de 1,64 % en el costo directo por unidad.

7.3.1. Ventajas del sistema prefabricado de formavigas

Adicional a lo anterior se pueden obtener otras ventajas económicas y de tiempo con el uso de prefabricados:

- Si la obra es de varios niveles o de gran tamaño, se ahorra en el consumo de formaleta, ya que en la construcción repetitiva la formaleta debe cambiarse después de cierto uso.
- Se generan más desperdicios y pérdidas de madera y materiales al fabricar las formaletas en obra.

- Dependiendo el tamaño de la obra se requeriría de un taller de carpintería para la fabricación y mantenimiento de formaletas, con el costo adicional de personal, herramientas y espacio en obra que muchas veces es limitado.
- Si se decide por alquilar puntales para obra falsa, con el uso de formavigas se requiere alquilar menos cantidad.
- Se logran ahorros importantes en desperdicio, corte y doblado de acero al no realizarlo en obra porque la forma viga tiene los estribos incluidos tal y como se especifican en los planos estructurales. Esto también reduce los espacios de talleres de armado en obra.
- El control de calidad de un producto fabricado en plantas especializadas es más constante, y se pueden reducir costos en personal de obra para la supervisión y control de calidad de los elementos hechos in situ.
- Ahorro en tallado y resane de vigas en obra por el acabado que trae la formaviga.
- Uno de los factores más importantes es el tiempo, porque, si se toma el ejemplo utilizado aquí y se multiplica por 5 niveles, se obtiene un adelanto en obra de 25 días hábiles, y generan ahorros importantes en costos de mano de obra e indirectos. Aparte que al entregar el proyecto antes del tiempo establecido se le da al cliente final la oportunidad de poner en servicio la estructura antes de lo previsto.

7.3.2. Desventajas del sistema prefabricado de formavigas

Las principales desventajas que presenta utilizar el sistema de vigas prefabricadas son las siguientes:

- El costo del transporte e instalación depende de la ubicación del proyecto y que este cuente con espacio suficiente para la manipulación y montaje de las formavigas, por lo que para una obra que este alejada de la ciudad el costo puede elevarse por temas de transporte.
- Para obras relativamente pequeñas (menores a 500 metros cuadrados), el sistema puede resultar más costoso en comparación con el método tradicional. Esto se debe al costo adicional del transporte de los elementos y uso de grúa, que por el volumen reducido de producto a instalar puede generar costos más altos que fundir los elementos in situ.

CONCLUSIONES

1. El análisis de resultados obtenido de los ensayos a flexión simple demuestra que las vigas fabricadas con el sistema prefabricado de formavigas tienen una mayor resistencia a la flexión simple en comparación con las vigas fundidas por métodos tradicionales. En los ensayos de flexión realizados presentaron una resistencia 32,44 % mayor a las vigas fundidas por métodos tradicionales.
2. Las vigas construidas con sistema prefabricado de formavigas tienden a ser más rígidas y presentan una mayor resistencia a la deformación causada por las cargas que generen flexión.
3. El sistema de formavigas presenta varias ventajas frente al sistema tradicional, tales como: reducción de personal en obra, reducción de materiales para formaletas, reducción de tiempos de ejecución de obra, mayor control de calidad al ser un elemento prefabricado en planta industrial y reducción de costo por mejor acabado exterior. Las desventajas del sistema ante el sistema tradicional son: se requiere de equipo y personal calificado para elaboración, transporte y colocación de los elementos en obra; y se necesita de un volumen grande de elementos para que los costos y tiempos de obra mejoren.
4. Con el ejercicio de comparación de costos y tiempos de ejecución, se demuestra que el costo directo de la Formaviga por unidad es 1,64 % más económico en comparación con el método tradicional, adicional a esto tiene un ahorro en tiempo de ejecución de 5 días, que son 4 días de ahorro

en comparación con los 9 días de ejecución con el método tradicional. Esto implica un ahorro del 44 % del tiempo de ejecución por nivel (para el ejemplo integrado en este trabajo de investigación).

RECOMENDACIONES

1. Realizar más ensayos (flexión, corte, torsión, entre otros), para obtener más información de las posibles variaciones de las propiedades mecánicas que pueden presentarse entre vigas elaboradas por un método u otro, ya que en este trabajo de investigación solamente se ensayaron vigas a flexión simple.
2. Utilizar el sistema de formavigas en obras y edificaciones de gran tamaño (mayores a 500 metros cuadrados de construcción), porque los ahorros de costo, tiempo y mano de obra se pueden reflejar más en volúmenes grandes de producción.
3. Tomar en cuenta la distancia de la obra al momento de considerar el uso de formaviga en un proyecto por temas de costos de transporte y accesos a grúa para el montaje. Como se ha mencionado en el punto anterior, si la obra tiene un volumen significativo o de varios niveles, el uso de la formaviga provee ahorros importantes en tiempos de ejecución.
4. Capacitar al personal en obra para la manipulación del sistema de formavigas, y se puede requerir de capacitaciones al personal de obra (esto aplica si se decide por instalar por cuenta propia el sistema de formavigas).

5. Poner atención en la fundición del concreto en obra que llena la formaviga, para evitar que queden ratoneras o espacios vacíos dentro de la formaviga, que serían muy difíciles de detectar. Para esto se recomienda que el concreto a usar tenga la graduación adecuada de agregado grueso y que sea lo suficientemente fluido para llenar todos los espacios sin complicaciones, adicional a las buenas prácticas de colocación, consolidación y supervisión del concreto en obra.

BIBLIOGRAFÍA


1. COGUANOR. *NTG 41017 h1. Método de ensayo. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.* Guatemala: Ministerio de Economía, 2017. 23 p.
2. _____. *NTG 41017 h8. Método de ensayo. Determinación del esfuerzo de flexión en el concreto (Utilizando una viga simplemente soportada con carga al centro de la luz).* Guatemala: Ministerio de Economía, 2014. 10 p.
3. _____. *NTG 41060. Práctica para la elaboración y curado de especímenes de ensayo de concreto en el laboratorio.* Guatemala: Ministerio de Economía, 2010. 23 p.
4. _____. *NTG 41061. Práctica para la elaboración y curado de especímenes de ensayo de concreto en la obra.* Guatemala: Ministerio de Economía, 2010. 14 p.
5. GALINDO CABRERA, Ronald Estuardo. *Consideraciones para el diseño de vigas pretensadas simplemente apoyadas, con una luz de 6,15 metros.* Trabajo de graduación de MSc. en Estructura. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2011. 108 p.

6. HIGUEROS PICÉN, Susana Mariela. *Materiales de construcción innovadores en el mercado guatemalteco*. Trabajo de graduación de Arquitectura. Facultad de Arquitectura, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2016. 181 p.
7. Instituto Americano del Concreto. *ACI 318-19. Requisitos de reglamento para concreto estructural*. USA: ACI, 2019. 680 p.
8. NILSSON, Arthur. *Diseño de Estructuras de Concreto*. 12^a ed. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw Hill, 2005. 38, 722 p.
9. NOVAS CABRERA, Joel Alexander. *Sistemas constructivos prefabricados aplicables a la construcción de edificaciones en países en desarrollo*. Trabajo de graduación de maestría, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid, 2010. 57 p.
10. ROSALES GUZMÁN, Luis Rodolfo. *Análisis del comportamiento de una viga de concreto armado, ensayada a flexión, reforzada con barras de fibra de carbono*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2008. 99 p.
11. SIMÓN CHALÍ, Jony Amilcar. *Aporte del amarre de estribos en elementos de concreto reforzado sometidos a flexión*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2016. 106 p.

12. TORRES CHAPARRO, Sergio Mauricio. *Comparación entre formaletas de sistema industrializado respecto a sistema convencional desde el punto de vista estructural–Caso de estudio*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad Tecnológica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia, 2018. 86 p.
13. VÁSQUEZ RODRÍGUEZ, Otto Danilo. *Guía de construcción de viviendas en serie, con sistemas estructurales prefabricados y fabricados in situ*. Trabajo de graduación de Ing. Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2004. 85 p.
14. VILLATORO DE LA ROSA, Ricardo. *Guía teórica y práctica del curso de concreto preforzado*. Trabajo de graduación de Ing. Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2005. 175 p.

ANEXOS

Anexo 1. Oferta de formaviga por metro lineal



Ref. 0226-21.
Guatemala, 24 de Junio 2021.

Señor: Sebastian Vasquez.

Ref.: Forma vigas para Edificio.

Estimados Señor Vasquez.

En base a la información que nos proporcionara, tenemos el agrado de presentarle nuestra oferta económica de los sistemas prefabricados para el proyecto: **EDIFICIO DE OFICINAS**, ubicado en la zona 12 de la ciudad.

NUESTRO PRESUPUESTO INCLUYE:

Fabricación, transporte y montaje de:

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD
Forma vigas principales y secundarias, de 0.40 m. x 0.50 m. y longitudes variables.	222.00	metros

Precio de prefabricados:Q 65,805.24
Transporte y montaje:Q 13,857.00
Precio Total de la oferta:Q 79,662.24


(Setenta y nueve mil seiscientos sesenta y dos Quetzales con 24/100) IVA incluido 12%.

TIEMPO DE ENTREGA:
A convenir con el cliente.

ALCANCES:
Planos taller, fabricación, transporte y montaje de los productos descritos en la presente oferta.

Preesforzados y Construcciones S.A.
5 ave. 5 55 Z.14 Europa Sur Torre II, 2do. Nivel, Guatemala C.A. Tel: (502) 2328 8000 Fax: (502) 2328 8070 www.precon.com.gt

Continuación del anexo 1.



Todos nuestros procesos de fabricación se realizan bajo los estándares de calidad de PreCon, empresa con más de 45 años de experiencia en el mercado y a solicitud del cliente podemos emitir los informes de calidad y garantía que requiera.

REQUERIMIENTOS POR PARTE DEL CLIENTE:

- Accesos adecuados para nuestro transporte y grúas, libres de obstáculos aéreos y de curvas horizontales o verticales que dificulten la operación.
- Colocación y acero de refuerzo principal en las forma vigas, tanto inferior como superior, así como el gancho superior que cierra el estribo.
- Obra falsa para el apoyo permanente de las forma vigas.
- Área para parquear la grúa y bodega en obra para el equipo de montaje.

ESPECIFICACIONES DE MATERIALES Y DISEÑOS:

1. Acero de refuerzo ASTM A706, grado 60
2. Concreto armado: $f'c$ de 4000.00 PSI.

Adicional a lo anterior, nuestros procesos de diseño y de fabricación cumplen con las normativas de: ACI (American Concrete Institute), PCI (Prestressed Concrete Institute), PTI (Post Tension Institute), ASTM (American Society of Testing Materials) y COGUANOR.

NO SE INCLUYEN:


1. Gastos de contratación.
2. Pago ni tramite de ningún permiso y/o licencia de construcción.
3. Ningún tipo de fianza y seguro.
4. Refuerzo principal corrido ni refuerzo de bastones superiores en forma vigas, que va colocado en obra después del montaje de los prefabricados.
5. Refuerzo de complemento de los estribos, que se coloca en obra.
6. Cualquier rubro que no esté descrito en el cuadro de renglones.

FORMA DE PAGO:

50 %	Anticipo.
30 %	Previo al despacho del producto a obra.
20 %	Contra entrega.

Preesforzados y Construcciones S.A.
5 ave. 5-55 Z.14 Europlaza Torre II, 2do. Nivel, Guatemala C.A. Tel: (502) 2328-8000 Fax: (502) 2328-8070 www.precon.com.gt

Continuación del anexo 1.




RESERVAS:

1. Nuestra Empresa se reserva el derecho de sostener la oferta o de revisar el valor ofertado por cualquier variación de precios de materiales, servicios o mano de obra que puedan presentarse.
2. Si en el transcurso del proyecto surgen ordenes de cambio, se presupuestarán por aparte sin tomar en cuenta los precios unitarios de la presente oferta.
3. Nuestra propuesta está basada en la información proporcionada por el cliente, cualquier cambio que surja con respecto al diseño o concepto original, hará variar los valores y tiempos de entrega de la presente oferta.
4. Nuestra oferta es de carácter integral, por lo que no se puede dividir o fraccionar sin generar cambios de precios o tiempos de entrega.
5. Esta oferta está calculada en base al plano proporcionado por el cliente, si al tener las medidas reales de obra cambia la cantidad de metros de forma viga, se cobrará en base a lo entregado real en el proyecto.

Agradecemos su atención a la presente y la oportunidad de servirle. Quedamos a sus órdenes para cualquier información adicional que se requiera.

Atentamente,

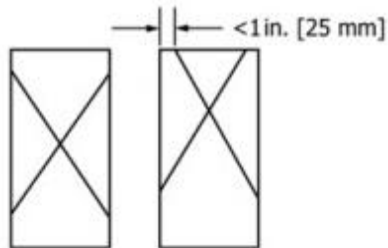


✓ Ing. Francisco Mejía Villafuerte.
Gerente División Construcción.

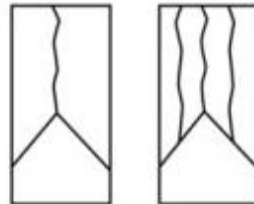
Preesforzados y Construcciones S.A.
5 ave. 5-55 Z.14 Europlaza Torre II, 2do. Nivel, Guatemala C.A. Tel: (502) 2328-8000 Fax: (502) 2328-8070 www.precon.com.gt

Fuente: Departamento de Ventas, PreCon.

Anexo 2. Esquema de los modelos de fractura típicos



Tipo 1
Conos razonablemente bien formados en ambos extremos, fisuras a través de los cabezales de menos de 1 pulg (25 mm)



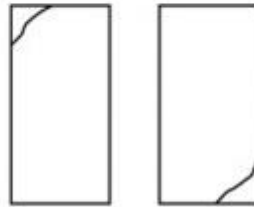
Tipo 2
Conos bien formados en un extremo, fisuras verticales a través de los cabezales, cono no bien definido en el otro extremo



Tipo 3
Fisuras verticales encolumnadas a través de ambos extremos, conos no bien formados



Tipo 4
Fractura diagonal sin fisuras a través de los extremos; golpee suavemente con un martillo para distinguirla del Tipo 1



Tipo 5
Fracturas en los lados en las partes superior o inferior (Ocurre comúnmente con tapas no adheridas)



Tipo 6
Similar al Tipo 5, pero el extremo del cilindro es puntiagudo

Fuente: COGUANOR. *NTG 41017 h1 Método de ensayo. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.* p.19.