

## CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Gustavo Rojas Moya, Ing. Ángel Navarro Mora, Ing. Mauricio Araya Rodríguez, Ing. Sonia Vargas Calderón, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

GUSTAVO  
ADOLFO  
ROJAS  
MOYA  
(FIRMA)

Firmado digitalmente por GUSTAVO ADOLFO ROJAS MOYA (FIRMA)  
Fecha: 2021.03.19 11:54:35 -06'00'

---

Ing. Gustavo Rojas Moya.  
Director

ANGEL  
HUMBERTO  
NAVARRO  
MORA (FIRMA)

Firmado digitalmente por ANGEL HUMBERTO NAVARRO MORA (FIRMA)  
Fecha: 2021.03.19 11:40:21 -06'00'

---

Ing. Ángel Navarro Mora.  
Profesor Guía

MAURICIO  
ESTEBAN  
ARAYA  
RODRIGUEZ  
(FIRMA)

Firmado digitalmente por MAURICIO ESTEBAN ARAYA RODRIGUEZ (FIRMA)  
Fecha: 2021.03.19 09:54:14 -06'00'

---

Ing. Mauricio Araya Rodríguez.  
Profesor Lector

SONIA  
VARGAS  
CALDERON  
(FIRMA)

Firmado digitalmente por SONIA VARGAS CALDERON (FIRMA)  
Fecha: 2021.03.23 09:24:49 -06'00'

---

Ing. Sonia Vargas Calderón  
Profesora Observadora

# **Comportamiento de vigas de concreto reforzado sometidas a flexión a partir de modelos a escala reducida**

# Abstract

This project evaluated the behavior of reinforced concrete beams subjected to flexure, based on reduced-scale models, due to the need to reduce the space and cost of materials used for the elaboration of full-scale models.

It began with the establishment of the prototype beam and scale to be considered, being essential to know the capacity of the instrumentation to be used and the availability of materials.

3 beams at 1: 3 scale were elaborated in which micro-concrete and galvanized wire were considered, to represent the prototype beam, the beams were elaborated with the purpose of carrying out flexural tests by loads in thirds of the length.

The flexural tests demonstrate how from scale models, results close to the theoretical ones determined with a computer program can be obtained, it's fundamental, know the mechanical properties of the materials used.

To establish a procedure for scaling reinforced concrete models, a guide was made that describes the steps to follow and considerations to achieve an adequate representation of a concrete element. This work is an application of this guide, focused on reinforced concrete beams.

**Keywords:** microconcrete, reduced-scale models, concrete, reinforced concrete, compressive strength, flexure.

# Resumen

El presente proyecto evaluó el comportamiento de vigas de concreto reforzado sometidas a flexión, a partir de modelos a escala reducida, debido a la necesidad de disminuir el espacio y costo de materiales utilizados, para la elaboración de modelos a escala real.

Se inició con el establecimiento de la viga prototipo y escala a considerar, siendo fundamental conocer la capacidad de la instrumentación a utilizar y la disponibilidad de materiales.

Se elaboraron 3 vigas a escala 1:3 en las cuales se consideró microconcreto y alambre galvanizado, con el fin de representar la viga prototipo, dichas vigas se elaboraron con el propósito de realizar ensayos de flexión, mediante cargas en los tercios de la longitud.

Los ensayos a flexión demuestran como a partir de modelos a escala, se pueden obtener resultados cercanos a los teóricos determinados con un programa computacional, es fundamental, conocer las propiedades mecánicas de los materiales utilizados.

Con el fin de establecer un procedimiento para escalar modelos de concreto reforzado, se realizó una guía que describe los pasos a seguir y consideraciones a tomar en cuenta, para lograr una adecuada representación de un elemento de concreto. El presente trabajo es una aplicación de dicha guía, enfocado en vigas de concreto reforzado.

**Palabras clave:** microconcreto, modelos a escala reducida, concreto reforzado, resistencia a la compresión, flexión.

# **Comportamiento de vigas de concreto reforzado sometidas a flexión a partir de modelos a escala reducida**

# **Comportamiento de vigas de concreto reforzado sometidas a flexión a partir de modelos a escala reducida**

RÓNALD FALLAS BARBOZA

Proyecto final de graduación para optar por el grado de  
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Febrero del 2021

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

# Contenido

PREFACIO.....	1
RESUMEN EJECUTIVO .....	2
INTRODUCCIÓN .....	4
METODOLOGÍA .....	16
RESULTADOS.....	31
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	37
CONCLUSIONES .....	42
RECOMENDACIONES.....	44
APÉNDICES .....	45
ANEXOS .....	53
REFERENCIAS.....	74

# Prefacio

Actualmente, es común el uso de concreto reforzado para la construcción de estructuras, Nilson (2004) menciona algunas de sus principales ventajas, donde se destaca el costo relativamente bajo, la buena resistencia al clima, al fuego y a la compresión; y la excelente capacidad de moldeado del concreto con la alta resistencia a la tensión y la mayor ductilidad y tenacidad del acero. El estudio del comportamiento de las estructuras de concreto reforzado, es de vital importancia ya que elementos como las vigas, forman parte del sistema sismorresistente de una estructura.

Debido al avance que se presenta actualmente en el ámbito computacional, existe una gran variedad de softwares que permiten modelar el comportamiento de estructuras ante la aplicación de cargas. No obstante, se pueden realizar estudios mediante la utilización de modelos físicos, además Rodríguez (2007) menciona que los modelos analíticos de comportamiento son desarrollados y puestos a punto por comparación de resultados obtenidos de ensayos a modelos experimentales, por lo tanto, ambos avances: la moderación física y la moderación analítica se realizan al mismo tiempo.

Según Sigcha (2014), las principales ventajas de los modelos físicos son el estudio de una estructura completa cargada hasta el colapso, cuando el análisis matemático no es adecuado o imposible, además los modelos físicos permiten al experimentador observar, analizar y modificar la estructura a través del modelo.

No obstante, los modelos físicos a escala real poseen limitaciones, Lirola et al. (2017) mencionan que las principales desventajas de los modelos a escala real son el costo relativamente alto y el espacio que estos requieren. Debido a lo anterior, se han realizado modelos estructurales a escala reducida, los cuales se pueden definir como “una representación física a escala de una estructura o una porción de esta” (Harris & Sabnis, 1999), además, dichos autores mencionan que los modelos estructurales han jugado un rol

significativo en ingeniería estructural, en investigación, diseño y educación. Por su parte, Bustos (2017) menciona que el uso de modelos a escala reducida es una de las principales técnicas utilizadas por los laboratorios estructurales alrededor del mundo, para realizar investigaciones acerca del comportamiento estructural en distintos elementos.

Debido a lo anterior, la principal importancia de los modelos estructurales a escala reducida es la acertada representación del comportamiento de una estructura ante la aplicación de cargas, a la vez que se disminuye el desperdicio de materiales porque el tamaño de los elementos se reduce.

El objetivo principal de este estudio es evaluar el comportamiento de vigas de concreto reforzado sometidas a flexión a partir de modelos a escala reducida. Además, se realizará una guía que describe los pasos a seguir para realizar modelos de concreto reforzado a escala reducida.

Por último, quería agradecer primero a Dios por darme la fuerza y sabiduría durante este proceso, a mi familia por ser mi apoyo incondicional y estar siempre a mi lado; a mis amigos que me acompañaron a lo largo de esta etapa y me brindaron compañía, aprendizaje y apoyo durante mis estudios, a los profesores de Ingeniería en Construcción por todo el conocimiento transmitido, en especial al profesor Ángel Navarro, por brindarme la posibilidad de realizar el presente proyecto y por la constante ayuda y consejo. Finalmente, al personal del CIVCO por su colaboración durante el desarrollo de este proyecto.

# Resumen ejecutivo

El presente proyecto se realizó en el laboratorio del Centro de Investigación en Vivienda y Construcción (CIVCO), tiene como objetivo general, evaluar el comportamiento de vigas de concreto reforzado sometidas a flexión a partir de modelos a escala reducida.

Para establecer la viga prototipo que se estudiará, se tomaron en cuenta los requerimientos para diseño de elementos a flexión, definidos por el American Concrete Institute (ACI) y el Código Sísmico de Costa Rica (CSCR-10). Una vez identificados los requerimientos necesarios, se consideró una viga con 20 cm de ancho y 40 cm de peralte, así como una luz de 3 metros. Con respecto al acero de refuerzo, se estableció como acero inferior, 3 varillas #4 y como acero superior 2 varillas #3. Por otro lado, a pesar de que, según los cálculos de capacidad por cortante, el concreto era capaz de soportar los esfuerzos cortantes, se consideraron aros #3 a cada 15 cm, con el fin de generar confinamiento y garantizar una falla dúctil.

Posterior al establecimiento de la viga patrón, se determinó la escala a utilizar, la cual corresponde a 1:3, esta selección de la escala contempla tanto la capacidad de los instrumentos a utilizar, así como los materiales disponibles en el mercado.

Para representar al concreto en un modelo a escala reducida, es necesario la utilización de microconcreto, el cual es una mezcla de mortero, donde se controla el tamaño del agregado, se definió una dosificación a utilizar para la elaboración de las vigas.

Con el fin de comparar alternativas de agregado fino, se analizaron dos agregados provenientes de fuentes diferentes, la primera es obtenida a partir de un río y la segunda proviene de un tajo. Los ensayos de caracterización realizados se basaron en las disposiciones establecidas por el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO), además de las normas

del American Society of Testing and Materials (ASTM). A partir de los resultados obtenidos, se seleccionó y justificó la elección del agregado fino a utilizar para la elaboración de microconcreto.

En relación con la representación del acero en las vigas a escala reducida, se consideró alambre galvanizado, la varilla #3 se representó mediante un alambre #10, mientras que la varilla #4 se representó mediante un alambre #8. Debido a que el alambre se vende en condición lisa, esta condición limita la adherencia entre el refuerzo y el concreto, por lo que se realizó un proceso de corrugado al alambre utilizado, como actualmente el CIVCO carece de instrumentos que permitan corrugar alambre, se realizaron marcas a lo largo de este, con la ayuda de una tenaza.

Se realizó el ensayo a tracción al alambre galvanizado, tanto en condición lisa, como corrugada, con el propósito de determinar las propiedades mecánicas del material, así como el efecto que produce el proceso de corrugado en las propiedades mecánicas del alambre galvanizado. Posterior al corrugado, se procedió a ensamblar la armadura de acero de las vigas a escala, para la cual se realizaron aros con las dimensiones específicas y se sujetaron al refuerzo longitudinal.

Se elaboraron un total de 3 vigas a escala reducida, además de cilindros a escala, para conocer el desarrollo de resistencia del microconcreto utilizado en las vigas, además se confeccionaron 3 cilindros de 200x100mm con el fin de comparar la resistencia obtenida con los cilindros a escala, con la definición de  $f'c$ , según el ACI.

En relación con la resistencia de los cilindros a escala, se evidenció como estos presentaron un acelerado desarrollo de resistencia, en la primera semana de curado. No obstante, se logró obtener una diferencia de 6,1%, en relación con la resistencia de diseño, a una edad de 28 días. Con respecto a la definición de

resistencia a la compresión establecida por el ACI, se obtuvo una diferencia de 4,7%.

Como parte del proyecto, se generó un documento titulado “Guía para elaborar modelos a escala reducida de concreto reforzado” el cual presenta teoría relacionada con modelos a escala reducida, así como un procedimiento y consideraciones necesarias para un adecuado proceso de elaboración de modelos a escala reducida. Este documento presenta también una comparación a través de una matriz de priorización, de diferentes programas computacionales, con los cuales es posible determinar el comportamiento teórico de los elementos en estudio.

Una vez realizados los ensayos de flexión, se registraron las deformaciones unitarias en las fibras superiores e inferiores por medio de galgas extensométricas, así como los desplazamientos en la zona central de la viga.

Durante la ejecución de los ensayos de flexión a las vigas, se evidenció el proceso de agrietamiento, el cual fue similar para las tres vigas ensayadas, estas grietas se generaron en el tercio central de la viga y según su forma y longitud, evidencian una falla de tipo subreforzada.

Una vez obtenidos los resultados experimentales, se procedió a compararlos con el comportamiento teórico de las vigas, determinado a partir del programa computacional Opensees.

El diagrama de momento-curvatura, se comparó con el diagrama obtenido a partir del programa computacional Opensees, no obstante, durante la ejecución del ensayo, se evidenció como las galgas extensométricas presentaron fallas en la toma de datos, lo que provocó que no se pudiera obtener un registro completo del ensayo.

En relación con el gráfico de fuerza-desplazamiento, se logró representar el comportamiento experimental, así como obtener una diferencia en la carga máxima de 1,6% con respecto a la viga prototipo y a la deflexión máxima, se obtuvo una diferencia de 10,5% con respecto al mismo modelo de la viga prototipo.

# Introducción

El presente estudio tiene como objetivo, evaluar el comportamiento de vigas de concreto reforzado sometidas a flexión, a partir de modelos a escala reducida.

Debido a la función estructural que cumplen los elementos de concreto reforzado, tales como columnas, losas o vigas, es de suma importancia estudiar su comportamiento, ante la aplicación de cargas.

Dicho estudio del comportamiento de estructuras puede ser realizado a partir de modelos a escala reducida, los cuales “son una representación física a escala de una estructura o una porción de esta” (Harris & Sabnis, 1999) y según Bustos (2017) han permitido estudiar, analizar y comprender el comportamiento de las estructuras en diferentes escenarios y solicitaciones de carga.

Para construir un modelo de concreto reforzado a escala reducida, es necesario seguir una serie de pasos que permitan obtener un modelo con características similares al prototipo considerado, por lo que es necesario el desarrollo de una guía que posea pasos y consideraciones que permitan facilitar el proceso de modelado de una estructura.

Los materiales a utilizar poseen un impacto directo en los resultados obtenidos, por lo que es necesario estudiar el comportamiento de modelos a escala con materiales disponibles en el mercado.

En relación con los materiales para la realización de modelos a escala de concreto reforzado, debe utilizarse microconcreto, el cual “es un mortero estructural, constituido por cemento, agua y arena” (Navarro, sf). Sobre el microconcreto y su resistencia mecánica, a nivel internacional se encuentran estudios como el trabajo “Modelación y Caracterización de las Mezclas de Microconcreto” (León, 2009), a nivel nacional se encuentra el proyecto final titulado: “Comportamiento de la resistencia a la compresión axial del microconcreto para modelos a escala reducida” (Valverde, 2018).

El acero galvanizado, como representación de acero de refuerzo, se encuentran referencias donde se analiza el comportamiento de alambres galvanizados en modelos de concreto reforzado a escala, como el trabajo de graduación titulado “Desarrollo de metodología para el tratamiento térmico de acero de refuerzo no corrugado utilizado en modelos de resistencia en concreto reforzado a escala reducida” de Bustos (2017).

Con respecto a modelos a escala reducida, a nivel internacional, se han llevado a cabo diversas investigaciones sobre modelos a escala, donde se puede mencionar el libro titulado “Structural Modeling and Experimental Techniques” de Harris & Sabnis (1999). Además, se encuentran estudios sobre el comportamiento de modelos de concreto reforzado a escala, como se puede mencionar el trabajo “Estudio del comportamiento de vigas estructurales de concreto reforzado modelado a escala reducida”, de (Sánchez & Muñoz, 2008).

A nivel nacional, se han realizado investigaciones sobre concreto reforzado, utilizando modelos a escala reducida, como se puede mencionar el trabajo “Marcos de microconcreto sometidos a carga monotónica: Efecto de carga axial en el comportamiento carga versus desplazamiento” de Viquez (1999).

## Objetivos

### Objetivo General

Evaluar el comportamiento de vigas de concreto reforzado sometidas a flexión a partir de modelos a escala reducida.

### Objetivos Específicos

- Seleccionar el agregado fino y el acero de refuerzo a utilizar, para la elaboración de vigas a escala reducida.
- Caracterizar modelos de vigas de microconcreto reforzado a escala reducida.
- Comparar las deflexiones y deformaciones unitarias obtenidas de las vigas a escala reducida, con los resultados teóricos esperados de la viga prototipo.
- Desarrollar una guía para la elaboración de vigas de concreto reforzado a escala reducida.

## Alcance y limitaciones

El presente proyecto consiste en la elaboración de una guía para elaborar modelos a escala reducida de concreto reforzado y su aplicación en vigas, a las cuales, se realizaron ensayos de flexión con el objetivo de comparar los resultados con el comportamiento teórico de la viga. Se presentaron las siguientes limitaciones:

- Solo se realizaron fallas de cilindros a escala a 7 y 28 días, mientras que a los cilindros de 200x100mm, únicamente se fallaron a 28 días.
- Las condiciones ambientales del laboratorio no fueron controladas.
- El proceso de corrugación del alambre galvanizado, se llevó a cabo mediante la elaboración de pequeñas marcas a lo largo del alambre.
- No fue posible determinar el módulo de elasticidad del alambre galvanizado, debido a falta de instrumentación.
- Los errores obtenidos por las galgas extensométricas limitaron la elaboración de los gráficos de momento-curvatura.

# Marco teórico

## Normativa

Los ensayos correspondientes a la determinación de las características de los materiales a considerar, cumplen con las disposiciones establecidas por el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO) y ASTM (American Society of Testing Materials). Además, las especificaciones de las vigas que se analizarán cumplen con los requisitos establecidos por el Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318-14) y Código Sísmico de Costa Rica (CSCR-10), la memoria de cálculo de la viga prototipo, se muestra en el apéndice 5.

A continuación, se presentan los ensayos y reglamentos anteriormente mencionados.

## INTE C67:2020 Procedimiento para la toma de muestras de agregados (ASTM D75)

Debida a la importancia de la obtención de muestras de agregado en campo, esta norma establece los procedimientos a seguir para el muestreo de agregados.

“El muestreo es tan importante como las pruebas por realizar al agregado, la persona encargada de obtener las muestras deberá tomar todas las precauciones para obtener muestras que reflejen la naturaleza y condición de los materiales que representan” (ASTM D75, 2019).

<b>CUADRO 1. TAMAÑO MÍNIMO DE LAS MUESTRAS DE CAMPO PARA AGREGADO FINO</b>	
<b>Tamaño del agregado (mm)</b>	<b>Masa mínima de la muestra de campo (kg)</b>
2,36 [No. 8]	10
4,75 [No. 4]	10

Fuente: ASTM C75

## INTE C62:2020 Norma para reducir muestras de agregado a tamaño de ensayo (ASTM C702)

Esta norma permite obtener las muestras de agregado a considerar para la realización de los ensayos de caracterización de los agregados, de tal forma que dicha muestra represente la totalidad de material a utilizar, de forma que se eviten sesgos o errores.

En dicha norma, se presentan tres procedimientos para la reducción de muestras: mediante divisor mecánico, mediante cuarteo o muestreo de almacenamiento en miniatura.

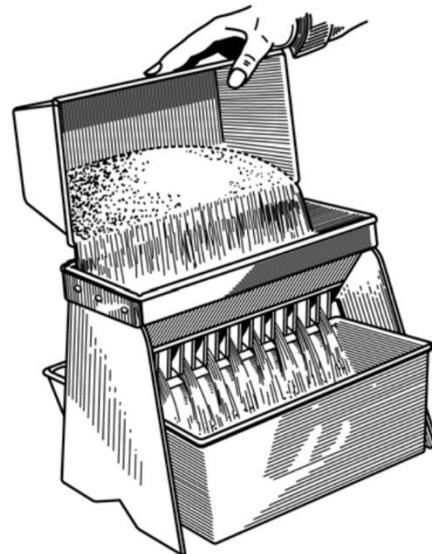


Figura 1 Divisor mecánico de muestra para agregado fino.  
Fuente: ASTM C702

## INTE C59:2015 Determinación de las impurezas en el agregado fino para concreto. (ASTM C40)

Esta norma permite determinar si el agregado fino presenta impurezas orgánicas, a partir de la comparación del color de la solución de hidróxido de sodio al adicionarle arena, con una escala de colores Gardner.

“El valor principal de este método de prueba es proporcionar una advertencia de que

pueden estar presentes cantidades nocivas de impurezas orgánicas” (ASTM C40).



Figura 2 Escala Gardner para ensayo de colorimetría

### **INTE C49:2018 Determinación por lavado del material que pasa por el tamiz 75 $\mu\text{m}$ (N° 200) en agregados minerales. Método de ensayo (ASTM C117)**

Esta norma establece dos procedimientos para determinar la cantidad de material más fino que el tamiz No. 200, el primero mediante el lavado con agua únicamente y la segunda con la utilización de un agente humectante.

Realizar el procedimiento descrito por esta norma es de suma importancia previo a determinar la granulometría de los agregados, con el fin de que los materiales arcillosos y solubles en agua, no se adhieran a los tamices y alteren la granulometría real del agregado.

### **INTE C46:2016 Análisis granulométrico en tamices de**

### **agregado fino y grueso. Método de ensayo. (ASTM C136)**

Esta norma establece los procedimientos a seguir para la determinación de la granulometría de los agregados finos y gruesos, dicho comportamiento granulométrico es esencial para conocer el efecto que provocarán los tamaños de partículas de los agregados en el concreto. Dicho análisis se debe realizar considerando tamices con tamaño decreciente de aberturas, en el siguiente cuadro se muestran los tamices correspondientes al análisis de agregados finos.

<b>CUADRO 2. TAMAÑO DE LOS TAMICES PARA DETERMIANR LA GRANULOMETRÍA DE AGREGADO FINO</b>	
<b>Tamiz</b>	<b>Tamaño abertura (mm)</b>
#4	4,75
#8	2,36
#16	1,18
#30	0,60
#50	0,30
#100	0,15
#200	0,075

Fuente: ASTM C136

### **INTE C69:2016 Determinación de la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción del agregado fino. Método de ensayo. (ASTM C128)**

Esta norma establece los procedimientos para determinar la gravedad específica en diferentes condiciones de humedad, seco a horno y saturada superficie seca, además de la gravedad específica aparente. También, dicho procedimiento permite obtener el porcentaje de absorción de los materiales. Los principales términos de esta norma se mencionan a continuación.

## Gravedad específica seca

“Relaciona el peso en aire de un volumen de agregado que incluye los poros permeables, con respecto al peso en aire de un volumen igual de agua destilada”(Chine et al., 2018)

## Gravedad específica saturada superficie seca

“Es la relación del peso unitario saturado superficie seca (PSS) y el peso unitario del agua, a temperatura normalizada. Considera los poros permeables y la cantidad de agua contenida en ellos” (Chine et al., 2018)

## Gravedad específica aparente

“Es el peso unitario de un agregado seco, entre el peso unitario del agua a temperatura normalizada”(Chine et al., 2018).

## Absorción

“Proceso mediante el cual un líquido tiende a llenar los poros permeables de un cuerpo sólido poroso; o el aumento de masa de un cuerpo sólido poroso resultante de la penetración de un líquido en sus poros permeables.”(ASTM C125, 2020)

## **INTE C58:2013 Método de ensayo para determinar la densidad masiva (peso unitario) y los vacíos en agregado. (ASTM C29)**

Esta norma es utilizada para establecer los procedimientos que determinan el peso unitario en condición suelta y compactada, además de vacíos de agregados finos, gruesos o mixtos a partir de la relación entre un volumen establecido y la masa de agregado correspondiente a dicho volumen. Dichos parámetros son de suma importancia porque permiten conocer las características de los

agregados para su uso en concreto hidráulico, además de que permite comparar parámetros de agregados de distintas fuentes. A continuación, se presentan los principales términos referentes a la presente norma, así como un cuadro con los volúmenes específicos, para una correcta determinación de los parámetros requeridos.

## Peso Unitario

“Masa por unidad de volumen de un agregado, la unidad de volumen incluye el volumen de las partículas individuales y de los vacíos entre partículas”(ASTM, 2020).

## Vacíos

Los vacíos se refieren al espacio ocupado por aire entre las partículas individuales de agregado.

<b>CUADRO 3. CAPACIDAD DE LOS MOLDES SEGÚN TAMAÑO DEL AGREGADO PARA DETERMINACIÓN DE PESOS UNITARIOS Y VACÍOS</b>	
<b>Tamaño máximo nominal del agregado (mm)</b>	<b>Volumen del molde (m<sup>3</sup>)</b>
12,5	0,0028
25,0	0,0093
37,5	0,014
75	0,028
100	0,070
125	0,100

Fuente: ASTM C29

## **INTE C403:2014 Métodos de ensayo y definiciones para ensayos mecánicos de productos de acero. (ASTM A370)**

Se establecen los procedimientos a seguir, para la determinación de las características mecánicas del acero a utilizar, en este caso, la resistencia a la fluencia de los alambres galvanizados a utilizar.

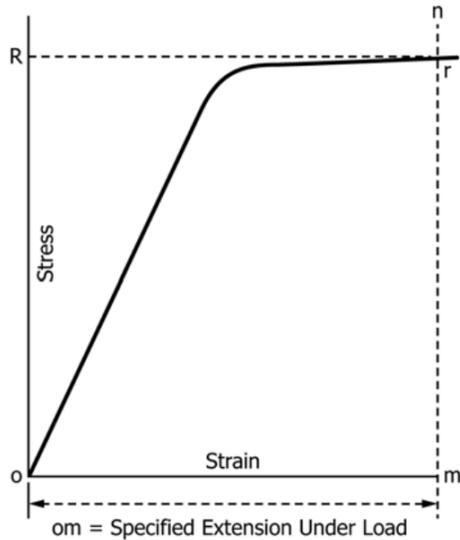


Figura 3 Diagrama de esfuerzo- deformación bajo método de carga.

Fuente: ASTM C370

## INTE C18:2016 Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayo en laboratorio. (ASTM C192)

En esta norma se establecen los procedimientos a seguir, para una adecuada elaboración de mezclas de concreto hidráulico en laboratorio, así como recomendaciones, para garantizar un correcto curado de los especímenes confeccionados. En el siguiente cuadro, se muestran los diámetros de las varillas utilizadas para el proceso de compactación del microconcreto de los cilindros a escala reducida.

<b>CUADRO 4. DIMENCIONES DE VARILLAS DE COMPACTACIÓN DEL MICROCONCRETO</b>		
<b>Medición</b>	<b>Diámetro Varilla 1 (mm)</b>	<b>Diámetro Varilla 2 (mm)</b>
1	8,02	7,91
2	7,93	8,00
3	7.93	7,93
Promedio	7,96	7,95

Fuente: Valverde (2018)

## INTE C39:2018 Resistencia a la compresión uniaxial de especímenes cilíndricos de concreto. Método de ensayo (ASTM C39)

Se establecen los requerimientos para realizar el ensayo de resistencia a la compresión, así como los requerimientos que deben presentar los especímenes, para determinar adecuadamente la resistencia a la compresión.

Además de los lapsos de tiempo requeridos para la determinación de la resistencia a la compresión a distintas edades de falla, las cuales se presentan en el siguiente cuadro.

<b>CUADRO 5. TOLERANCIA PARA DIFERENTES EDADES DE FALLA</b>	
<b>Edad de falla</b>	<b>Tolerancia aceptable</b>
24 horas	± 0,5 hora
3 días	± 2 horas
7 días	± 6 horas
28 días	± 20 horas
90 días	± 2 días

Fuente: ASTM C39

## Concreto Reforzado

El concreto es un material, que se obtiene mediante la mezcla de cemento, arena, agregado, y agua. Este material ha sido utilizado ampliamente en la construcción debido a factores económicos o a su capacidad de resistencia a la compresión. No obstante, el concreto posee ciertas limitaciones, menciona que “el concreto posee una baja resistencia a la tensión comparada con la resistencia a la compresión. Esto impide su utilización económica en elementos estructurales sometidos a tensión” (Nilson, 2004).

Para contrarrestar esta limitación, se emplea comúnmente acero, debido a su alta resistencia a la tensión. Dicha combinación de concreto y acero es conocida como concreto reforzado y suele utilizarse en elementos estructurales como losas, vigas y columnas.

## Códigos de diseño

“El diseño de estructuras de concreto se lleva a cabo generalmente dentro de un contexto de códigos que dan requisitos específicos para materia-les, para el análisis estructural, para el dimensionamiento de elementos.” (Nilson, 2004). Existen diversos códigos de diseño, no obstante, cada país es libre de establecer o adoptar sus propios códigos para diseño de estructuras de concreto.

En Norteamérica, la especificación definitiva para construcciones de concreto reforzado son los Requisitos del Código de Construcción para Concreto Estructural (ACI 318-11). Este código, generalmente referenciado como Código ACI, ha sido incorporado como referencia en el Código Internacional de Construcción y sirve como base para códigos comparables en Canadá, Nueva Zelanda, Australia y la mayor parte de Latino América (Wight & MacGregor, 2012).

A nivel nacional, el código que establece los requisitos para los elementos de concreto reforzado es el Código Sísmico de Costa Rica, “este código sísmico establece los requisitos mínimos para el análisis, diseño y construcción sismorresistente de edificaciones y obras afines que se construyan en el territorio de la República de Costa Rica”(CSCR, 2010)

## Premisas para diseño de concreto reforzado

El diseño de estructuras de concreto reforzado, se basa en premisas fundamentales, Nilson (2004) describe las siguientes:

- Las fuerzas internas, tales como momentos flectores, fuerzas de corte, esfuerzos normales y cortantes en una sección cualquiera de un elemento, están en equilibrio con los efectos de las cargas externas en esta sección.

- La deformación unitaria en una barra de refuerzo embebida (a tensión o a compresión) es la misma que la del concreto circundante.
- Las secciones transversales planas antes de la aplicación de la carga siguen siendo planas para el elemento cargado.
- Debido a que la resistencia a la tensión del concreto es tan sólo una pequeña fracción de su resistencia a la compresión, el concreto en aquella parte del elemento sometido a tensión, estará usualmente fisurado.
- La teoría se basa en las relaciones esfuerzo-deformación reales y en las propiedades de resistencia de los dos materiales constituyentes.

## Fuentes de incertidumbre

Las estructuras de concreto reforzado, está sujeto a incertidumbres inherentes tanto en la fase de diseño, como en la fase de construcción, Nilson (2004), menciona estas incertidumbres, las cuales se presentan a continuación:

- Las cargas reales pueden diferir de las supuestas.
- Las cargas reales pueden estar distribuidas de manera diferente a la supuesta.
- Las suposiciones y simplificaciones inherentes a cualquier análisis pueden resultar en efectos calculados, momentos, cortantes, etc., diferentes de aquellos que de hecho actúan sobre la estructura.
- El comportamiento estructural real puede diferir del supuesto, debido a las limitaciones del conocimiento.
- Las dimensiones reales de los elementos pueden diferir de aquellas especificadas.

- El refuerzo puede no estar en la posición definida.
- Las resistencias reales de los materiales pueden diferir de aquellas especificadas.

## Elementos bajo flexión

En las estructuras de concreto reforzado, es común la presencia de efectos flectores, debido a la aplicación de cargas a lo largo de la luz de los elementos.

## Fuerzas internas y deformaciones unitarias.

En cualquier sección transversal existen fuerzas internas que pueden descomponerse en fuerzas normales y tangenciales a la sección. Las componentes normales a la sección son los esfuerzos de flexión (tensión en un lado del eje neutro y compresión en el otro); su función es la de resistir el momento flector que actúa en la sección (Nilson, 2004).

En relación con las deformaciones unitarias, estas corresponden a la deformación por unidad de medida, debido a los esfuerzos de tensión y compresión anteriormente mencionados, dichos esfuerzos, se muestran en la figura 4.

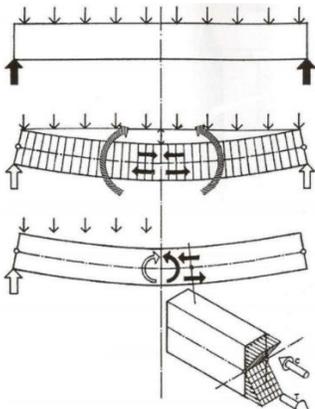


Figura 4 Compresión y tensión en vigas de concreto reforzado  
Fuente: (Ching & Adams, 2008)

## Deflexiones

La deflexión es la deformación que se presenta en un elemento al ser aplicada una fuerza sobre el mismo, siendo generada por una flexión interna o también puede decirse que es una respuesta estructural ante la aplicación de cargas. (Reyes et al., 2018)

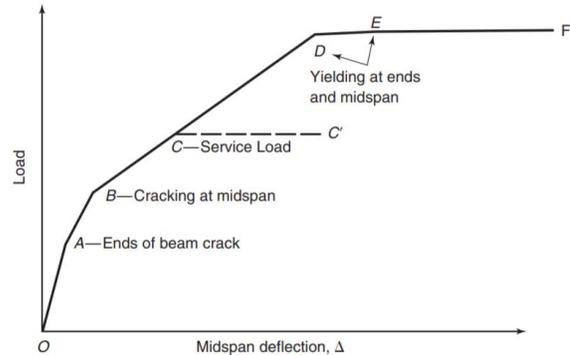


Figura 5 Diagrama de fuerza desplazamiento de viga de concreto reforzado  
Fuente: Wight & MacGregor (2012)

## Comportamiento de vigas bajo flexión

En una viga de concreto reforzado, debido a la baja resistencia a la tensión del concreto, la tensión causada por los momentos flectores es resistida por el acero de refuerzo, mientras que el concreto es capaz de resistir únicamente los esfuerzos de compresión correspondientes.

Al cargar una viga hasta su falla, se pueden distinguir diferentes comportamientos. Inicialmente, mientras el esfuerzo de tensión sea menor, la resistencia a tensión del concreto, todo el concreto resiste los esfuerzos de tensión y compresión de la viga y el acero a tensión resiste también los esfuerzos aplicados, en esta etapa, las deformaciones unitarias y esfuerzos presentan un comportamiento lineal y se muestran en la figura 6c. (Nilson, 2004).

Si supera la resistencia a tensión del concreto, aparecerán grietas, como se muestra en la figura 6d, en esta fase los esfuerzos de tensión son asumidos por el acero de refuerzo, en esta etapa, los esfuerzos y deformaciones continúan siendo proporcionales y se muestran en la figura 6e. Cuando se aumenta la carga, los esfuerzos y

deformaciones aumentan y se desaparece la proporcionalidad, como se muestra en la figura 6f. (Nilson, 2004).

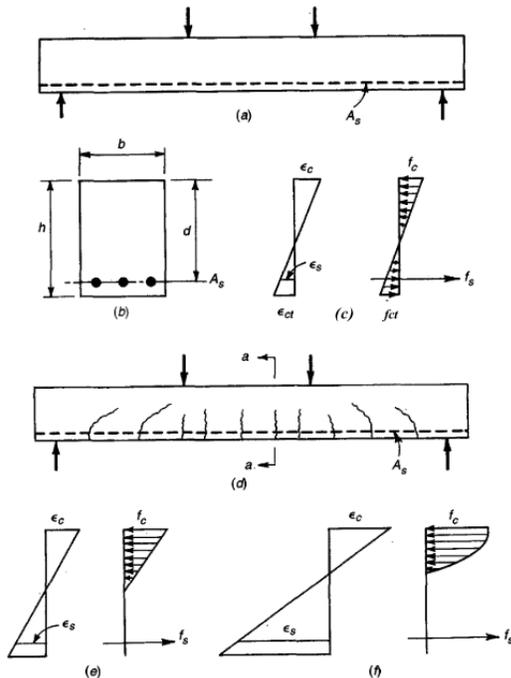


Figura 6 Comportamiento de vigas de concreto reforzado ante carga creciente  
Fuente: Nilson (2004)

El comportamiento de una viga sometida a flexión, puede ser representado mediante un gráfico de momento-curvatura, el cual, según Almada N et al. (2016) proporciona puntos de momento resistente interno y su curvatura correspondiente para un diagrama de deformaciones que cumpla con la compatibilidad y equilibrio de fuerzas internas.

Por su parte, Jinxuejun & Wanggenhui (2015) mencionan que el análisis de la curva de momento-curvatura es la herramienta de análisis básica para determinar la capacidad de ductilidad del elemento en estudio. En la figura 7, se muestra además el comportamiento de los esfuerzos internos de una viga en diferentes tramos del diagrama esfuerzo-curvatura.

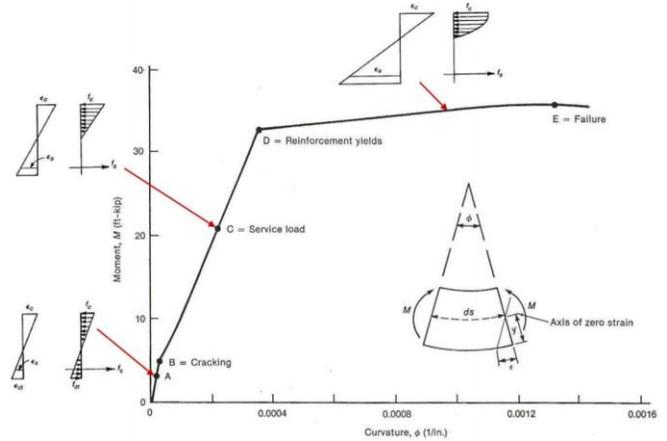


Figura 7 Diagrama de momento curvatura de una viga de concreto reforzado  
Fuente: Wight & MacGregor (2012)

## Fallas en concreto reforzado debido a flexión

Dependiendo de la cantidad y resistencia del acero que se utilice como refuerzo de una viga, se podrán obtener diferentes tipos de falla.

Cuando el acero fluye, el comportamiento del miembro es dúctil; es decir, se producen deflexiones considerables antes del colapso final. En este caso se dice que el elemento es subreforzado. Por otra parte, si la cantidad de acero longitudinal de tensión es grande, éste no fluye antes del aplastamiento y se dice entonces que el elemento es sobrerreforzado. Puede suceder que el elemento alcance su resistencia precisamente cuando el acero empieza a fluir. En este caso se dice que el elemento es balanceado. (González et al., 2013)

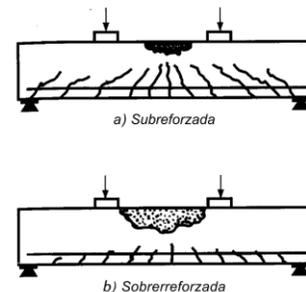


Figura 8 Agrietamiento en la falla de vigas sujetas a flexión  
Fuente:(González et al., 2013)

# Modelos estructurales a escala reducida

Según (Harris & Sabnis, 1999) Los modelos estructurales son definidos como: "cualquier representación física de una estructura o porción de la misma, a una escala reducida", dicha definición fue desarrollada por el comité ACI 444. "Se realizan para entender de una manera directa situaciones que pueden presentarse en determinados momentos, para analizar comportamientos y observar características" (Valencia, 2010).

## Clasificación

Los modelos estructurales pueden ser clasificados de diversas formas, la clasificación presente en este documento se basa en la realizada por (Harris & Sabnis, 1999), quienes clasificaron los modelos estructurales según la función para la cual son realizados los modelos y con base a los posibles resultados que se pueden obtener con los modelos.

Debe recalarse que además de los presentados a continuación, también se pueden clasificar como modelos de efecto de viento, modelos dinámicos, conceptuales, de investigación, diseño, incluso térmicos, no obstante, dichas clasificaciones no se encuentran dentro del alcance del presente documento.

	<p>como fuerzas cortantes y axiales, además de momentos flectores.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Las cargas aplicadas al modelo no poseen relación directa con el prototipo.</li> </ul>
Directos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Posee similitud geométrica con el prototipo.</li> <li>Las cargas aplicadas poseen relación directa con el prototipo.</li> </ul>
De Resistencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>Son modelos directos realizados con materiales similares a los del prototipo.</li> <li>Pretenden predecir el comportamiento del prototipo ante cargas establecidas.</li> <li>El principal problema es encontrar materiales y formas de fabricación adecuados.</li> </ul>

Fuente: Harris & Sabnis (1999)

## Análisis Dimensional

"El análisis dimensional en cualquier investigación del comportamiento físico, debido a que permite combinar las variables en agrupaciones (términos  $\pi$ ) con una reducción posterior de cantidades desconocidas" (Harris & Sabnis, 1999).

El teorema Pi de Buckingham establece que cualquier ecuación F dimensionalmente homogénea:

$$F(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad \text{Ec ( 1)}$$

Puede ser escrita como:

$$G(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n) = 0 \quad \text{Ec ( 2)}$$

Donde los términos pi son productos adimensionales de las n variables físicas  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . y  $m=n-r$ , donde r es el número de dimensiones fundamentales que están envueltas en las variables físicas.

CUADRO 6. CLASIFICACIÓN DE MODELOS ESTRUCTURALES	
Tipo de modelo	Principales características
Elásticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Los resultados están limitados al comportamiento lineal del modelo.</li> <li>Poseen similitud con el modelo, pero los materiales no necesariamente se asemejan a los del modelo.</li> </ul>
Inelásticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Son casos especiales de los modelos elásticos</li> <li>Utilizados para obtener líneas de influencia y acciones internas</li> </ul>

En el cuadro 7 muestra las cantidades físicas presentes en problemas estructurales y las medidas dimensionales respectivas.

<b>CUADRO 7. CANTIDADES FÍSICAS TÍPICAS</b>		
<b>Símbolo</b>	<b>Variable</b>	<b>Unidades</b>
I	Longitud	L
Q	Fuerza	F
M	Masa	FL <sup>-1</sup> T <sup>2</sup>
σ	Esfuerzo	FL <sup>-2</sup>
ε	Deformación	-
a	Aceleración	LT <sup>-2</sup>
δ	Desplazamiento	L
ν	Razón de Poisson	-
E	Módulo de Elasticidad	FL <sup>-2</sup>

Fuente: Harris & Sabnis (1999)

A partir del Cuadro 7 y tomando como variables independientes Q, I y a; se definen las siguientes variables adimensionales:

$$\pi_1 = \frac{Q}{EI} \quad \pi_2 = \frac{Ma}{EI^2} \quad \pi_3 = \frac{\sigma}{E} \quad \text{Ec (3)}$$

$$\pi_4 = \varepsilon \quad \pi_5 = \frac{\delta}{l} \quad \pi_6 = \nu$$

## Similitud

Los modelos estructurales se pueden describir en tres tipos, dependiendo la similitud que posea con el prototipo.

<b>CUADRO 8. TIPOS DE MODELOS SEGÚN SIMILITUD</b>	
<b>Tipo de modelo</b>	<b>Principales características</b>
Verdaderos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Poseen similitud completa entre modelo y prototipo.</li> <li>• Los materiales del modelo presentan el comportamiento de los materiales del prototipo.</li> </ul>
Adecuados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Poseen una similitud de "primer orden"</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si se está evaluando las deflexiones en una viga, el momento flector corresponderá a un primer orden, mientras que la fuerza axial, será de segundo orden.</li> </ul>
Distorsionados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los modelos distorsionados no satisfacen una o varias características de primer orden.</li> <li>• Las distorsiones se pueden provocar por desigualdades geométricas o diferencias en las propiedades de los materiales.</li> </ul>

Fuente: Harris & Sabnis (1999)

Harris & Sabnis (1999) afirman que la formulación matemática de cualquier fenómeno físico se puede reducir a una ecuación que involucra un conjunto completo de productos adimensionales, de la siguiente forma:

$$\pi_1 = \Phi(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n) \quad \text{Ec (4)}$$

A partir de la ecuación anterior, cuando la similitud completa se mantiene, la relación entre el modelo y el prototipo puede escribirse como:

$$\frac{\pi_{1p}}{\pi_{1m}} = \frac{\Phi(\pi_{2p}, \pi_{3p}, \dots, \pi_{np})}{\Phi(\pi_{2m}, \pi_{3m}, \dots, \pi_{nm})} \quad \text{Ec (5)}$$

ó  $\pi_{1p} = \pi_{1m}$

Donde el subíndice "p" se refiere al prototipo y el subíndice "m" al modelo. A partir de la Ecuación 5, se derivan los factores de escala, para cada uno de los seis términos presentados en la Ecuación 3, mediante la siguiente expresión:

$$S_i = \frac{i_p}{i_m} \quad \text{Ec (6)}$$

Donde  $S_i$  corresponde al factor de escala para el término i, el subíndice "p" corresponde al prototipo y el subíndice "m" al modelo. Al realizar el cociente de la Ecuación 6 para cada uno de los términos "Pi" presentes en la Ecuación 3, se obtienen los factores de escala aplicables para modelos estructurales, en términos de longitud, módulo de elasticidad y aceleración (l, E y a).

$$S_Q = S_l^2 S_E \quad S_\varepsilon = 1 \quad S_M = \frac{S_l^2 S_E}{S_a} \quad \text{Ec (7)}$$

$$S_\delta = S_l \quad S_\sigma = S_E \quad S_V = 1$$

En el cuadro 9 se presentan los factores de escala aplicables a modelos de concreto reforzado.

<b>CUADRO 9. FACTORES DE ESCALA PARA MODELOS DE CONCRETO REFORZADO</b>				
	<b>Cantidad</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Modelo Verdadero</b>	<b>Modelo Verdadero Práctico</b>
Propiedades relacionadas al material	Esfuerzo del concreto, $\sigma_c$	FL <sup>-2</sup>	$S_\sigma$	1
	Deformación del concreto, $\varepsilon_c$	-	1	1
	Módulo del concreto, $E_c$	FL <sup>-2</sup>	$S_\sigma$	1
	Relación de Poisson, $\nu_c$	-	1	1
	Peso Específico, $\gamma_c$	FL <sup>-3</sup>	$S_\sigma/S_l$	$1/S_l$
	Esfuerzo del refuerzo $\sigma_r$	-	1	1
	Deformación del refuerzo $\varepsilon_r$	-	1	1
	Módulo del refuerzo $E_r$	FL <sup>-2</sup>	$S_\sigma$	1
	Esfuerzo de adherencia, $u$	FL <sup>-2</sup>	$S_\sigma$	1
Geometría	Dimensión Lineal, l	L	$S_l$	$S_l$
	Desplazamiento, $\delta$	L	$S_l$	$S_l$
	Desplazamiento angular, $\beta$	-	1	1
	Área de refuerzo, $A_r$	L <sup>2</sup>	$S_l^2$	$S_l^2$
Carga	Carga concentrada, Q	F	$S_\sigma S_l^2$	$S_l^2$
	Carga distribuida, w	FL <sup>-1</sup>	$S_\sigma S_l$	$S_l$
	Presión, q	FL <sup>-2</sup>	$S_\sigma$	1
	Momento, M	FL	$S_\sigma S_l^3$	$S_l^3$

Fuente: Harris & Sabnis (1999)

# Metodología

El proyecto propuesto, se basó en los datos recabados de los ensayos de laboratorio que se llevaron a cabo en el Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO), estos se realizaron según lo estipulado en las normas del Instituto Costarricense de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO) y ASTM (American Society of Testing Materials) correspondientes a la caracterización de agregados finos, mezcla y moldeo de cilindros de concreto hidráulico, además de la determinación de la resistencia a la fluencia y módulo de elasticidad del acero.

## Caracterización de agregados finos

Con el propósito de determinar el agregado fino a utilizar para la elaboración de microconcreto, se analizaron las propiedades de dos agregados de diferentes fuentes, uno proviene de un tajo y otro de río. Es importante mencionar que la selección de estas fuentes se debió al interés de comparar las propiedades de los agregados finos de ambas fuentes, debido a la cercanía de sus ubicaciones y a la falta de información sobre las propiedades del agregado proveniente del tajo.

## Obtención de las muestras

Cuando no se cuenta con equipo pesado para la obtención de las muestras de agregado de un apilamiento, dicha obtención se debe realizar en 3 sitios diferentes del apilamiento de agregados: tercio superior, punto medio y tercio inferior, debido a que en los apilamientos de agregados se producen segregaciones de material, el cual puede generar una desviación en los resultados obtenidos. (ASTM D75, 2014).

El procedimiento seguido para la obtención de los agregados se basó en las disposiciones de la norma INTE C67:2020 y se describe a continuación.

- Se incrustó horizontalmente una tabla sobre cada uno de los tercios donde se obtuvo la muestra de los agregados, con el fin de que el material que se encontraba en la parte superior se deslizara sobre el sitio donde se estaba extrayendo la muestra.
- Una vez colocadas las tablas, se retiró el material presente en la parte exterior del apilamiento donde se iba a extraer agregado, y se introdujo una pala perpendicular al apilamiento para obtener la muestra, se repitió este proceso hasta tener la cantidad necesaria.



Figura 9 Fuente de agregado de tajo.



Figura 10 Fuente de agregado de río.

## Reducción de las muestras

Para la realización de los ensayos, fue necesario obtener la cantidad mínima establecida para cada ensayo en particular, dicha obtención debe ser realizada de forma aleatoria, con el fin de evitar posibles sesgos en la determinación del material a analizar. El proceso de reducción y cuarteo de los agregados finos constó de los siguientes pasos:

- Inicialmente, se tamizaron los agregados finos con el fin de descartar las partículas con tamaño superior a 4,75 mm.
- Para realizar la reducción de la muestra, se dispuso el material a dividir en un recipiente que permitiera distribuir uniformemente el material en el divisor mecánico (como se aprecia en la figura 1), con el fin de que las cantidades por conductos fueran aproximadamente iguales.
- Una vez dividido la cantidad total de material, se seleccionó únicamente una de las dos muestras obtenidas y se repitió el proceso de división, hasta obtener las cantidades mínimas especificadas para cada ensayo a realizar.



Figura 11 Muestras obtenidas a partir de la reducción en el divisor mecánico para la determinación de pesos unitarios.



Figura 12 Muestras obtenidas a partir de la reducción en el divisor mecánico para la determinación de colorimetría.

## Impurezas orgánicas en agregados finos

La determinación de posibles impurezas orgánicas en los agregados finos se realizó con base en la norma INTE C59:2015 (ASTM C40), el procedimiento realizado fue el siguiente:

- Se realizó el proceso de reducción de la muestra de agregado fino, hasta obtener una cantidad superior a 900g de cada tipo de agregado.
- En los dos recipientes de vidrio utilizados, se realizaron marcas en 130ml y 200ml, ya que son las medidas necesarias para el ensayo de impurezas orgánicas.
- Posteriormente, se añadió cada agregado fino en su recipiente, hasta llegar a la marca de 130 ml.
- Seguidamente, se agregó una solución compuesta por 97% y 3% Hidróxido de Sodio (NaOH), hasta llegar 200 ml, se taparon las muestras y se agitaron durante un minuto.
- Se dejó reposar el agregado en la solución de agua e hidróxido de sodio durante 24 horas y se comparó el color de la solución, con los colores de la escala Gardner, para la determinación de materia orgánica.



Figura 13 Determinación de colorimetría para los agregados finos.

## Lavado con malla No 200

Previo al ensayo de granulometría, se debe realizar el lavado por el tamiz No. 200, con el fin de eliminar materiales arcillosos o solubles en agua, dicho procedimiento se hizo conforme a lo establecido en la norma INTE C49:2018 (ASTM C117), el procedimiento se detalla a continuación.

- Para la determinación de la granulometría de agregados finos, se obtuvo una muestra, tal que su masa después del secado supere los 300 gramos.
- Después de obtenida la muestra, se ingresó al horno, que permita una temperatura constante de  $110 \pm 5$  °C. Se considera que el agregado fino se encuentra seco cuando las diferencias de las masas obtenidas no difieren en más de un 0,1% en un lapso de una hora, en adelante.
- Se colocó el tamiz No. 200, adicionalmente, se colocó el tamiz No.16, con el propósito de proteger el tamiz No. 200, debido a susceptibilidad a daños que presenta dicho tamiz.
- Cuando se logró cumplir con el requerimiento de masa constante, se pesó el material con el fin de determinar la masa seca del agregado fino previo al lavado en el tamiz No.200 y la cantidad de material que logra pasar dicho tamiz.

- Una vez determinada la masa seca de la muestra, se dispuso en un recipiente que permita adicionar agua a la muestra, sin que se produzca pérdida de material. Para el lavado, no se utilizó ningún tipo de agente humectante, se realizó únicamente con agua.
- Se agregó agua y se agitó con la mano, con el fin de que el material fino se desprenda y logre suspenderse en el agua. Se debe tener el cuidado de lavar la mano utilizada para agitar el agregado, para evitar que parte de la muestra se pierda.
- Se volcó el recipiente, con el cuidado de que el agua pase por los tamices. Cuando el agregado tienda a salir del recipiente, se debe dejar de verter el agua inmediatamente.
- Se agregó agua nuevamente y se repitieron los dos pasos descritos anteriormente las veces que sean necesarias hasta que el agua resultó completamente clara.
- Una vez se determinó que no se presentan más materiales que puedan pasar el tamiz No.200, se recuperó el agregado retenido en los tamices No. 16 y 200, con el cuidado de evitar pérdida del material.
- Posteriormente a la obtención de la muestra que se retiene en el tamiz No. 200, se dispuso en un horno a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C, hasta lograr la determinación de masa constante.

Una vez se encuentre seca la muestra, se determina el porcentaje de la muestra que logró pasar el tamiz No.200 con la siguiente fórmula:

$$A = \frac{B-C}{B} \cdot 100 \quad \text{Ec ( 8)}$$

Donde:

A= Porcentaje de material más fino que el tamiz No.200

B= masa seca original de la muestra

C= masa seca de muestra después del lavado



Figura 14 Lavado de agregado fino por el tamiz No.200.

## Granulometría

Una vez eliminada de la muestra de agregados, la fracción que logra pasar el tamiz No.200, se realiza el estudio del comportamiento granulométrico mediante tamices. Los procedimientos seguidos, se basan en los requerimientos de la norma INTE C46:2016 (ASTM C136).

- Se determinó la masa de la muestra posterior al lavado en el tamiz No.200, hasta que se cumplió con la condición de masa constante.
- Se determinó la cantidad de material que logró pasar mediante lavado, el tamiz No.200, mediante la resta de las masas secas previo y posteriormente al lavado.
- Se seleccionaron los tamices a utilizar, los cuales se presentan en el cuadro 2 y se colocaron uno sobre otro de forma descendiente según el tamaño de abertura.
- Se dispuso la muestra de agregado fino sobre el tamiz que se encuentra en la

parte superior, de tal forma que se permita que el material caiga por los tamices.

- Se colocó una bandeja amplia que evite la pérdida de material debido al tamizado.
- Para cada tamiz, se dieron 25 golpes en el costado del tamiz (como se muestra en la figura 15), de tal forma que todas las partículas de agregado tuvieran contacto con el tamiz, luego se giraba el tamiz 60° y se realizaban otros 25 golpes, para un total de 150 golpes por tamizado.
- El material que logra pasar el tamiz se colocó en el tamiz siguiente, con el fin de seguir realizando el proceso de tamizado.
- Se colocó en un recipiente (previamente pesado) la muestra retenida en el tamiz y se determina su masa.
- El material retenido se colocó nuevamente en el mismo tamiz con el fin de realizar la suficiencia de tamizado, la cual consiste en que la determinación de masas para un mismo tamiz no puede variar en más de un 1%. Dicho procedimiento se repitió hasta cumplir con dicha condición.
- Luego de cumplir con la suficiencia de tamizado, se realizaron los últimos 4 pasos descritos para la totalidad de tamices considerados.
- Con respecto al material retenido en la charola, este se sumó al material lavado en el tamiz No.200.
- Luego de finalizado el proceso de tamizado, se verificó que la suma de las masas retenidas en los tamices, no difirieran en más de un 0.3% con respecto a la masa seca inicial.

$$\%E = \frac{W_{inicial} - \sum W_{retenido}}{W_{inicial}} \quad E_c (9)$$

Donde:

%E= Porcentaje de error de tamizado  
 Winicial= Masa seca inicial (g)

$\Sigma W_{\text{retenido}}$  = Suma de masas retenidas en tamices (g)



Figura 15 Proceso de tamizado para realización del ensayo de granulometría.



Figura 16 Fracciones obtenidas por tamices para el agregado fino de tajo.

## Gravedad específica y absorción

El ensayo para determinar las gravedades específicas y absorción de los dos agregados finos se base en las disposiciones de la norma INTE C69:2016 (ASTM C128), el procedimiento seguido, se presenta a continuación.

- Se obtuvieron las muestras de los diferentes agregados finos por medio del divisor mecánico, cada muestra con una masa superior a 1 kilogramo.
- Se dispusieron las muestras en un recipiente por muestra y se saturaron con

agua por 24 horas con el propósito de que se llenaran con agua sus poros permeables.

- Después de saturar las muestras por 24 horas, se procedió a eliminar el exceso de agua con la ayuda de una manguera, con el cuidado de no perder parte del agregado fino.
- No obstante, para terminar de eliminar el agua libre en el agregado, se utilizó una secadora (como se muestra en la figura 17). Se tuvo el cuidado de no secar excesivamente una parte del agregado fino, lo cual se evitó moviendo constantemente el agregado. La secadora permitía evaporar el agua libre en el agregado, dicho procedimiento se realizó hasta que no se evidenciara agua libre en el agregado fino.
- Para determinar si el agregado fino se presentaba en condición saturada superficie seca, se adicionó el agregado en la condición de humedad que presentaba, en un molde metálico con forma cónica, se proporcionaron 25 golpes leves en la parte superior con un apisonador metálico de aproximadamente 340 gramos, hasta obtener la forma expuesta en la figura 18.
- Una vez se retiraba el molde, el agregado conservaba la forma cónica, se golpeó levemente el material acrílico de la base y si se conservaba la forma cónica, el agregado aún presentaba agua libre que permitía conservar la forma cónica, por lo que se devolvía el material al recipiente y se secaba nuevamente, hasta que el agregado fuera incapaz de mantener la forma cónica al golpear levemente la base acrílica.
- Después de determinar que el agregado se encontraba en condición saturado superficie seca, se pesó un picnómetro de vidrio y a este se adicionó aproximadamente 500 gramos de agregado en condición saturado superficie seca.

- Se adicionó agua al picnómetro, de tal forma que cubriera completamente al agregado y se agitó vigorosamente con el fin de que el agua cubriera la totalidad del agregado.
- Posteriormente, se agitó manualmente el picnómetro y con la ayuda de la máquina de vacío, se eliminó el aire presente en el agregado, dicho procedimiento se realizó durante 25 minutos.
- Una vez eliminado el aire presente en el agregado, se agregó agua hasta la marca de aforo del picnómetro y se determinó dicho peso, hasta que el agua presentara una temperatura de  $23 \pm 2$  °C.
- Se determinó la masa del picnómetro con la muestra y agua hasta la marca de aforo, se procedió a disponer la muestra en un recipiente, dicho procedimiento se debe realizar de tal forma que se evite pérdida del agregado fino.
- Una vez se tuviera el agregado fino en un recipiente, previamente pesado, se dispuso en un horno y una vez se cumpliera el requerimiento de masa constante, se determinó la masa seca de la muestra, así como el peso del picnómetro con agua hasta la marca de aforo, con el fin de realizar los siguientes cálculos:

$$G_{bs} = \frac{A}{B+S-C} \quad \text{Ec ( 10)}$$

$$G_{SSS} = \frac{S}{B+S-C} \quad \text{Ec ( 11)}$$

$$G_s = \frac{A}{B+A-C} \quad \text{Ec ( 12)}$$

$$\%Abs = \frac{S-A}{A} \quad \text{Ec ( 13)}$$

Donde:

- A= Masa de la muestra al horno (g)
- B= Picnómetro con agua hasta aforo (g)
- S= Masa de la muestra saturada superficie seca (g)
- C= Masa de la muestra, picnómetro y agua (g)



Figura 17 Proceso de eliminación del agua libre en el agregado fino

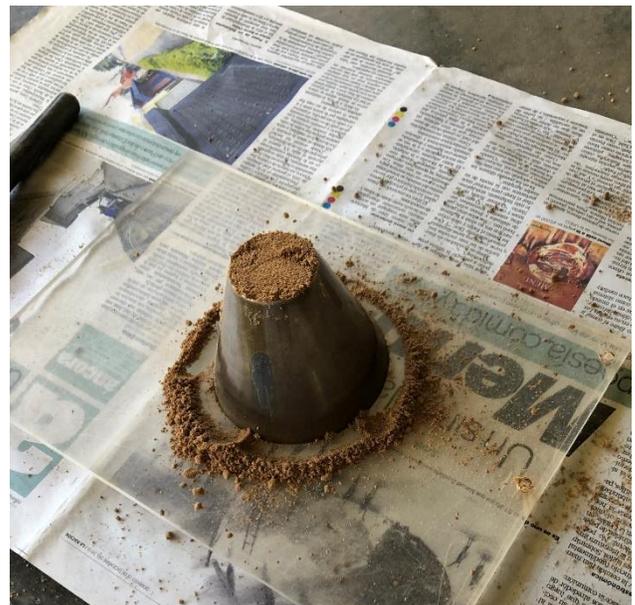


Figura 18 Proceso de eliminación del agua libre en el agregado fino

## Peso Unitario y Vacíos

Los procedimientos para la determinación del peso unitario suelto y compactado de los dos agregados finos, se realizó con base en la norma INTE C58:2013 (ASTM C29), dichos procedimientos se detallan a continuación.

- Inicialmente, se obtuvo la muestra de agregado a utilizar, mediante la utilización de un divisor mecánico. Dicha cantidad, según la norma ASTM C-29 (2017) deberá ser entre 125 y 200% la cantidad requerida para llenar el recipiente a utilizar para la determinación del peso unitario.
- Una vez obtenida la muestra, se dispuso en un horno a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C, hasta cumplir con la determinación de masa constante.
- El recipiente a utilizar para este ensayo se seleccionó según el cuadro 3. Se debe conocer su volumen exacto, el cual, en caso de ser proporcionado, dicho valor no debe tener más de 12 meses de determinado, debido a variaciones del volumen que puedan ocurrir en dicho recipiente.
- Posteriormente, se determinó la masa de dicho recipiente vacío, con una precisión de 0,05 kg.

## Peso unitario suelto

- Para la determinación del peso unitario suelto, agregó el material con una cuchara pulpera que permitiera agregar constantemente el material. El agregado debe dejarse caer desde una altura 50mm por encima del borde superior del recipiente utilizado.
- Una vez se llenó completamente el volumen del recipiente, se enrasó la superficie, con el cuidado de no provocar una ligera compactación del material.
- Se tuvo la precaución de limpiar el exterior del molde, con el fin de que no se presente agregado que altere la obtención de datos.
- Por último, se determinó la masa del recipiente con el agregado fino suelto.
- Se realizó la cantidad de determinaciones necesarias de peso unitario, hasta que la desviación estándar de los resultados de

pesos unitarios obtenidos tuviera una desviación estándar menor a  $14 \text{ kg/m}^3$ .

## Peso unitario compactado

- Para la determinación del peso unitario compactado, se agregó el material con una cuchara pulpera que permita agregarlo constantemente. El agregado debe dejarse caer desde una altura 50mm por encima del borde superior del recipiente utilizado.
- Inicialmente, se llenó un tercio del volumen total del recipiente y se realizaron 50 golpes, los cuales consistieron en levantar un costado del molde y dejarlo caer desde una altura de 50mm, luego levantar el costado opuesto y dejarlo caer desde la misma altura, hasta realizar 50 golpes en total.
- Para los dos tercios restantes se siguió el procedimiento anteriormente descrito y cuando el recipiente estaba completamente lleno, se enrasó con ayuda de una pieza metálica, de forma que no se generara una compactación adicional a la muestra.
- Finalmente, se limpió externamente el recipiente y se determinó la masa del mismo y el agregado fino compactado.
- Se realizó la cantidad de determinaciones necesarias de peso unitario, hasta que la desviación estándar de los resultados de pesos unitarios obtenidos tuviera una desviación estándar menor a  $14 \text{ kg/m}^3$ .

Una vez obtenidas las masas del recipiente con el agregado fino, se calculó el peso unitario en dos condiciones de compactación: suelto y compactado, además del contenido de vacíos del agregado. Las ecuaciones utilizadas se presentan a continuación:

$$M = \frac{G-T}{V} \quad \text{Ec ( 14)}$$

$$\%V = \frac{(S \cdot W) - M}{S \cdot W} \quad \text{Ec ( 15)}$$

Donde:

M= Peso unitario del agregado ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
G= Masa del recipiente más el agregado (kg)  
T= Masa del recipiente (kg)  
V= Volumen del recipiente ( $\text{m}^3$ )  
S= Gravedad específica seca



Figura 19 Proceso de enrasado para determinación de peso unitario suelto.



Figura 20 Determinación de la masa del recipiente más el agregado.

## Caracterización de alambre galvanizado

### Determinación del esfuerzo de fluencia

Con el fin de conocer las propiedades mecánicas de los materiales con los que se confeccionarán las vigas de concreto reforzado a escala reducida y conocer el efecto que produce la corrugación de los alambres, se determinó el esfuerzo de fluencia de los alambres galvanizados a utilizar, de acuerdo con la norma INTE C403:2014 (ASTM A370), el procedimiento seguido se menciona a continuación:

- Se cortaron 3 elementos de 30 centímetros de longitud para cada tipo de alambre utilizado (#8 y #10) y para la condición lisa y corrugada del alambre.

- Seguidamente, se realizaron marcas a los 5 cm de cada extremo de los elementos cortados, porque a la hora de realizar el ensayo a tracción, el alambre debe tener una longitud libre de 20 cm.
- Una vez marcadas las muestras, se determinó el diámetro real de los elementos.
- Se colocaron los elementos en la Máquina de ensayos Universal del CIVCO, para realizar los ensayos de tracción a los alambres. En total, se realizaron 3 ensayos para cada tipo de alambre, para cada condición de corrugación.



Figura 21 Ensayo de tracción a los alambres galvanizados

## Mezcla de microconcreto

Para definir la dosificación a utilizar, se tomó como referencia las resistencias obtenidas por Valverde (2018). Se utilizó un porcentaje de agregado de 20%, con respecto al volumen total, además de una relación agua/cemento de 0,4. Debe mencionarse que la dosificación utilizada, es específica para modelos a escala reducida, por lo

que difiere a las dosificaciones utilizadas comúnmente en la industria.

El cemento utilizado fue de Uso General, los materiales para la mezcla de microconcreto, fueron dosificados por peso y se consideró la humedad que presentaba el agregado fino para definir la cantidad de agua a utilizar.

Para obtener las cantidades de materiales a dosificar para la mezcla de microconcreto, se consideraron las ecuaciones utilizadas por Espinoza (1991), las cuales se presentan a continuación.

$$P_s = G_{bs} \cdot \gamma_w \cdot \%Ag \cdot V_t \quad \text{Ec (16)}$$

$$P_c = \gamma_c \cdot V_t \cdot \left[ \frac{(1-\%Ag) - \%Aire}{G_{sc} \cdot (A/C) + 1} \right] \quad \text{Ec (17)}$$

$$V_w = \frac{P_s \cdot \%D}{\gamma_w} + \frac{\gamma_c}{\gamma_w} + \frac{(1-\%Ag) \cdot V_t - \%Aire \cdot V_t}{G_{sc} \cdot (A/C) + 1} \quad \text{Ec (18)}$$

Donde:

Ps= Peso sólido del agregado

Pc= Peso del cemento

Vw= Volumen del agua

Vt= Volumen total

Gsc= Gravedad específica del cemento

$\gamma_w$ = Densidad del agua

$\gamma_c$ = Densidad del cemento

%D= Porcentaje de absorción

%Aire= Porcentaje de aire atrapado

%Ag= Porcentaje de agregado

Para determinar la cantidad de materiales a utilizar para el microconcreto, es necesario determinar el volumen total que se colará, en este caso corresponde a los cilindros y vigas a colar. Para un volumen total de 0,045 m<sup>3</sup>, en la figura 22 se presenta la dosificación por peso de los materiales necesarios.

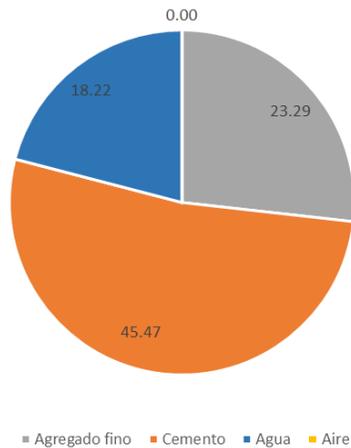


Figura 22 Dosificación en kilogramos para el microconcreto utilizado

## Moldeo de vigas y cilindros

### Elaboración y ubicación del refuerzo

Una vez conocidas las dimensiones y propiedades de la viga prototipo y las características de los materiales a utilizar, se realiza el refuerzo transversal y longitudinal.

- Como las dimensiones de las vigas a escala reducida son específicas y no se contaba con moldes que permitieran obtener las dimensiones requeridas. Estos se elaboraron con material acrílico y se presentan en la figura 23.



Figura 23 Moldes de acrílico para vigas a escala reducida

- Debido a que el alambre galvanizado se vende comúnmente liso, se realizó un

proceso de corrugación, con el fin de mejorar la adherencia entre el alambre y el concreto. Debe mencionarse que en el laboratorio del CIVCO, no se cuenta con instrumentos que permitan corrugar alambre galvanizado, por lo tanto se realizaron señas con la ayuda de una tenaza, dichas corrugaciones se realizaron de acuerdo con lo especificado en la norma ASTM A-615.

- Una vez se corrugó el alambre galvanizado, se procedió a realizar los diferentes elementos que conforman el refuerzo de la viga a escala reducida, como lo son el refuerzo longitudinal y los aros. En la figura 24 se muestran aros a escala realizados como refuerzo transversal.



Figura 24 Refuerzo transversal a escala reducida

- Después de la elaboración de los aros, se ensambló el refuerzo de acero, el cual se realizó con alambre #18, tal y como se muestra en la figura 25.



Figura 25 Refuerzo transversal y longitudinal a escala reducida

- Con el fin de garantizar el recubrimiento requerido, se confeccionaron separadores, los cuales constan de cubos de pasta de cemento de 1 cm de lado, con acero para fijarlos en su lugar

correspondiente, estos separadores se muestran en la figura 26.

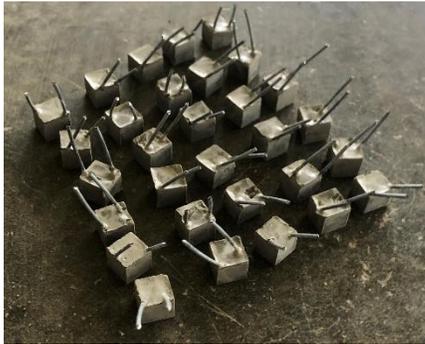


Figura 26 Separadores de concreto a escala reducida.

Una vez colocado el acero en el lugar correspondiente, se procedió a la mezcla del microconcreto a utilizar.

## Mezcla de microconcreto

Debido a que tanto los cilindros, como las vigas debían ser realizadas con la misma mezcla de microconcreto, se utilizó una batidora de concreto para mezclar la cantidad requerida, la batidora utilizada, se muestra en la figura 27.



Figura 27 Batidora utilizada para la mezcla de microconcreto.

Para el colado de las vigas, se elaboraron los moldes mostrados en la figura 23, mientras que para la fabricación de cilindros se contó con cilindros con dimensiones de 100x200 mm y cilindros a escala, los cuales se muestran en la figura 28.

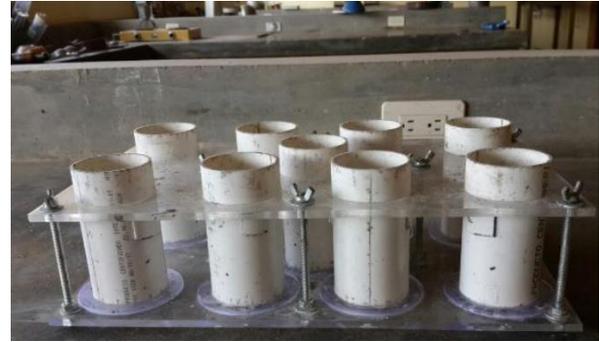


Figura 28 Moldes de cilindros a escala reducida  
Fuente: Valverde (2018)

“Debido a que los recipientes utilizados para moldear el microconcreto eran cilíndricos, se hizo uso de dos varillas de acero con punta redondeada para la etapa de consolidación de la mezcla por el método de varillado” (Valverde, 2018). Las dimensiones de las varillas se muestran en el cuadro 4.

### CUADRO 10. DIMENSIONES DE VARILLAS PARA COMPACTACIÓN DE MICROCONCRETO EN CILINDROS A ESCALA

Medición	Diámetro Varilla 1	Diámetro Varilla 2
1	8,02	7,91
2	7,93	8,00
3	7,93	7,93
Promedio	7,96	7,95

Fuente: Valverde (2018)

El proceso de mezclado se realizó basado en el procedimiento descrito por la norma INTE C18:2016 (ASTM C192), el cual se describe a continuación:

- Inicialmente, se garantizó que la batidora se encontrara en un estado limpio y se añadió el agregado fino y parte del agua a utilizar y se mezcló para que el agregado se saturara.
- Se detuvo la batidora y se agregó el cemento; el agua no se añade completamente, porque una parte se vierte durante el mezclado del microconcreto.

- Se mezcló durante 3 minutos y posteriormente se dejó reposar durante 3 minutos, evitando la evaporación de agua mediante el uso de un plástico, finalmente se mezcló durante 2 minutos más.
- Se descargó el microconcreto en un carretillo previamente humedecido y se mezcló con una pala, para garantizar una mezcla homogénea.

- Por último, transcurridas 24 horas; se desmoldaron las vigas y se dispusieron en la cámara húmeda.



Figura 29 Colado de vigas a escala reducida

## Moldeo de vigas

El proceso de moldeo de vigas se realizó basado en las especificaciones de la norma ASTM C-192 para vigas. El procedimiento se describe a continuación:

- Se agregó con una cuchara de pulpero la mezcla de microconcreto, hasta la mitad de la altura de la viga.
- Se introdujo la varilla, 53 veces por viga uniformemente a lo largo de la viga, con el cuidado de no golpear el fondo.
- Con un mazo, se golpeó el costado del molde, un total de 12 veces.
- Después se agregó la siguiente capa de microconcreto de forma que quedara ligeramente por encima de la parte superior del molde y se introdujo la varilla otras 53 veces por viga, con el cuidado de que la varilla no se introdujera en la capa inferior, y se proporcionaron otros 12 golpes al costado del molde, dichos golpes al costado del molde no se proporcionaron a una viga, debido a las características del molde
- Seguidamente, se enrasó la superficie superior con el fin de generar una superficie plana y garantizar la altura especificada de la viga.
- Se cubrió la parte superior de las vigas con plástico, para evitar la pérdida de agua.

## Moldeo de cilindros

El proceso de moldeo de los cilindros a escala reducida y de 200x100 mm, se realizó basándose en las especificaciones de la norma ASTM C-192 para cilindros.

Debe mencionarse que, para la compactación de los cilindros a escala reducida, debieron adaptarse algunos pasos, debido a que, estos cilindros presentan un tamaño menor a los especificados en la norma ASTM C-192.

La varilla utilizada para los cilindros a escala reducida posee las dimensiones presentadas en el cuadro 4 y los golpes a los costados se proporcionaron con la misma varilla, mientras que para los cilindros de 200x100 mm se utilizó una varilla conforme a la norma ASTM C-192 y los golpes a los costados se proporcionaron con un mazo.

El procedimiento de moldeo de los cilindros se describe a continuación:

- Se agregó con una cuchara de pulpero la mezcla de microconcreto hasta la mitad de la altura del cilindro.
- Se introdujo la varilla 25 veces por cilindro uniformemente a lo largo del cilindro, con el cuidado de no golpear el fondo.
- Se golpeó el costado del cilindro un total de 12 veces.
- Después se agregó la siguiente capa de microconcreto de forma que quedara ligeramente por encima de la parte superior del cilindro y se introdujo la varilla otras 25 veces, con el cuidado de que la

varilla no se introdujera en la capa inferior y se proporcionaron otros 12 golpes al costado del molde.

- Seguidamente, se enrasó la superficie superior con el fin de generar una superficie plana y garantizar la altura especificada.
- Se cubrió la parte superior de los cilindros con plástico, para evitar la pérdida de agua.
- Por último, transcurridas 24 horas se desmoldaron los cilindros y se dispusieron en la cámara húmeda.



Figura 30 Colado de cilindros a escala reducida

## Falla de cilindros

Las fallas de los cilindros se realizaron conforme a la norma INTE C39 (ASTM C-39) a una velocidad de falla de  $(0,25 \pm 0,05)$  MPa/s.

Las edades de falla correspondieron a 7 y 28 días para los cilindros a escala reducida, y 28 días para los cilindros de 200x100mm. Cabe destacar que se respetaron los rangos de tolerancia de tiempo para la falla de los cilindros mostrada en el cuadro 5.



Figura 31 Patrón de falla de cilindros.

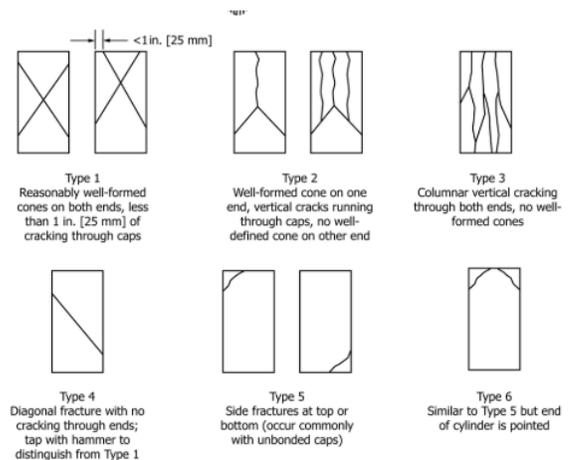


Figura 32 Esquema típico de patrones de falla de cilindros  
Fuente: ASTM C-39

## Falla de vigas

Los ensayos de flexión realizados a las vigas, se llevaron a cabo en el piso fuerte del CIVCO, donde se preparó anticipadamente un marco de carga que permitiera la realización del ensayo.

Una semana antes del ensayo, las vigas fueron retiradas de la cámara húmeda para la instalación de los dispositivos donde se colocarán las galgas extensométricas y el crackmeter, se recomienda la instalación de los dispositivos a la viga con anticipación, debido a los problemas; que se pueden presentar relacionadas a la fijación de estos dispositivos.

Para el ensayo a flexión, se utilizaron dos galgas extensométricas para reportar las deformaciones unitarias tanto en compresión, como en tensión. Estas se ubicaron en las zonas inferior y superior, respectivamente, con el fin de conocer su ubicación exacta, debido a que se encuentran en las fibras extremas de la viga.

Además, se utilizó un crackmeter, el cual se acopló a la zona central de la viga, con el fin de reportar las deflexiones presentes en las vigas.

Se marcaron las zonas de apoyo y carga, con el fin de determinar los sitios de colocación de las piezas que sirvieron para los apoyos y para la aplicación de cargas, además de determinar las dimensiones reales de las vigas, las cuales se detallan en el apéndice 4.



Figura 33 Equipo de carga para ensayo de flexión



Figura 34 Grietas generadas en las vigas debido a la aplicación de carga

## Selección de software para análisis no lineal

Con el fin de elegir el software a utilizar para determinar el comportamiento teórico de la viga prototipo, se realizó una comparación de estos programas, mediante una matriz de priorización. La cual, según Betancourt (2018) consiste en una serie de criterios ponderados que se utilizan para

elegir una opción entre un conjunto, por medio de matemáticas simples.

El procedimiento realizado, se muestra en la figura 35.

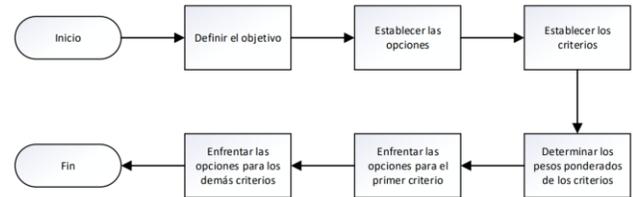


Figura 35 Procedimiento para realizar una matriz de priorización

Fuente: Betancourt (2018)

Como se muestra en la figura 35, el primer paso define el objetivo de la matriz de priorización, el cual consistió en determinar el software a utilizar, para determinar el comportamiento teórico de la viga prototipo. Una vez establecido el objetivo, se determinaron los softwares a analizar, los cuales se presentan a continuación:

- Perform 3D
- Abaqus
- OpeenSees
- Ansys
- Xtract
- Robot
- Atena

Después de establecer las alternativas, se determinaron los criterios de selección a los que se someterán las alternativas, los cuales se enlistan a continuación:

- Facilidad para ejecutar comandos
- Organización y accesibilidad de comandos
- Representación de materiales
- Facilidad de establecer dimensiones geométricas
- Facilidad de aplicación de cargas
- Variabilidad de resultados
- Representación gráfica de resultados

Posterior a definir los criterios de selección, se determina el peso ponderado de cada criterio, con el fin de establecer el grado de importancia que tendrá cada criterio, para la selección de la

alternativa a seleccionar. Dichos pesos ponderados, se presentan en el cuadro 1 del apéndice 10.

Una vez establecidos los pesos ponderados de los criterios, se comparan las opciones para cada criterio, dicha comparación, se muestra en el cuadro 2 del apéndice 10. Finalmente, se suman los resultados para cada criterio y se determina la mejor opción, a partir del mayor puntaje obtenido.

## **Documento “Guía para elaborar modelos a escala reducida de concreto reforzado”**

La elaboración del documento “Guía para elaborar modelos a escala reducida de concreto reforzado” consistió en una investigación bibliográfica sobre los principales aspectos relacionados al proceso de escalado de modelos de concreto reforzado, presentándose así información sobre clasificación de los modelos a escala, sobre análisis dimensional y similitud, y principales factores de escala utilizados en modelos a escala de concreto reforzado.

Por último, se investigó sobre procedimientos para realizar modelos a escala reducida de concreto reforzado; y se complementó con consideraciones necesarias a tener en cuenta para el proceso de escalado de modelos.

# Resultados

## Caracterización de agregados finos

Primeramente, se presentan los resultados obtenidos correspondientes al análisis de las características de dos agregados finos provenientes de dos distintas fuentes, con el fin de determinar el agregado fino óptimo para su uso en microconcreto, con el fin de elaborar vigas a escala reducida. Los datos detallados de los diferentes ensayos se encuentran en el apéndice 1.

### Material más fino que tamiz No.200

Previo a la determinación de la granulometría del material, se removió de la muestra, el material más fino que el tamiz No.200, los resultados al lavar las muestras por el tamiz No.200, se muestran en el cuadro 11.

CUADRO 11. PORCENTAJE DE MATERIAL PASANDO TAMIZ NO.200 MEDIANTE LAVADO	
Agregado fino	Porcentaje de agregado más fino que tamiz No.200 (%)
Arena de río	6,15
Arena de tajo	23,07

### Granulometría

Se presentan las curvas granulométricas obtenidas para los dos agregados finos, así como su módulo de finura respectivo.

**CUADRO 12. MÓDULOS DE FINURA DE LOS AGREGADOS**

Agregado fino	Módulo de finura
Arena de río	2,78
Arena de tajo	1,94

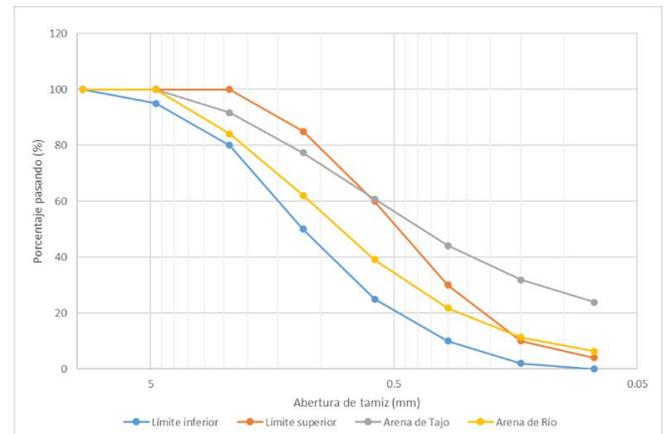


Figura 36 Curvas granulométricas de los agregados finos de tajo y río.

### Gravedad específica y absorción

Se presentan los resultados obtenidos de gravedad específica para diferentes condiciones de humedad, además de la absorción de los dos agregados finos analizados.

**CUADRO 13. GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS FINOS**

Parámetro	Arena de río	Arena de tajo
Gravedad específica seca (Gbs)	2,4	2,2
Gravedad específica saturada superficie seca (Gsss)	2,6	2,4
Gravedad específica aparente (Gs)	2,8	2,7
Absorción (%)	5,4	7,2

### Pesos unitarios y vacíos

Los datos correspondientes a los pesos unitarios en condición suelta y compactada, como los vacíos de los agregados finos analizados, se presentan a continuación.

<b>CUADRO 14. PESOS UNITARIOS Y VACÍOS DE LOS AGREGADOS FINOS</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Arena de río</b>	<b>Arena de tajo</b>
Peso unitario suelto	1430	1360
Peso unitario compactado	1640	1600
Vacíos (%)	31,6	26,9

## Caracterización del alambre galvanizado

Una vez realizado el ensayo de tracción al alambre galvanizado, se determinaron los esfuerzos de fluencia, además de la deformación para los alambres en condición lisa y corrugada, los cuales se presentan en el cuadro 15 y 16, respectivamente. Los datos detallados del ensayo a tracción se encuentran en el apéndice 2.

<b>CUADRO 15. Caracterización del alambre liso</b>			
<b>Alambre galvanizado</b>	<b>Esfuerzo de fluencia (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Esfuerzo de rotura (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Elongación (%)</b>
No.10	3137	3971	22,1
No.8	2885	3888	20,3

<b>CUADRO 16. Caracterización del alambre corrugado</b>			
<b>Alambre galvanizado</b>	<b>Esfuerzo de fluencia (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Esfuerzo de rotura (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Elongación (%)</b>
No.10	2887	3630	20,3
No.8	2869	3750	17,5

## Resistencia a la compresión de cilindros

Con el fin de conocer la resistencia a la compresión del microconcreto utilizado en la elaboración de las vigas a escala reducida, se elaboraron cilindros a escala. Se realizaron fallas de cilindros a edades de 7 y 28 días, con el fin de conocer el desarrollo de resistencia generado por dichos cilindros. Las dimensiones y resistencias de los cilindros fallados se encuentran en el apéndice 3.

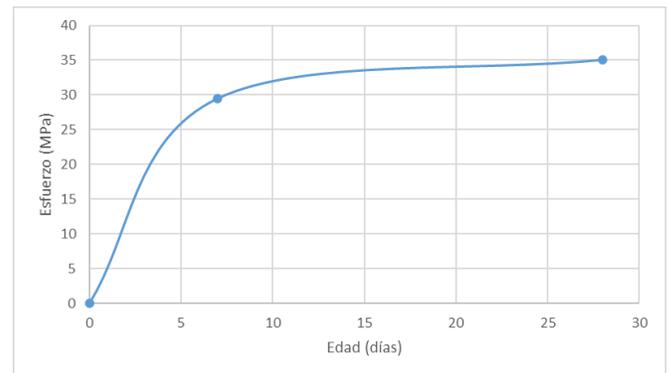


Figura 37 Desarrollo de resistencia a la compresión de cilindros a escala.

Además de los cilindros a escala, se elaboraron 3 cilindros de 200x100mm, de acuerdo con la sección 26.12.1.1 del ACI 318-14, con el fin de comparar las resistencias mecánicas a una edad de 28 días, utilizando cilindros de tamaño diferente.

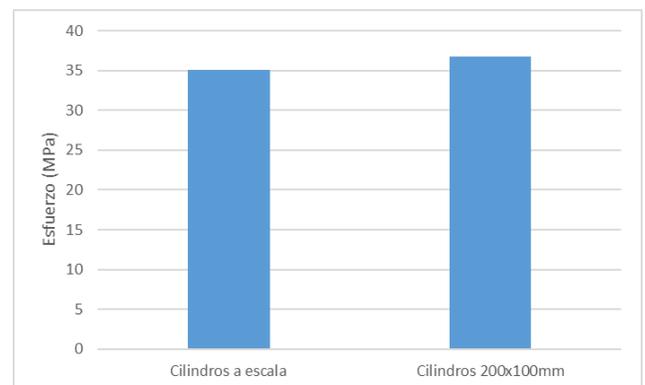


Figura 38 Resistencia a la compresión de cilindros a escala y de 200x100mm.

## Selección de software para análisis no lineal.

Para establecer el software a utilizar para el análisis no lineal, se realizó una matriz de priorización. En el cuadro 17, se presenta la calificación porcentual de cada alternativa para el criterio seleccionado, así como el porcentaje total y el total posible por cada alternativa.

Los pesos ponderados de los criterios se presentan en el cuadro 1 del apéndice 10 y comparación de las opciones para cada criterio, dicha comparación, se muestra en el cuadro 2 del apéndice 10.

<b>CUADRO 17. Calificación porcentual de los softwares analizados</b>								
	<b>Perform3D</b>	<b>Abaqus</b>	<b>OpenSees</b>	<b>Ansys</b>	<b>Xtract</b>	<b>Robot</b>	<b>Atena</b>	<b>Total</b>
Facilidad para ejecutar comandos	0,7%	1,1%	0,1%	0,7%	1,1%	1,1%	1,0%	5,7%
Organización y accesibilidad de comandos	1,6%	1,9%	0,2%	3,3%	3,3%	3,3%	2,4%	16,1%
Representación de materiales	1,9%	3,4%	9,6%	3,4%	1,0%	2,8%	6,3%	28,5%
Facilidad de establecer dimensiones geométricas	1,7%	0,5%	0,6%	1,0%	0,6%	0,7%	0,7%	5,7%
Facilidad de aplicación de cargas	1,7%	1,9%	0,8%	1,6%	1,8%	1,2%	1,8%	10,9%
Variabilidad de resultados	1,1%	1,7%	3,4%	2,2%	0,4%	1,6%	0,5%	10,9%
Representación gráfica de resultados	2,5%	6,1%	0,2%	6,0%	2,4%	3,6%	1,5%	22,3%
<b>Total</b>	<b>11,2%</b>	<b>16,8%</b>	<b>14,8%</b>	<b>18,2%</b>	<b>10,6%</b>	<b>14,2%</b>	<b>14,2%</b>	<b>100,0%</b>

# Ensayo de flexión a vigas

Una vez obtenidos los resultados del ensayo a flexión de las vigas, se graficaron los resultados y se comparó con el gráfico de momento-curvatura de la viga teórica con ayuda del programa Opensees, en los apéndices 6 y 7, se muestran los códigos utilizados para la creación de la sección y elaboración del análisis, además a partir del anexo 2, se establecieron las unidades a considerar.

Una vez obtenido el gráfico de momento-curvatura, se escalaron los resultados de las vigas a escala reducida, conforme al cuadro 9, suponiendo un modelo verdadero práctico. Los momentos obtenidos se multiplicaron por el factor  $S_l^3$  (27) y la curvatura al ser una dimensión lineal

inversa, se dividió por el factor  $S_l$  (3). Los resultados obtenidos, se muestran en la siguiente figura.

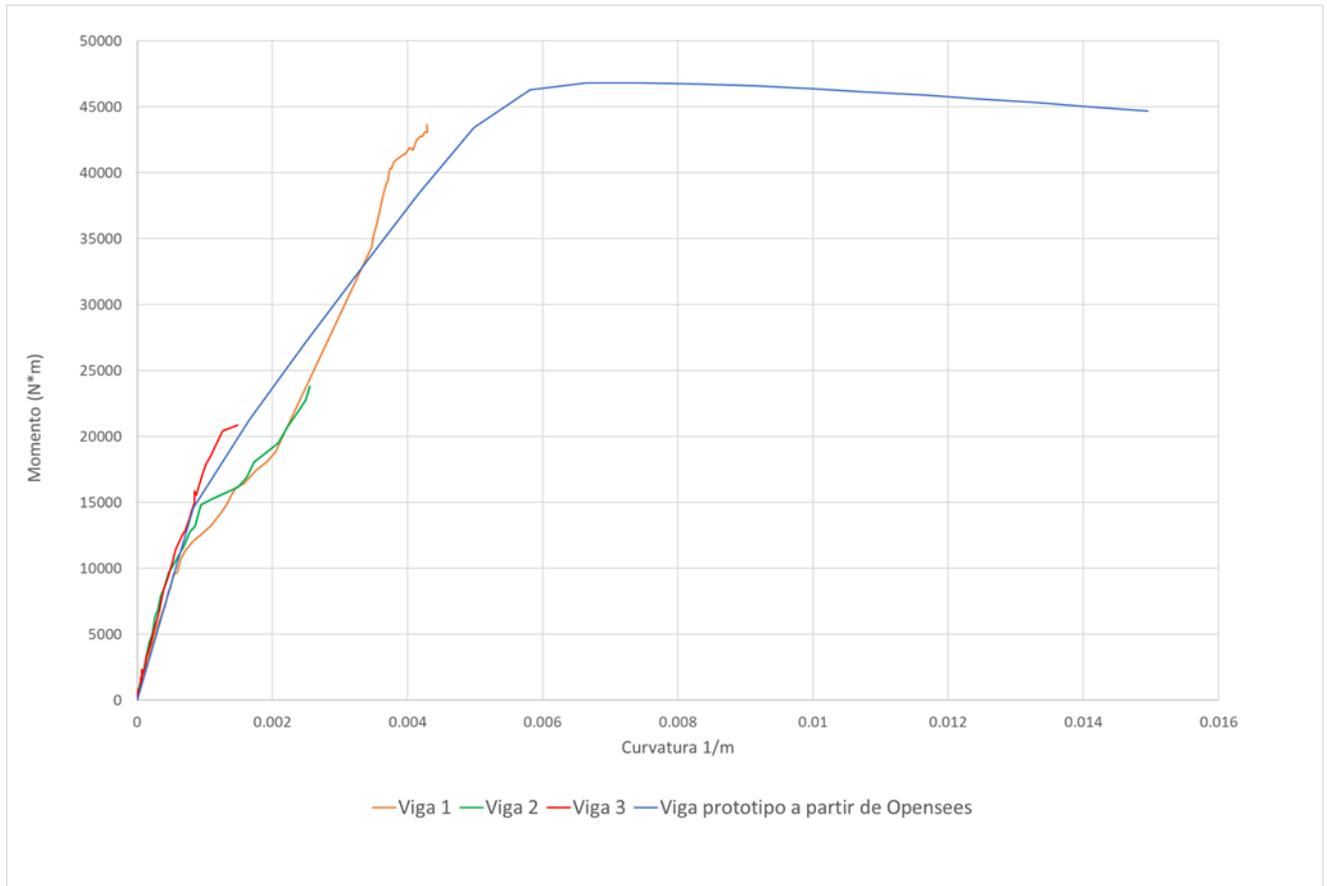


Figura 39 Diagrama de momento curvatura de las vigas a escala reducida (escaladas) y viga prototipo.

Además del comportamiento del momento-curvatura, se registraron los datos de desplazamiento con el objetivo de analizar el comportamiento de dichos desplazamientos y la carga aplicada correspondiente.

Para determinar el comportamiento teórico de la viga, se modeló la viga prototipo en OpenSees, debe mencionarse que, para lograr una mayor aproximación del comportamiento teórico, se debió utilizar el esfuerzo de rotura del alambre corrugado, en vez del esfuerzo de fluencia. En el apéndice 8 se muestra el código necesario para generar el gráfico de fuerza-desplazamiento el cual se realizó a partir de la recomendación de Mazzoni (2020) de desarrollar un procedimiento push-over. Además, en el anexo 2, se presentan los parámetros necesarios para dicho análisis .

Los resultados de las vigas a escala reducida se escalaron, según el cuadro 9, suponiendo un modelo verdadero práctico, la carga al tratarse de una carga concentrada, se multiplicó por un factor de  $S_l^2$  (9) y el desplazamiento, se multiplicó por un factor de  $S_l$ .(3).

Dichos resultados se muestran en la figura 40 y los principales resultados, en el cuadro 18, debe destacarse que se utilizaron únicamente los resultados de desplazamiento de las vigas 2 y 3, debido a problemas presentados en el registro de los desplazamientos de la viga 1.

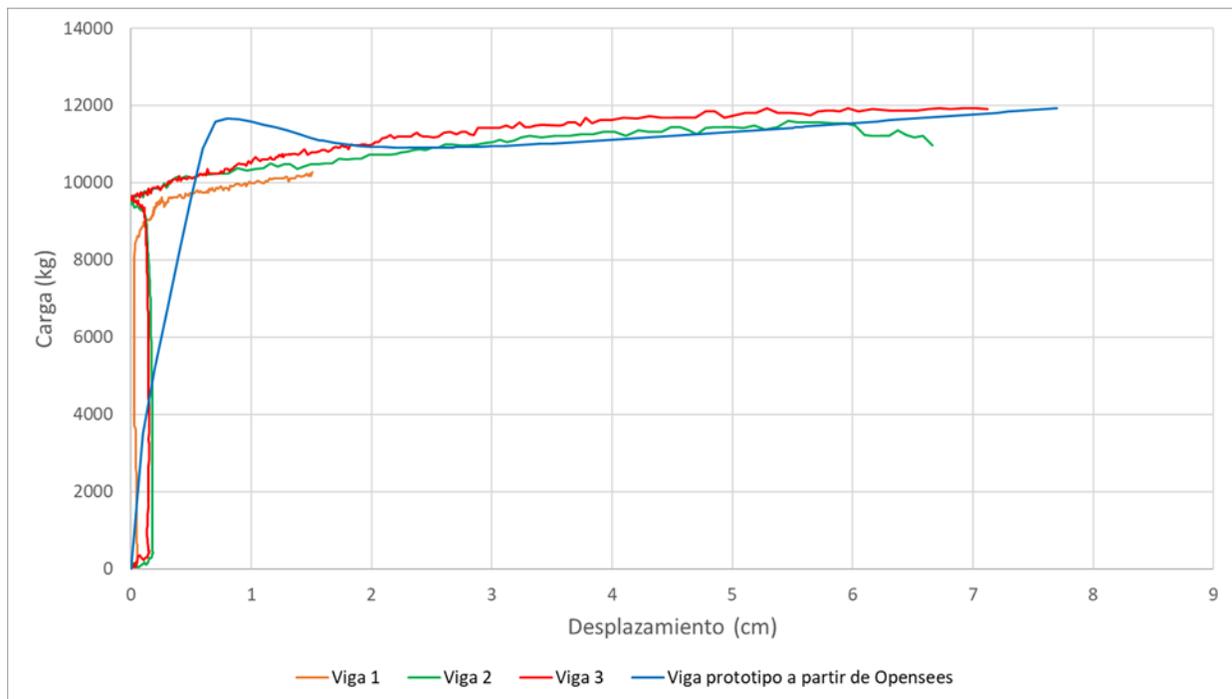


Figura 40 Gráfico de fuerza-desplazamiento de las vigas a escala reducida (escaladas) y viga prototipo

<b>CUADRO 18. RESULTADOS DE CARGA Y DESPLAZAMIENTO</b>		
<b>Viga</b>	<b>Carga máxima (kg)</b>	<b>Desplazamiento máximo (cm)</b>
1	11691	-
2	11600	6,66
3	11933	7,11
Promedio	11741	6,89
Prototipo	11932	7,70

# Documento “Guía para elaborar modelos a escala reducida de concreto reforzado”

El documento desarrollado tiene como objetivo establecer una guía para la elaboración de modelos a escala reducida de concreto reforzado. También, presenta recomendaciones para la selección de materiales a utilizar, como moldes, microconcreto o alambre galvanizado.



Figura 41 Portada del documento “Guía para escalar modelos de concreto reforzado.”

El documento completo, se encuentra en el apéndice 9 y a continuación, se comenta la principal información de los capítulos de dicho documento.

## Capítulo 1

Este capítulo presenta los aspectos generales de la guía desarrollada, una introducción a la realización de modelos a escala reducida. Además, se establece el alcance y objetivo del documento.

## Capítulo 2

En esta sección, se presenta la definición y utilización de modelos a escala, así como su

clasificación según el tipo de modelo que se realice, siendo estos, modelos elásticos, indirectos, directos y de resistencia.

Además, se presentan aspectos de análisis dimensional y similitud, necesarios para la obtención de los factores de escala aplicables a modelos de concreto reforzado, así como los factores aplicables.

## Capítulo 3

En este capítulo, se presenta el procedimiento recomendado para lograr un correcto proceso de escalado de modelos de concreto reforzado. Dicho procedimiento, se basó en el recomendado por Harris & Sabnis (1999), no obstante, se consideró la instrumentación disponible, para el establecimiento del alcance. El procedimiento se muestra en la figura 42.

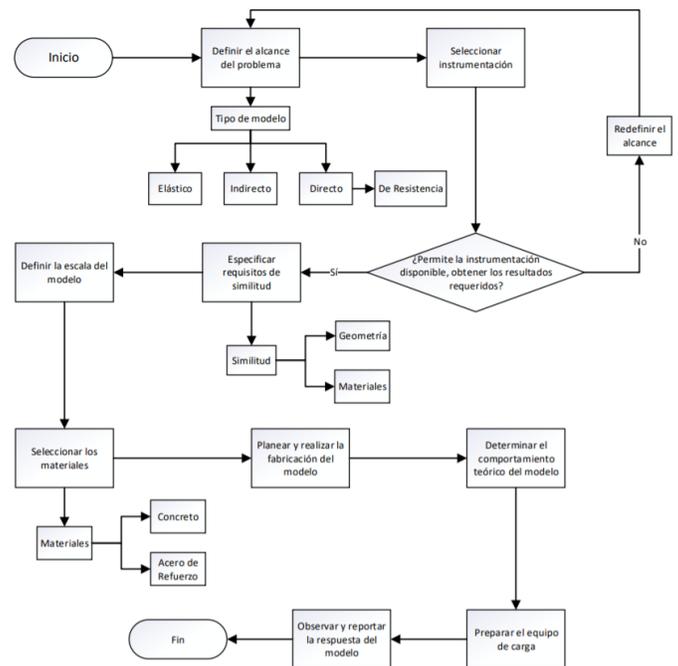


Figura 42 Procedimiento para realizar modelos a escala reducida de concreto reforzado

# Análisis de los resultados

## Caracterización de agregados

Con el propósito de determinar el agregado fino que presente mejores características para la elaboración de microconcreto, se analizaron dos agregados finos provenientes de dos fuentes distintas, el primero se obtuvo de un tajo y el segundo se obtiene mediante la fragmentación de roca proveniente de un río.

Previo a la realización del ensayo de granulometría, se determinó el porcentaje más fino que el tamiz No.200 de las muestras, resultados que se presentan en el cuadro 11, en donde se evidencia que el agregado de río presenta un porcentaje pasando el tamiz No.200 de 6,15%, cantidad que es menor al presentado por el agregado proveniente del tajo, el cual presentó un 23,07%.

Con el fin de determinar si este porcentaje corresponde a impurezas orgánicas presentes en los agregados, se realizó la determinación de la colorimetría de ambos agregados. Simeon (2005) menciona que en los agregados finos naturales a veces se presentan impurezas orgánicas, las cuales menoscaban la hidratación del cemento y el desarrollo consecuente de la resistencia del concreto. No obstante, cuando se realiza dicho ensayo de colorimetría, el color de la solución de hidróxido de sodio presentó un color más claro que el color patrón, como se muestra en la figura 13.

Para garantizar un adecuado proceso de colado de las vigas de concreto reforzado a escala reducida, se tamizaron los agregados con el tamiz No. 4, para evitar la presencia de partículas individuales de agregados con tamaño mayor a 4,75mm. Dicho resultado se evidencia en la figura 35, ya que los agregados estudiados, lograron pasar completamente el tamiz No.4.

En la figura 36, se presentan los resultados obtenidos del análisis granulométrico de los agregados finos. Con respecto al agregado de río, se obtuvo un cumplimiento en los tamices,

a excepción de los tamices No.100 y No.200, en donde se obtuvo un excedente de 1,4 y 2,4%, con respecto a los límites superiores. No obstante, estos valores se encuentran dentro del 5% de la extensión máxima permitida, mencionada por (Elizondo, 2013).

Además, en la figura 36, se presentan los resultados del análisis granulométrico para el agregado fino proveniente de un tajo. Al analizar este agregado fino, se evidenció la finura que este presenta, debido a que se obtuvieron porcentajes pasando que incumplen con el límite máximo establecido.

Primeramente, se incumplió en un 0,8% el límite superior establecido para el tamiz No.30, seguidamente se incumplió en 14,1%, 21,9% y 19,9% con los límites superiores establecidos para los tamices No.50, No.100 y No.200, respectivamente.

Además del comportamiento granulométrico, se determinó el módulo de finura, el cual, a partir de un valor numérico, permite determinar si el agregado analizado es fino o grueso. MEIC (1973) establece que para que un agregado fino sea aceptado para la elaboración de concreto hidráulico, el módulo de finura debe ser superior a 2.3 e inferior a 3.1. Por su parte, Simeon (2007) menciona que una arena se clasifica como muy fina, si el módulo de finura se encuentra entre 0.5 y 1,5, como fina, si se oscila entre 1.5 y 2.5 y gruesa, si posee valores de 2.5 a 3.5.

En el cuadro 12, se presentan los datos de módulos de finura obtenidos, para el agregado río, se obtuvo un módulo de finura de 2,78, por lo que se clasificaría como una arena gruesa y cumpliría con la especificación del MEIC, mientras que la arena proveniente de tajo presentó un valor de 1,94, por lo que se clasifica como una arena fina e incumpliría para su uso en concreto hidráulico, ya que el MEIC (1973) menciona que "si el módulo de finura varía en más de 0.20 del valor considerado en el proporcionamiento de las mezclas de concreto, el agregado fino deberá ser rechazado a no ser que se realicen los ajustes necesarios en

las proporciones del concreto para compensar las deficiencias en graduación”.

En relación con la gravedad específica, los valores se muestran en el cuadro 13, en el que comprueba que la gravedad específica en condición saturada superficie seca ( $G_{ss}$ ), posee un valor mayor que la gravedad específica seca ( $G_s$ ), debido a que en ambos casos se considera el mismo volumen, pero para la  $G_{ss}$ , se contempla el agua absorbida por el agregado. Además, la gravedad específica más alta, para ambos agregados, correspondió a la gravedad específica aparente ( $G_s$ ), debido a que, en esta, solo se considera el volumen de la sección impermeable del agregado.

ACI (1999) menciona que la mayoría de los agregados naturales tiene densidades relativas (gravedades específicas) que varían de 2.3 a 2.9. Por lo tanto, los valores obtenidos se encuentran en este rango, a excepción de la  $G_s$  del agregado fino de tajo, el cual presentó un valor de 2,2.

En el cuadro 13, se evidencia como en las tres gravedades específicas calculadas, el agregado fino proveniente de río presentó valores superiores a los del agregado fino de tajo, lo cual se debe tener en cuenta a la hora de seleccionar un agregado.

Mientras mayor sea este indicador (gravedad específica), y siendo el material de origen pétreo, se pueden hacer correlaciones con respecto al porcentaje de absorción y porosidad del material, su resistencia mecánica y durabilidad, (...). Un  $G_s$  bajo indica alta porosidad, alta absorción y debilidad del agregado (Chine et al., 2018).

Lo mencionado anteriormente con respecto a la absorción, se evidencia en el cuadro 13, debido a que el agregado fino que presentó valores más bajos de gravedad específica presentó a su vez, una absorción mayor, lo que quiere decir que el agregado proveniente de tajo presenta mayor capacidad de poseer agua en sus poros permeables.

Por otra parte, Sánchez de Guzmán (2006) menciona que el concreto hidráulico posee agregados finos con un peso unitario de 1300 a 1600  $\text{kg}/\text{m}^3$  y estos pueden ser utilizados en concreto estructural y no estructural. En el cuadro 14, se presentan los resultados correspondientes a pesos unitarios sueltos y compactados de los agregados de río y tajo, los cuales poseen pesos unitarios superiores a 1300  $\text{kg}/\text{m}^3$ , por lo que

pueden ser utilizados para la elaboración de concreto hidráulico estructural.

Además, en el cuadro 14, se evidencia como el agregado de río posee pesos unitarios sueltos y compactados superiores a los del agregado de tajo, a pesar de presentar menor porcentaje de vacíos entre partículas.

## Caracterización de alambre galvanizado

Con el objetivo de conocer las características mecánicas del alambre galvanizado a utilizar y determinar los cambios en las propiedades que produce el proceso de corrugado al alambre, se realizó el ensayo de tracción a los diferentes alambres por considerar.

Según Bustos (2017), el corrugado en alambres galvanizados provoca un aumento en la zona elástica, lo que provoca un esfuerzo de fluencia mayor, en comparación a los alambres lisos. Este fenómeno es conocido como endurecimiento del material y es una de las consecuencias del trabajo o deformación en frío de los materiales.

En los cuadros 15 y 16, se presentan los resultados obtenidos para los alambres lisos y corrugados, respectivamente. A partir de dichos cuadros, se evidencia como los valores de esfuerzos de fluencia y rotura, disminuyeron posterior a realizar el proceso de corrugación, siendo más significativa la disminución para el alambre No.10. Lo que implica que no se obtuvo el comportamiento esperado, según Bustos (2017).

Además, después de corrugar los alambres, también se vio disminuida la elongación promedio, donde se pasó de una elongación de 22,1% a 20,3% para el alambre No.10 y de 20,3% a 17,5% para el alambre No.8.

Con respecto a los resultados obtenidos, en los cuadros 15 y 16, se presentan los valores de los esfuerzos de fluencia, los cuales resultaron 2885 y 2869  $\text{kg}/\text{cm}^2$  para los alambres galvanizados No 8 y 10, respectivamente. Estos esfuerzos se presentan cuando el alambre pasa del rango elástico, al plástico, o, dicho de otra forma, cuando las cargas aplicadas producen deformaciones permanentes en el elemento.

Tomando como referencia la norma ASTM A-615 (2020), la cual menciona que el aceros de grados 40, posee esfuerzos de fluencia máximo de 2855  $\text{kg}/\text{cm}^2$  y 4283  $\text{kg}/\text{cm}^2$ . Debido a lo anterior,

los esfuerzos de fluencia de los alambres galvanizados presentan valores cercanos a los especificados para un acero grado 40, presentando diferencias de 0,5% para el No. 8 y 1,1% para el alambre No.10. No obstante, se presentan diferencias más altas con respecto al esfuerzo máximo, donde se presentan diferencias inferiores de 12,4% para el alambre No.8 y 15,2% para el alambre No.10.

## Resistencia a compresión del concreto

Con el fin de conocer el desarrollo de la resistencia a compresión del microconcreto utilizado para la elaboración de las vigas a escala, se realizaron fallas a 7 y 28 a los cilindros a escala. En la figura 37 se muestra la curva de esfuerzo en función de la edad, donde se evidencia como a los 7 días de elaborada la mezcla de microconcreto, se alcanzó una resistencia promedio de 29,5 MPa, la cual representa el 84,1% de la resistencia alcanzada a una edad de 28 días, la cual tuvo un valor promedio de 35,1 MPa.

Con respecto a las resistencias a la compresión obtenida por Valverde (2018) se tienen valores de 23,67 MPa y 32,53MPa a 7 y 28 días de, por lo que se obtuvieron diferencias en los valores de resistencia a la compresión de 24,6% y 7,9% para las edades de 7 y 28 días. Por otra parte, según la ecuación para determinar la resistencia a la compresión de mezclas de microconcreto propuesta por (Navarro, sf), se obtienen resistencias de 23,1 MPa y 33,0 MPa a edades de 7 y 28 días, lo que implica que se tuvieron diferencias en los valores experimentales de 27,6% y 6,1%, respectivamente. Dichas diferencias se deben a la utilización de un agregado fino con diferentes propiedades al agregado considerado por Valverde (2018) y Navarro (sf), además debido a que, por la cantidad requerida, se varió el método de mezclado, el cual a su vez provocó que se cambiara el orden de proporcionamiento de los materiales y los tiempos de las etapas de mezclado.

Con el fin de comparar la resistencia a la compresión del microconcreto, obtenida a partir de moldes a escala reducida, con la definición de  $f'c$  del ACI 318-14, se fallaron 3 cilindros a escala y 3 cilindros de 200x100mm. En la figura 38, se evidencia como el valor del  $f'c$  según el ACI posee un valor de 36,8 MPa y 35,1MPa a partir de los

cilindros a escala, para una diferencia de 1,7 MPa, lo que genera una diferencia de un 4,6% con respecto a la definición de  $f'c$  del ACI 318-14.

## Selección de software para análisis no lineal.

A partir del cuadro 18, se evidencia como el programa computacional óptimo a partir de los criterios establecidos corresponde a Ansys, seguido de Abaqus, los cuales, al realizar la matriz de priorización, obtuvieron calificaciones porcentuales de 18,2% y 16,8%, correspondientemente, dichos programas destacan por su facilidad de ejecución de comandos y por la representación gráfica de los resultados.

No obstante, se debe mencionar que dichos softwares requieren de una licencia para su utilización y la única forma de acceder libremente a los programas Ansys y Abaqus es mediante una versión estudiantil, la cual posee una capacidad de análisis limitada y puede ocasionar que no se permita acceder a los resultados requeridos.

Debido a lo anterior, se utilizó el programa Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees) el cual obtuvo una calificación porcentual de 14,8%. Este software no requiere de ningún tipo de licencia y “es un software para simular la respuesta sísmica de sistemas estructurales y geotécnicos, proporciona métodos dinámicos y estáticos no lineales, solucionadores de ecuaciones y métodos para manejar restricciones” (UC Berkeley, 2006).

OpenSees, según en cuadro 17, destaca por la representación de los materiales, debido a que existen diversos tipos de modelos con comportamientos diferentes, según el tipo de material a utilizar. Además, mediante OpenSees es posible obtener una alta variedad de resultados del comportamiento teórico de un elemento, según el tipo de ensayo realizado.

## Ensayo de flexión a vigas

Previo a realizar los ensayos de flexión, se determinaron las dimensiones de las vigas a escala reducida, donde se obtuvo una adecuada representación de las medidas establecidas, debido a que la mayor diferencia se obtuvo en el ancho de las vigas 1 y 3, donde se obtuvo una diferencia de 2,02%. No obstante, dichas medidas

se encontraron dentro de la tolerancia permitida según el requisito de similitud establecido, el cual corresponde a 5%, la totalidad de las medidas realizadas, se encuentran en el apéndice 4

Al realizar los ensayos a flexión, se evidenció el comportamiento de vigas de concreto reforzado sometidas a flexión. Inicialmente, al empezar a cargar las vigas, el comportamiento es lineal y tanto el concreto, como el acero contribuyen a resistir las cargas aplicadas, hasta que se supera la resistencia a tensión del concreto, “cuando la tensión en la fibra más esforzada de alguna sección excede la resistencia del concreto a la tensión, empiezan a aparecer grietas, a medida que se incrementa la carga, estas grietas aumentan en número, en longitud y en abertura” (González et al., 2013).

Posterior a la aparición de las grietas, Wight & MacGregor (2012) mencionan que las grietas se propagan en dirección al eje neutro de la sección y los esfuerzos de tensión que soportaba el concreto, se transfieren al acero. A partir de la aparición de las primeras grietas, el comportamiento de la viga ya no es elástico, “en esta etapa, el esfuerzo en el acero aumenta hasta que alcanza su valor de fluencia. Desde el momento en que el acero empieza a fluir, la deflexión crece en forma considerable, sin que apenas aumente la carga.” (González et al., 2013). De acuerdo con el agrietamiento evidenciado en las vigas de concreto reforzado, en la figura 34 se muestra como estas grietas lograron propagarse hacia la zona de compresión de la viga, además de que dichas grietas, se presentaron únicamente en la zona central de la viga.

Por otra parte, diagrama de momento-curvatura de la viga prototipo, fue obtenida utilizando el programa Opensees, donde se ingresaron las propiedades mecánicas del concreto y acero utilizadas para la elaboración de las vigas a escala, una vez obtenido el diagrama, se escalan los resultados, según el cuadro 9, asumiendo que las propiedades de los materiales utilizados para la construcción de las vigas son similares a las consideradas para el modelado del prototipo.

En la figura 39 se muestra el diagrama de momento-curvatura teórico, donde se evidencia el comportamiento descrito por Wight & MacGregor (2012), mostrado en la figura 7, en donde inicialmente el comportamiento es lineal y creciente. Además, una vez los esfuerzos de tensión superan la capacidad resistente del

concreto, se genera un cambio en la pendiente del diagrama, tal y como se evidencia en la figura 39, hasta que se alcanza el momento máximo que soporta la viga.

En relación con el comportamiento del momento curvatura de las vigas de concreto reforzado, en la figura 39 se muestra como en el rango elástico, su comportamiento es similar al comportamiento teórico del prototipo. No obstante, en la figura 39, se evidencia como no se logró obtener completo el comportamiento de las vigas a escala reducida, debido a que las galgas utilizadas, son útiles únicamente en el rango elástico, además, durante la ejecución de los ensayos de flexión, las galgas extensométricas presentaron fallas en el registro de datos, lo cual limitó los resultados obtenidos.

Por otra parte, en la figura 40, se muestra los gráficos de carga en función del desplazamiento de las vigas a escala reducida, donde se evidencia que inicialmente, se aumentó la carga sin que se generaran desplazamientos y una vez alcanzado el punto de fluencia, los desplazamientos aumentan en mayor proporción, incrementando levemente la carga soportada, lo que respalda el comportamiento subreforzado de la viga, demostrado en la formación de grietas.

En relación con los resultados de carga máxima de las vigas a escala reducida, estos resultados se presentan en el cuadro 17, al escalar dichos resultados de carga máxima, se obtuvo un promedio de 11741 kg, lo cual implica una diferencia de 1,6% con respecto a la carga máxima de la viga prototipo a partir de OpenSees, la cual tuvo un valor de 11932 kg.

Por otra parte, los desplazamientos últimos obtenidos, se muestran en el cuadro 17, debe mencionarse que el instrumento utilizado para la medición del desplazamiento presentó una falla durante la determinación de los datos de la viga 1, por lo tanto se determinó el desplazamiento promedio, considerando únicamente los datos de las vigas 2 y 3.

Con respecto al desplazamiento último de las vigas a escala reducida, se presentó un valor escalado promedio de 6,89 cm, lo cual representa una diferencia de 10,5% con respecto al desplazamiento máximo obtenido para la viga prototipo a partir de Opensees, el cual presentó un valor de 7,70 cm.

## Documento “Guía para elaborar modelos a escala reducida de concreto reforzado”

La guía realizada contiene la definición e importancia en la actualidad de los modelos estructurales a escala reducida, así como la clasificación de estos según el tipo de modelo a considerar, basado en las recomendaciones de Harris & Sabnis (1999).

Posteriormente, se incluyen aspectos de análisis dimensional y similitud, necesarios para las deducciones de los principales factores de escala aplicables a modelos a escala reducida de concreto reforzado, además de otra clasificación, según Harris & Sabnis (1999) basado en la similitud entre el modelo y el prototipo realizado.

Finalmente, se describe un procedimiento que permita un correcto escalado de modelos estructurales, aplicable a elementos como vigas, columnas o losas, el cual se muestra en la figura 42.

Dicho procedimiento inicia con la definición del alcance, en el cual se debe considerar el tipo de elemento a estudiar, así como determinar sus dimensiones y características de refuerzo y que tipo de acciones desea estudiarse del modelo. Posteriormente al establecimiento del alcance, se consideró seleccionar la instrumentación, porque de esta depende la determinación del registro de datos y, por lo tanto el alcance del modelo a realizar.

Una vez se define el alcance, deben especificarse los requisitos de similitud que serán permisibles, para considerar aceptables los resultados del modelo a realizar, dichos requisitos corresponden a las propiedades mecánicas de los materiales a utilizar, dimensiones geométricas del modelo y los resultados finales de los ensayos.

Seguidamente, debe establecerse la escala del modelo, la cual debe ser determinada, tomando en cuenta factores como la capacidad de carga de los instrumentos a utilizar, el espacio que ocuparán los modelos a escala y la disponibilidad de materiales en el mercado, por lo que se recomienda considerar factores de escala en un rango de 1:3 a 1:10.

Con respecto a la selección de los materiales, se presentan recomendaciones para determinar la dosificación a utilizar, según la resistencia a la compresión requerida, así como

calibres de alambre galvanizado según la escala y número de varilla a recomendar y por último, se recomienda utilizar acrílico como material para la formaleta.

Una vez se tengan definidos los materiales, continúa la fase de planeación y fabricación del modelo, el cual deberá realizarse con detalle para garantizar el correcto uso y disposición de los materiales, para que el modelo represente adecuadamente al prototipo.

Seguidamente, se propone determinar el comportamiento teórico del modelo, el cual podrá realizarse con el software anteriormente descrito. Debe recalarse que la etapa de la determinación teórica del comportamiento del modelo puede realizarse una vez se tengan establecidas las características del prototipo.

Las dos últimas fases, corresponden a la preparación del equipo necesario para realizarle el ensayo al modelo a escala y la ejecución misma del ensayo, en donde es fundamental, contar con la instrumentación adecuada al tipo de ensayo a realizar y se debe velar porque los dispositivos se encuentren en un estado óptimo.

# Conclusiones

- El agregado fino de tajo considerado posee exceso de material fino, debido a que presentó un porcentaje pasando la malla 200 de 23,07%, además de un módulo de finura de 1,94, inferior al límite establecido por el MEIC.
- El agregado fino analizado proveniente de río posee mejores características para la elaboración de mezclas de microconcreto, debido a que su módulo de finura se encuentra dentro del rango establecido por el MEIC, además posee gravedades específicas y pesos unitarios mayores en comparación con el agregado proveniente de tajo.
- Los esfuerzos de fluencia de los alambres corrugados No 8 y 10, presentan diferencias superiores de 0,5% y 1,1%, respectivamente, con respecto al esfuerzo de fluencia especificado para un acero grado 40. No obstante, se presentan variaciones mayores en relación con los esfuerzos de rotura, en los cuales se presentaron variaciones inferiores de 12,4% y 15,2% para los alambres No.8 y 10, respectivamente, referente a un acero grado 40.
- El proceso de corrugado al alambre galvanizado provocó un decrecimiento en la elongación de 2,8% y 1,8%, en los alambres 8 y 10, respectivamente.
- Se logró obtener una resistencia a la compresión del concreto, con una diferencia de 6,1% mayor, con respecto al  $f_c$  de diseño, tomando como referencia la ecuación propuesta por (Navarro, sf).
- En relación con el requisito de similitud establecido para las propiedades mecánicas de los materiales, el cual corresponde a 5%, se obtiene un cumplimiento para los valores de esfuerzos de fluencia de los alambres galvanizados. No obstante, no se logró un cumplimiento para los valores de esfuerzo de rotura para los alambres galvanizados, ni para la resistencia a la compresión del microconcreto.
- La variación de tamaño de los cilindros causó una alteración a la resistencia a la compresión de 4,6%, siendo menor la resistencia obtenida con cilindros a escala.
- Las dimensiones de las vigas a escala reducida cumplen en su totalidad con el requisito de similitud establecido, debido a que la diferencia máxima fue de 2,02%, siendo 5% la tolerancia permisible.
- Con respecto al requisito de similitud establecido para los resultados de los ensayos de flexión, el cual corresponde a 10%, se logró un cumplimiento en relación con la carga última soportada por las vigas, la cual tuvo una diferencia promedio de 1,6%. No obstante, se tuvo un incumplimiento de 0,5% con respecto al desplazamiento experimental.
- No fue posible analizar el comportamiento completo de momento-curvatura de las vigas a escala reducida, debido a que las galgas extensométricas utilizadas solo registran datos en el rango elástico y por causa de fallas presentadas en estos dispositivos a la hora de registrar datos.
- Mediante el documento "Guía para elaborar modelos a escala reducida de concreto reforzado" es posible seguir un correcto procedimiento para elaborar modelos a escala de estructuras de

concreto reforzado, tales como: losas,  
columnas o vigas.

# Recomendaciones

- Utilizar agregados finos que cumplan en su totalidad con los límites granulométricos, para evitar que incumplimientos en los límites, generen desviaciones en la resistencia de diseño.
- Estudiar el comportamiento de la resistencia a la compresión de microconcreto para diferentes tipos de agregado fino, con el objetivo de poseer más parámetros a considerar para establecer la dosificación a utilizar.
- Adquirir la instrumentación necesaria para determinar el módulo de elasticidad de los alambres galvanizados, debido a la relevancia que toma este parámetro a la hora de determinar el comportamiento teórico de las vigas en estudio.
- Estudiar los efectos que se producen en las propiedades mecánicas del alambre galvanizado cuando se realiza un proceso de corrugado.
- Con el fin de determinar las variaciones de resistencia que se pueden generar en modelos a escala debido a la reducción de las secciones, se recomienda estudiar la variación de resistencia a la compresión que produce el cambio de tamaño en los cilindros.
- Utilizar instrumentos adecuados para la obtención de los datos requeridos de los ensayos a flexión, tales como galgas que permitan el registro de datos en el rango inelástico.
- Para futuras investigaciones, se recomienda estudiar el proceso de modelado de elementos de concreto reforzado como columnas y losas, así como condiciones de pretensado y postensado.

# Apéndices

## Apéndice 1: Caracterización de agregados finos

### 1. Lavado en la malla #200

#### 1.1 Agregado fino de tajo

Masa antes del lavado (g)	Masa después del lavado (g)	Material pasando malla #200 por lavado (g)
323,34	248,76	74,58

#### 1.2 Agregado fino de río

Masa antes del lavado (g)	Masa después del lavado (g)	Material pasando malla #200 por lavado (g)
313,59	294,30	19,29

### 2. Granulometría

#### 2.1 Agregado fino de tajo

Abertura (mm)	Tamiz	Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasando (%)	Límite inferior	Límite superior
9.5	No. 3/8	0	0.00	0.00	100.00	100	100
4.75	No. 4	0	0.00	0.00	100.00	95	100
2.37	No. 8	26.92	8.34	8.34	91.66	80	100
1.18	No. 16	46.21	14.31	22.65	77.35	50	85
0.6	No. 30	53.35	16.52	39.17	60.83	25	60
0.3	No. 50	53.96	16.71	55.89	44.11	10	30
0.15	No. 100	39.4	12.20	68.09	31.91	2	10
0.075	No. 200	25.95	8.04	76.13	23.87	0	4
-	Charola	77.08	23.87	100.00	-		
	Suma	322.87	100.00				

**Nota:** El porcentaje pasando el tamiz No.200 corresponde a la suma del material lavado por la malla No.200 y el retenido en la charola.

## 2.2 Agregado fino de río

Abertura (mm)	Tamiz	Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasando (%)	Límite inferior	Límite superior
9.5	No. 3/8	0	0.00	0.00	100.00	100	100
4.75	No. 4	0	0.00	0.00	100.00	95	100
2.37	No. 8	49.98	15.95	15.95	84.05	80	100
1.18	No. 16	69.48	22.18	38.13	61.87	50	85
0.6	No. 30	70.47	22.49	60.63	39.37	25	60
0.3	No. 50	54.54	17.41	78.04	21.96	10	30
0.15	No. 100	33.11	10.57	88.60	11.40	2	10
0.075	No. 200	15.72	5.02	93.62	6.38	0	4
-	Charola	19.98	6.38	100.00	-		
	Suma	313.28	100.00				

**Nota:** El porcentaje pasando el tamiz No.200 corresponde a la suma del material lavado por la malla No.200 y el retenido en la charola.

## 3. Gravedad específica

### 3.1 Agregado fino de tajo

Masa (g)	Parámetro
466.85	A= masa de la muestra al horno
671.1	B=picnómetro con agua hasta aforo
500.25	S= masa de la muestra SSS
963.5	C= masa de la muestra, picnómetro y agua

Cálculo	Valor obtenido
$G_{bs} = \frac{A}{B + S - C}$	2,2
$G_{sss} = \frac{S}{B + S - C}$	2,4
$G_s = \frac{A}{B + A - C}$	2,7
$\%Abs = \frac{S - A}{A}$	7,15%

### 3.2 Agregado fino de río

Masa (g)	Parámetro
474.69	A= masa de la muestra al horno
671.1	B=picnómetro con agua hasta aforo
500.42	S= masa de la muestra SSS
975.8	C= masa de la muestra, picnómetro y agua

Cálculo	Valor obtenido
$G_{bs} = \frac{A}{B + S - C}$	2,4
$G_{sss} = \frac{S}{B + S - C}$	2,6
$G_s = \frac{A}{B + A - C}$	2,8
$\%Abs = \frac{S - A}{A}$	5,42%

## 4. Pesos Unitarios

### 4.1 Agregado fino de tajo

#### 4.1.1 Suelto

Peso Unitario 1	1356.13	kg/m <sup>3</sup>
-----------------	---------	-------------------

Peso Unitario 2	1354.67	kg/ m <sup>3</sup>
-----------------	---------	--------------------

Peso Unitario Promedio	1355.40
Desviación Estándar	0.73

#### 4.1.2 Compactado

Peso Unitario 1	1594.37	kg/ m <sup>3</sup>
-----------------	---------	--------------------

Peso Unitario 2	1613.85	kg/ m <sup>3</sup>
-----------------	---------	--------------------

Peso Unitario Promedio	1604.11
Desviación Estándar	9.74
Vacíos	28.44%

#### 4.2 Agregado fino de río

Peso Unitario 1	1430.84	kg/ m <sup>3</sup>	Peso Unitario 2	1427.23	kg/ m <sup>3</sup>
-----------------	---------	--------------------	-----------------	---------	--------------------

Peso Unitario Promedio	1429.04
Desviación Estándar	1.81

Peso Unitario 1	1634.42	kg/ m <sup>3</sup>	Peso Unitario 2	1642.81	kg/ m <sup>3</sup>
-----------------	---------	--------------------	-----------------	---------	--------------------

Peso Unitario Promedio	1638.62
Desviación Estándar	4.20
Vacíos	32.30%

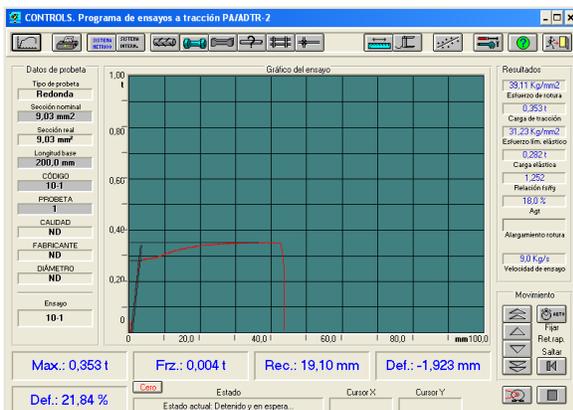
# Apéndice 2. Ensayo de tracción al alambre galvanizado

## 2.1 Caracterización de alambre galvanizado liso

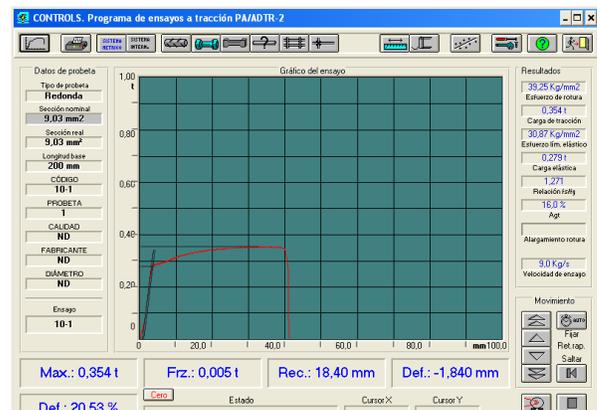
### 2.1.1 Alambre Liso No.10

Número	Diámetro (mm)	Diámetro promedio (mm)	Longitud inicial (mm)	Elongación (%)	Elongación promedio (%)
1	3.38	3.385	200	21.84	22.05
	3.39				
2	3.39	3.39	200	23.77	
	3.39				
3	3.4	3.39	200	20.53	
	3.38				

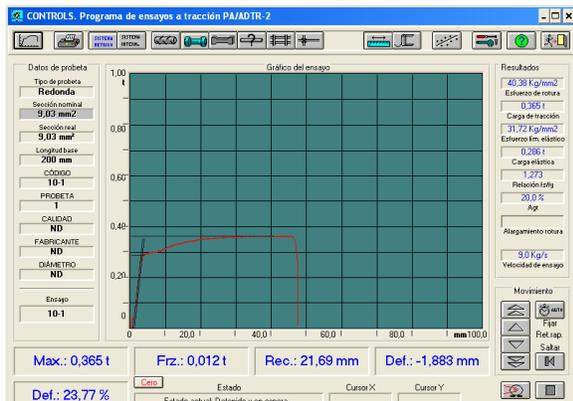
Número	Área (cm2)	Fuerza de fluencia(kg)	Fuerza fluencia promedio (kg)	fy (kg/cm2)	Fuerza de rotura (kg)	Fuerza de rotura promedio (kg)	fu (kg/cm2)
1	0.09	282	282	3137	353	357	3971
2	0.09	286					
3	0.09	279					



Ensayo de tracción Probeta 1, alambre galvanizado lisoNo.10



Ensayo de tracción Probeta 3, alambre galvanizado lisoNo.10

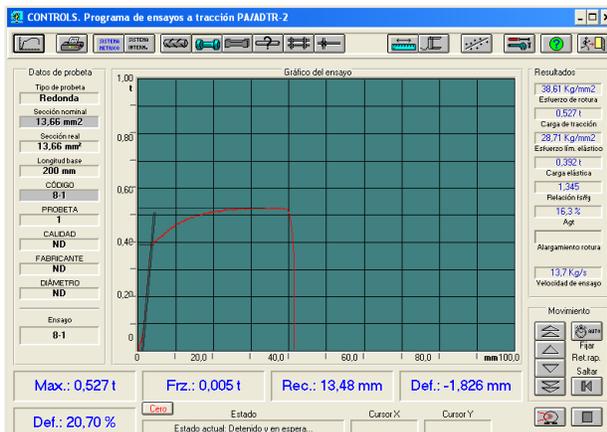


Ensayo de tracción Probeta 2, alambre galvanizado lisoNo.10

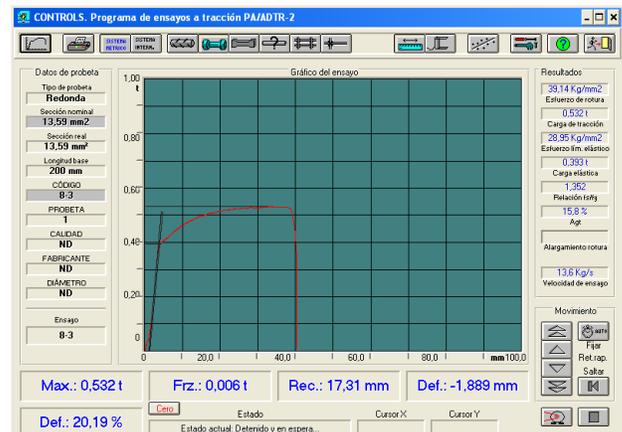
## 2.1.2 Alambre Liso No.8

Número	Diámetro (mm)	Diámetro promedio (mm)	Longitud inicial (mm)	Elongación (%)	Elongación promedio (%)
1	4.16	4.165	200	20.7	20.33
	4.17				
2	4.15	4.155	200	20.1	
	4.16				
3	4.16	4.16	200	20.19	
	4.16				

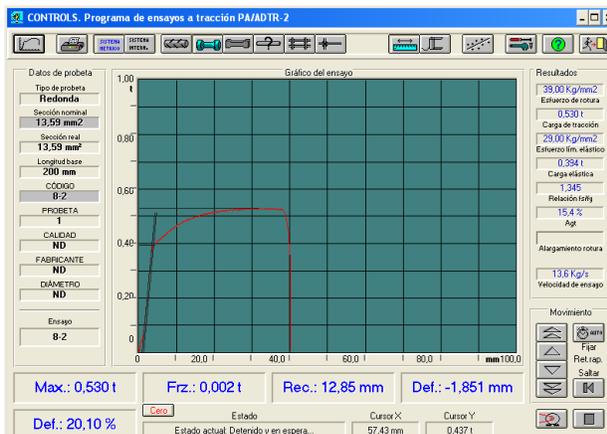
Número	Área (cm <sup>2</sup> )	Fuerza de fluencia (kg)	Fuerza fluencia promedio (kg)	fy (kg/cm <sup>2</sup> )	Fuerza de rotura (kg)	Fuerza de rotura promedio (kg)	fu (kg/cm <sup>2</sup> )
1	0.14	392	393	2885	527	530	3888
2	0.14	394					
3	0.14	393					



Ensayo de tracción Probeta 1, alambre galvanizado liso No.8



Ensayo de tracción Probeta 3, alambre galvanizado liso No.8



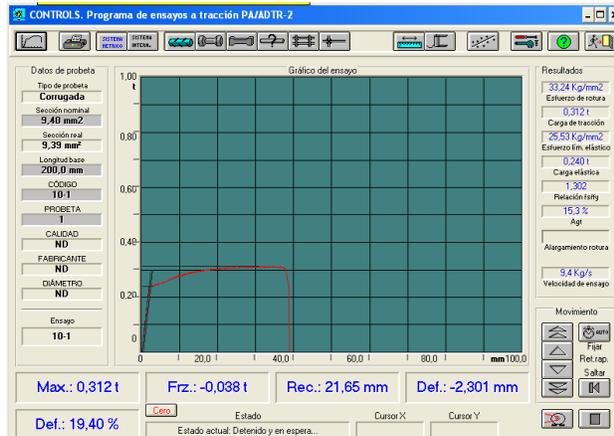
Ensayo de tracción Probeta 2, alambre galvanizado liso No.8

## 2.1 Caracterización de alambre galvanizado corrugado

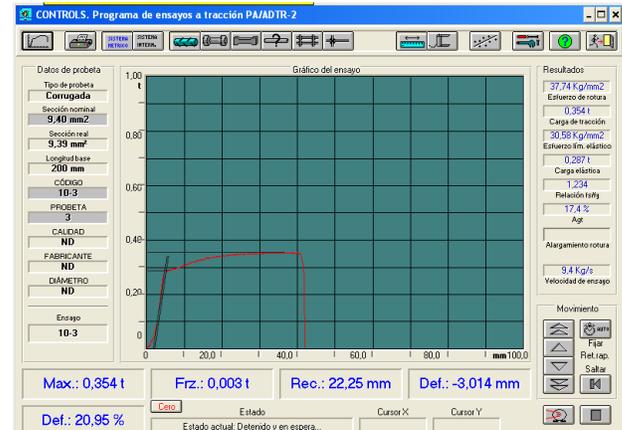
### 2.1.1 Alambre Corrugado No.10

Número	Diámetro (mm)	Diámetro promedio (mm)	Longitud inicial (mm)	Elongación (%)	Elongación promedio (%)
1	3.44	3.46	200	19.4	20.29
	3.47				
2	3.45	3.44	200	20.51	
	3.43				
3	3.42	3.46	200	20.95	
	3.49				

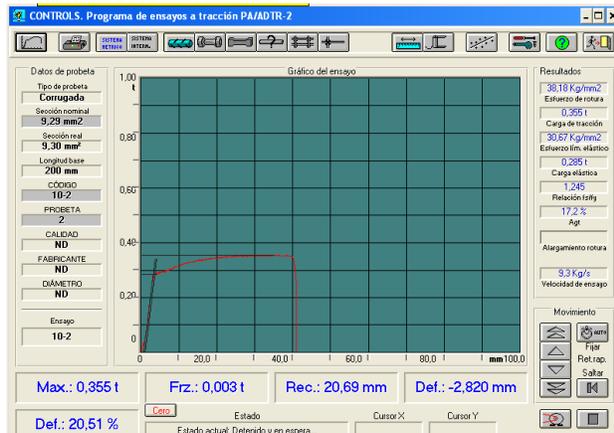
Número	Área (cm <sup>2</sup> )	Fuerza de fluencia (kg)	Fuerza fluencia promedio (kg)	fy (kg/cm <sup>2</sup> )	Fuerza de rotura (kg)	Fuerza de rotura promedio (kg)	fu (kg/cm <sup>2</sup> )
1	0.09	240	271	2887	312	340	3630
2	0.09	285					
3	0.09	287					



Ensayo de tracción Probeta 1, alambre galvanizado corrugado No.10



Ensayo de tracción Probeta 3, alambre galvanizado corrugado No.10

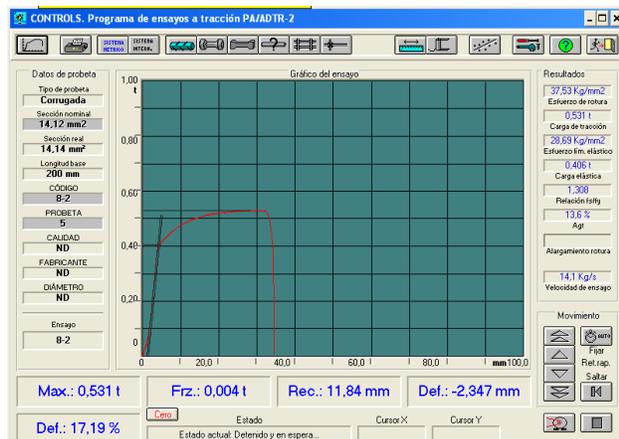
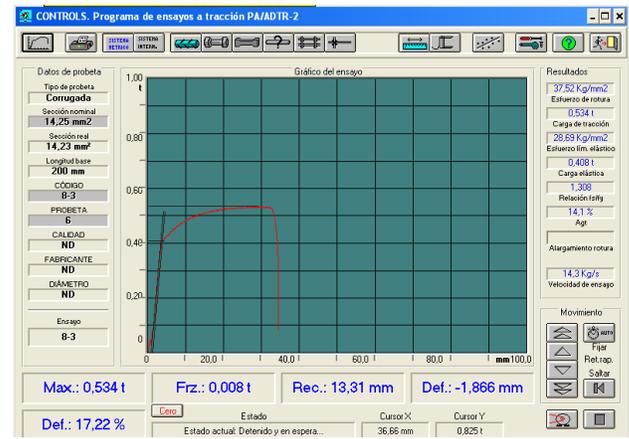
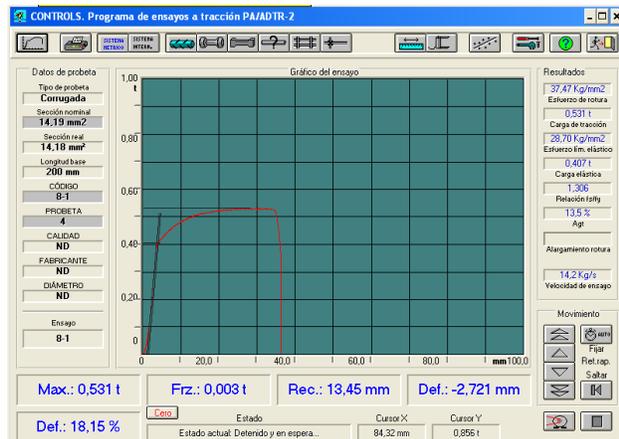


Ensayo de tracción Probeta 2, alambre galvanizado corrugado No.10

## 2.1.2 Alambre Corrugado No.8

Número	Diámetro (mm)	Diámetro promedio (mm)	Longitud inicial (mm)	Elongación (%)	Elongación promedio (%)
1	4.23	4.25	200	18.15	17.52
	4.27				
2	4.23	4.24	200	17.19	
	4.25				
3	4.23	4.26	200	17.22	
	4.28				

Número	Área (cm <sup>2</sup> )	Fuerza de fluencia(kg)	Fuerza fluencia promedio (kg)	fy (kg/cm <sup>2</sup> )	Fuerza de rotura (kg)	Fuerza de rotura promedio (kg)	fu (kg/cm <sup>2</sup> )
1	0.14	407	407	2869	531	532	3750
2	0.14	406					
3	0.14	408					



## Apéndice 3. Dimensiones y resistencias de cilindros

Falla Cilindros a escala a 7 días							
Especímen	Diámetro (mm)	Diámetro promedio (mm)	Altura (mm)	Diámetro promedio (mm)	Esfuerzo		
					KN	Mpa	kg/cm2
CB7-1	54.53	55.0	113.67	113.5	67.9	28.47	287.75
	55.47		113.24				
CB7-2	54.08	54.8	110.53	110.5	74.9	31.41	317.47
	55.56		110.43				
CB7-3	54.84	55.2	110.93	110.9	68.4	28.58	288.86
	55.5		110.9				

Falla Cilindros a escala a 28 días							
Especímen	Diámetro (mm)	Diámetro promedio (mm)	Altura (mm)	Diámetro promedio (mm)	Esfuerzo		
					KN	Mpa	kg/cm2
CB28-1	55.14	55.1	111.34	111.5	79.4	33.32	336.77
	55.1		111.75				
CB28-3	55.34	55.3	111	110.9	80.7	33.61	339.7
	55.24		110.89				
CB28-3	55.07	55.1	111.3	111.1	91.1	38.21	386.2
	55.15		110.99				

Falla Cilindros 200x100mm a 28 días							
Especímen	Diámetro (mm)	Diámetro promedio (mm)	Altura (mm)	Diámetro promedio (mm)	Esfuerzo		
					KN	Mpa	kg/cm2
CA28-1	100.1	100.2	199	199.1	274.3	34.79	351.63
	100.3		199.1				
CA28-2	100.2	100.5	199.6	199.5	300	37.82	382.25
	100.8		199.4				
CA28-3	100.3	100.3	199.8	199.7	298.7	37.8	382.05
	100.2		199.6				

## Apéndice 4. Dimensiones de las vigas a escala

Viga 1								
Altura					Ancho			
Zona	Real (mm)	Real promedio (mm)	Teórica (mm)	Diferencia (%)	Real (mm)	Real promedio (mm)	Teórica (mm)	Diferencia (%)
Apoyo 1	133.64	133.70	133.33	0.28%	68.18	68.01	66.67	2.02%
Apoyo 2	133.88				67.20			
Centro	133.57				68.65			

Longitud			
Real (mm)	Real promedio (mm)	Teórica (mm)	Diferencia (%)
1109	1110	1100	0.86%
1110			

Viga 2								
Altura					Ancho			
Zona	Real (mm)	Real promedio (mm)	Teórica (mm)	Diferencia (%)	Real (mm)	Real promedio (mm)	Teórica (mm)	Diferencia (%)
Apoyo 1	133.95	133.63	133.33	0.23%	66.73	67.56	66.67	1.34%
Apoyo 2	133.90				67.53			
Centro	133.04				68.43			

Longitud			
Real (mm)	Real promedio (mm)	Teórica (mm)	Diferencia (%)
1111	1111	1100	0.95%
1110			

Viga 3								
Altura					Ancho			
Zona	Real (mm)	Real promedio (mm)	Teórica (mm)	Diferencia (%)	Real (mm)	Real promedio (mm)	Teórica (mm)	Diferencia (%)
Apoyo 1	133.54	133.80	133.33	0.36%	67.56	68.02	66.67	2.02%
Apoyo 2	134.05				67.59			
Centro	133.82				68.90			

Longitud			
Real (mm)	Real promedio (mm)	Teórica (mm)	Diferencia (%)
1110	1110	1100	0.86%
1109			

## Apéndice 5. Memoria de cálculo del acero de refuerzo

Las dimensiones de la viga a escala real, se determinaron a partir de las disposiciones del Código Sísmico de Costa Rica, en adelante (CSCR-10) y el ACI 318-14.

Para establecer las dimensiones de la viga, se consideraron las disposiciones de la sección 8.2.1 del CSCR -2010, la cual establece que “para elementos a flexión, se recomienda un ancho mínimo de vigas de 20cm, y la razón entre el ancho y el peralte mayor o igual a 0.3”. Por su parte, en la sección 9.3.1.1 del ACI 318-14 se establece un peralte mínimo correspondiente a 1/16 de la luz libre de la viga (ACI,2014).

Con base en lo anterior, se establece un ancho de viga de 20 cm, además de un peralte de 40 cm, para cumplir con la relación establecida en el CSCR-10. Además, se propone una luz libre de 3 metros, a partir de la cual, se cumple con el peralte mínimo establecido por el ACI 318-14. Además, se considerarán recubrimientos de 3 centímetros y 10 cm adicionales en cada extremo de la luz, para garantizar la condición simplemente apoyada. Dichas dimensiones se muestran en la Figura 2.

Para definir el acero longitudinal de refuerzo, se deberá considerar las dimensiones mostradas en la Figura 2, un acero Grado 40 con un  $f_y$  de 2800 kg/cm<sup>2</sup> y un concreto con un  $f'_c$  de 330 kg/cm<sup>2</sup>. Además, debe considerarse el acero mínimo a colocar por flexión según la sección 9.6.1.2 del ACI-318 (ACI,2014). El cual, corresponde al valor mayor de las siguientes fórmulas:

$$A_{s_{min}} = \frac{0.80\sqrt{f'_c}}{f_y} \cdot b \cdot d = \frac{0.80\sqrt{330}}{2800} \cdot 20 \cdot 35,4 = 3,67 \text{ cm}^2$$

$$A_{s_{min}} = \frac{14}{f_y} \cdot b \cdot d = \frac{14}{2800} \cdot 20 \cdot 35,4 = 3,54 \text{ cm}^2$$

A partir de lo anterior, para la viga en consideración, el acero mínimo corresponde a 3,67 cm<sup>2</sup>. Debido a esto, se considerará como acero inferior, 3 varillas #4, las cuales poseen un área total de 3,80 cm<sup>2</sup>, además de 2 varillas #3 como refuerzo superior, con el fin de garantizar un adecuado amarre de los aros a colocar. A partir de las cantidades de materiales mencionados, se calcula el momento último alcanzado por el acero a considerar.

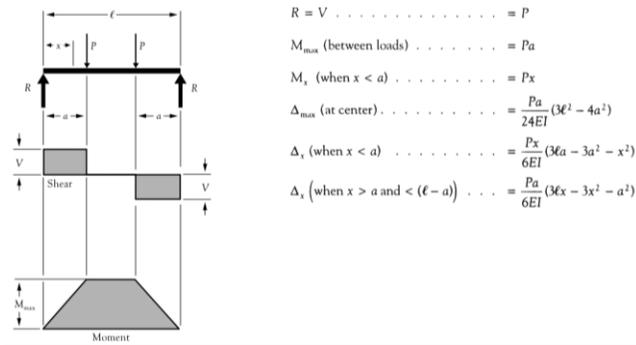
$$a = \frac{(A_s - A_s') \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} = \frac{(3,80 - 1,43) \cdot 2800}{0,85 \cdot 330 \cdot 20} = 1,19 \text{ cm}$$

$$M_n = 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right) + A_s' \cdot f_y \cdot (d - d')$$

$$M_n = 0,85 \cdot 330 \cdot 20 \cdot 1,19 \cdot \left(35,4 - \frac{1,19}{2}\right) + 1,43 \cdot 2800 \cdot (35,4 - 4,6) = 355677 \text{ kg} \cdot \text{cm} = 3,55 \text{ ton} \cdot \text{m}$$

Como no se trata de un caso de diseño, no aplica el factor de reducción, por lo que se tiene:

$$M_u = M_n = 3,55 \text{ ton} \cdot \text{m}$$



**Figura 1:** Diagramas de cortante y momento  
**Fuente:** (American Wood Council, 2005)

A partir de la Figura 1, se muestra que, en la región central entre cargas, el momento último corresponde a la multiplicación de la carga aplicada, por la distancia entre la carga y el apoyo (American Wood Council, 2005). A partir de la luz de la viga a considerar (3 metros) y tomando en cuenta que las cargas se aplicaran en los tercios de la luz, se puede obtener la carga aplicada, como se muestra a continuación:

$$P = \frac{Mu}{a} = \frac{3,55 \text{ ton} \cdot \text{m}}{1 \text{ m}} = 3,55 \text{ ton}$$

Para la condición de apoyos y cargas mostrada en la Figura 1, en los tercios extremos de la viga, el cortante último posee la misma magnitud que la carga aplicada en un tercio de la luz, (American Wood Council, 2005). por lo que se tiene:

$$Vu = P = 3,55 \text{ ton}$$

Con respecto a la resistencia al cortante del concreto, de la tabla 22.5.5.1 del ACI 318-14, se establece la siguiente fórmula:

$$Vc = 0,53 \cdot \sqrt{f'c} \cdot b \cdot d = 0,53 \cdot \sqrt{330} \cdot 20 \cdot 35,4 = 6817 \text{ kg} = 6,82 \text{ toneladas}$$

Por no tratarse de un caso de diseño, no se aplica factor de reducción, por lo tanto, a partir del cortante último y la resistencia a cortante del concreto se calcula el cortante que deberá asumir el acero:

$$Vs = Vu - Vc = 3,55 - 6,82 = -3,27 \text{ ton}$$

A partir de la fórmula anterior, se evidencia como el concreto es capaz de asumir el cortante último considerado. Sin embargo, se considerarán aros con el fin de generar confinamiento y garantizar una falla por flexión dúctil.

El ACI 318-14, se establece la separación máxima que puede tener el refuerzo que se utilice para resistir esfuerzos cortantes, la cual corresponde al valor menor de las siguientes expresiones:

$$Smáx = \frac{d}{2} = \frac{35,4}{2} = 17,7 \text{ cm}$$

$$Smáx = 60 \text{ cm}$$

A partir de las ecuaciones anteriores, se evidencia como la separación máxima que podrán tener los aros, corresponde a 17,7 cm. No obstante, se establece una separación de aros de 15 cm.

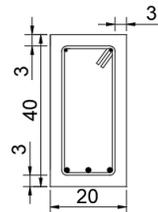
A partir de la Tabla 9.6.3.3 del ACI-318 ACI (2014), se establece que el acero necesario por cortante a colocar corresponde al máximo de las siguientes ecuaciones:

$$A_{v_{min}} = 0,2\sqrt{f'c} \frac{b \cdot S}{f_{yt}} = 0,2\sqrt{330} \frac{20 \cdot 15}{2800} = 0,39 \text{ cm}^2$$

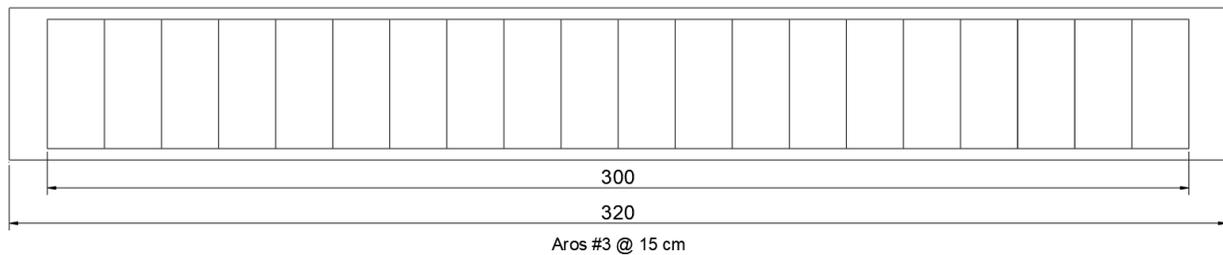
$$A_{v_{min}} = 3,5 \frac{b \cdot S}{f_{yt}} = 3,5 \cdot \frac{20 \cdot 15}{2800} = 0,38 \text{ cm}^2$$

Por lo que el área mínima correspondería a 0,38 cm<sup>2</sup>, lo cual se cumple al considerar aros con varilla #3 debido a que se tiene un área de 1,43 cm<sup>2</sup>.

Según el CSCR-10, todo acero utilizado para tomar esfuerzos cortantes debe terminar en esquina de 135° y una longitud recta del mayor resultante de 6 veces el diámetro o 10 cm, por lo tanto, al utilizar varillas #3 para los aros, esta longitud recta deberá ser de al menos 10 cm.



Acero superior: 2 #3  
Acero inferior: 3#4



**Figura 2:** Detalle de viga a escala real (acotación centímetros)

# Apéndice 6 Código de tcl para momento-curvatura en Opensees

```
#Rónald Fallas Barboza
# Instituto Tecnológico de Costa Rica
# Escuela de Ingeniería en Construcción

# Define model builder
# -----
#Se llama el archivo con las unidades definidas
source unidades.tcl

#Se define el tipo de modelo: 2 dimensiones, 3 grados de libertad
model basic -ndm 2 -ndf 3

# Definir materiales para la viga
#CONCRETO
#Se utilizó el tipo de concreto 07, Chang & Mander's 1994 Concrete Model
#Se definieron dos tipos de concreto (confinado y no confinado)

#          tag      fc          ec          Ec          ft
et  xp  xn  r
# Concreto confinado
uniaxialMaterial Concrete07 1 [expr -402*$kgcm2] -0.142 [expr 317189*$kgcm2] [expr
10*$kgcm2] 0.0002 2.0 30 1

# Concreto no confinado
uniaxialMaterial Concrete07 2 [expr -357*$kgcm2] -0.0869 [expr 317189*$kgcm2] [expr
10*$kgcm2] 0.0002 2.0 2.3 1

# ACERO DE REFUERZO

set fy4 [expr 2869*$kgcm2]; # Esfuerzo de fluencia (alambre No.8)
set fy3 [expr 2887*$kgcm2]; # Esfuerzo de fluencia (alambre No.10)
set E [expr 2000000*$kgcm2]; # Módulo de Elasticidad

#Se utilizó el tipo de acero 02, Giuffrè-menegotto-Pinto Model with Isotropic Strain
Hardening
#Se definieron dos tipos de concreto (según tipo de varilla)

#          tag  fy  E    b    R0  $CR1  $CR2    a1
a2          a3          a4  siglnit
uniaxialMaterial Steel02 3  $fy4 $E  0.01  15.0  0.925  0.15  [expr $fy4/$E]
1.0 [expr $fy4/$E] 1.0 0.0

#          tag  fy  E    b    R0  $CR1  $CR2    a1
a2          a3          a4  siglnit
uniaxialMaterial Steel02 4  $fy3 $E  0.01  15.0  0.925  0.15  [expr $fy3/$E]
1.0 [expr $fy3/$E] 1.0 0.0
```

```

# Definir sección de la viga
# -----

set colWidth [expr 20*$cm]; #ancho de la viga
set colDepth [expr 40*$cm]; #peralte de la viga

set cover [expr 3*$cm]; #recubrimiento
set Ast $Ab4; #área de varilla #4
set Asc $Ab3; #área de varilla #3

# Definir parámetros para establecer secciones de fibra
set y1 [expr $colDepth/2.0]
set z1 [expr $colWidth/2.0]

section Fiber 1 {

    # Crear fibras de concreto confinado
    patch rect 1 20 1 [expr $cover-$y1] [expr $cover-$z1] [expr $y1-$cover]
[expr $z1-$cover]

    # Crear fibras de concreto no confinado
    patch rect 2 20 1 [expr -$y1] [expr $z1-$cover] $y1 $z1
    patch rect 2 20 1 [expr -$y1] [expr -$z1] $y1 [expr $cover-$z1]
    patch rect 2 4 1 [expr -$y1] [expr $cover-$z1] [expr $cover-$y1] [expr $z1-
$cover]
    patch rect 2 4 1 [expr $y1-$cover] [expr $cover-$z1] $y1 [expr $z1-$cover]

    # Crear el refuerzo de acero
    layer straight 4 2 $Asc [expr $y1-$cover] [expr $z1-$cover] [expr $y1-$cover] [expr
$cover-$z1]
    layer straight 3 3 $Ast [expr $cover-$y1] [expr $z1-$cover] [expr $cover-$y1] [expr
$cover-$z1]
}

set d [expr $colDepth-$cover];# distancia desde fibra a compresión y acero en tensión
set epsy [expr $fy4/$E]; # deformación de fluencia
set Ky [expr $epsy/(0.7*$d)]; #

# Definir carga axial
set P 0

set mu 15; # Ductilidad objetivo
set numIncr 100; # Número de incrementos de análisis

# Se llama el procedimiento de sección de análisis
source MomentCurvature.tcl
MomentCurvature 1 $P [expr $Ky*$mu] $numIncr

```

## Apéndice 7 Código de tcl para el procedimiento de análisis de momento-curvatura en Opensees

```
#Rónald Fallas Barboza
# Instituto Tecnológico de Costa Rica
# Escuela de Ingeniería en Construcción

proc MomentCurvature {secTag axialLoad maxK {numIncr 100} } {

# Definir dos nodos en (0,0)
  node 1 0.0 0.0
  node 2 0.0 0.0

# Crear restricciones
  fix 1 1 1 1
  fix 2 0 1 0

# Definir elemento (elemento de longitud 0)
#           tag ndI ndJ secTag
  element zeroLengthSection 1 1 2 $secTag

# crear archivo de salida
  recorder Node -file section$secTag.out -time -node 2 -dof 3 disp

# Definir parámetros de analisis
  integrator LoadControl 0.0
  system SparseGeneral -piv; # Overkill, but may need the pivoting!
  test NormUnbalance 1.0e-9 10
  numberer Plain
  constraints Plain
  algorithm Newton
  analysis Static

# Define reference moment
  pattern Plain 2 "Linear" {
    load 2 0.0 0.0 1.0
  }

# Compute curvature increment
  set dK [expr $maxK/$numIncr]

# Use displacement control at node 2 for section analysis
  integrator DisplacementControl 2 3 $dK 1 $dK $dK

# Do the section analysis
  analyze $numIncr
}
```

# Apéndice 8 Código de tcl para fuerza-desplazamiento en Opensees

```
#Rónald Fallas Barboza
# Instituto Tecnológico de Costa Rica
# Escuela de Ingeniería en Construcción
```

```
wipe
```

```
source unidades.tcl
```

```
#Se define el tipo de modelo: 2 dimensiones, 3 grados de libertad
model basic -ndm 2 -ndf 3
```

```
# Definir materiales para la viga
```

```
#CONCRETO
```

```
#Se utilizó el tipo de concreto 07, Chang & Mander's 1994 Concrete Model
```

```
#Se definieron dos tipos de concreto (confinado y no confinado)
```

```
#          tag      fc          ec          Ec          ft
et  xp  xn  r
# Core concrete (confined)
uniaxialMaterial Concrete07 1 [expr -402*$kgcm2] -0.142 [expr 317189*$kgcm2]
[expr 10*$kgcm2] 0.0002 2.0 30 1
```

```
# Cover concrete (unconfined)
```

```
uniaxialMaterial Concrete07 2 [expr -357*$kgcm2] -0.0869 [expr 317189*$kgcm2]
[expr 10*$kgcm2] 0.0002 2.0 2.3 1
```

```
# ACERO DE REFUERZO
```

```
set fy4 [expr 3750*$kgcm2]; # Esfuerzo de rotura (alambre No.8)
```

```
set fy3 [expr 3630*$kgcm2]; # Esfuerzo de rotura (alambre No.10)
```

```
set E [expr 200000*$kgcm2]; # Módulo de Elasticidad
```

```
#Se utilizó el tipo de acero 02, Giuffrè-menegotto-Pinto Model with Isotropic Strain Hardening
```

```
#Se definieron dos tipos de concreto (según tipo de varilla)
```

```
#          tag  fy  E  b  R0  $CR1  $CR2  a1
a2          a3          a4  siglnit
uniaxialMaterial Steel02 3 $fy4 $E 0.01 15.0 0.925 0.15 [expr $fy4/$E]
1.0 [expr $fy4/$E] 1.0 0.0
```

```
#          tag  fy  E  b  R0  $CR1  $CR2  a1
a2          a3          a4  siglnit
uniaxialMaterial Steel02 4 $fy3 $E 0.01 15.0 0.925 0.15 [expr $fy3/$E]
1.0 [expr $fy3/$E] 1.0 0.0
```

```
# Definir sección de la viga
```

```

# -----

set colWidth [expr 20*$cm]; #ancho de la viga
set colDepth [expr 40*$cm]; #peralte de la viga

set cover [expr 3*$cm]; #recubrimiento
set Ast $Ab4; #área de varilla #4
set Asc $Ab3; #área de varilla #3

# Definir parámetros para establecer secciones de fibra
set y1 [expr $colDepth/2.0]
set z1 [expr $colWidth/2.0]

section Fiber 1 {

    # Crear fibras de concreto confinado
    patch rect 1 20 1 [expr $cover-$y1] [expr $cover-$z1] [expr $y1-$cover] [expr
    $z1-$cover]

    # Crear fibras de concreto no confinado
    patch rect 2 20 1 [expr -$y1] [expr $z1-$cover] $y1 $z1
    patch rect 2 20 1 [expr -$y1] [expr -$z1] $y1 [expr $cover-$z1]
    patch rect 2 4 1 [expr -$y1] [expr $cover-$z1] [expr $cover-$y1] [expr $z1-
    $cover]
    patch rect 2 4 1 [expr $y1-$cover] [expr $cover-$z1] $y1 [expr $z1-$cover]

    # Crear el refuerzo de acero
    layer straight 4 2 $Asc [expr $y1-$cover] [expr $z1-$cover] [expr $y1-$cover] [expr
    $cover-$z1]
    layer straight 3 3 $Ast [expr $cover-$y1] [expr $z1-$cover] [expr $cover-$y1] [expr
    $cover-$z1]
}

#Crear nodos
#Apoyos
node 1 0.0 0.0
node 2 300.0 0.0
#Zonas de carga
node 3 100.0 0.0
node 4 200.0 0.0
#Zonas central
node 5 150.0 0.0

#Se restringen los apoyos (simplemente apoyado)
# tag DX DY RZ
fix 1 0 1 0
fix 2 1 1 0

# Definir elemento
#Se deben crear varias secciones entre los nodos definidos
set Linear 1

```

```

geomTransf Linear $Linear
#
tag ndI ndJ numIntgrPts secTag transfTag
element forceBeamColumn 1 1 3 3 1 $Linear
element forceBeamColumn 2 3 5 3 1 $Linear
element forceBeamColumn 3 5 4 3 1 $Linear
element forceBeamColumn 4 4 2 3 1 $Linear

```

#Se define la carga a aplicar, se define 0,5 debido a que la carga se aplicará en 2 zonas de la viga y se desea conocer la suma de ambas

```
set P 0.5;
```

#Se aplican las cargas en los tercios

```

pattern Plain 1 "Linear" {
#carga nodo FX FY MZ
load 3 0.0 -$P 0.0;
load 4 0.0 -$P 0.0;
}

```

#Se crean los recorders que generarán los archivos de salida

#El primer recorder corresponde al registro del desplazamiento

```
recorder Node -file displacements.txt -time -node 5 -dof 2 disp
```

#El segundo recorder corresponde a las reacciones, con el fin de verificar la aplicación de cargas

```
recorder Node -file reactions.txt -time -node 1 2 -dof 2 reaction
```

# La siguiente sección corresponde a una adaptación del código al presente caso, de un análisis pushover estático, desarrollado por Silvia Mazzoni & Frank McKenna, 2006

# características del análisis pushover

```

set Tol 0.0001; #tolerancia
set Dmax -7.5 ; #máximo desplazamiento permitido
set Dincr -0.1; #incremento de desplazamiento
set IDctrlNode 5; #nodo donde se registrará el desplazamiento
set IDctrlDOF 2; #grado de libertad donde se registrará el desplazamiento

```

#Realizar el análisis pushover

```
source LibAnalysisStaticParameters.tcl; # constraintsHandler,DOFnumberer,system-
ofequations,convergenceTest,solutionAlgorithm,integrator
```

```
set fmt1 "%s Pushover analysis: CtrlNode %.3i, dof %.1i, Disp=%.4f %s"; # formato para
el archivo de salida
```

```
# -----first analyze command-----
-----
```

```

set Nsteps [expr int($Dmax/$Dincr)]; # número de pasos
set ok [analyze $Nsteps]; # retornará cero si no se encuentran
problemas de convergencia

```

```

# -----si falla la convergencia-----
-----
if {$ok != 0} {
  set Dstep 0.0;
  set ok 0
  while {$Dstep <= 1.0 && $ok == 0} {
    set controlDisp [nodeDisp $IDctrlNode $IDctrlDOF ]
    set Dstep [expr $controlDisp/$Dmax]
    set ok [analyze 1];          # retornará cero si no se encuentran
problemas de convergencia
    if {$ok != 0} {};          # reduce el tamaño del paso si aún falla la
convergencia
    set Nk 4;          # reduce el tamaño del paso
    set DincrReduced [expr $Dincr/$Nk];
    integrator DisplacementControl $IDctrlNode $IDctrlDOF $DincrReduced
    for {set ik 1} {$ik <=$Nk} {incr ik 1} {
      set ok [analyze 1];          # retornará cero si no se
encuentran problemas de convergencia
      if {$ok != 0} {
        # si el análisis falla, se probará con otro procedimiento
        puts "Trying Newton with Initial Tangent .."
        test NormDispIncr $Tol 2000 0
        algorithm Newton -initial
        set ok [analyze 1]
        test $testTypeStatic $TolStatic $maxNumIterStatic 0
        algorithm $algorithmTypeStatic
      }
      if {$ok != 0} {
        puts "Trying Broyden .."
        algorithm Broyden 8
        set ok [analyze 1 ]
        algorithm $algorithmTypeStatic
      }
      if {$ok != 0} {
        puts "Trying NewtonWithLineSearch .."
        algorithm NewtonLineSearch 0.8
        set ok [analyze 1]
        algorithm $algorithmTypeStatic
      }
      if {$ok != 0} {};          # se detiene si aún falla al converger
        puts [format $fmt1 "PROBLEM" $IDctrlNode $IDctrlDOF [nodeDisp
$IDctrlNode $IDctrlDOF] $LunitTXT]
        return -1
      }
    }
    integrator DisplacementControl $IDctrlNode $IDctrlDOF $Dincr; # bring
back to original increment
  }
}
}
}

```

```
# -----  
-----  
  
if { $ok != 0 } {  
    puts [format $fmt1 "PROBLEM" $IDctrlNode $IDctrlDOF [nodeDisp $IDctrlNode  
$IDctrlDOF] $LunitTXT]  
} else {  
    puts [format $fmt1 "DONE" $IDctrlNode $IDctrlDOF [nodeDisp $IDctrlNode $IDctrlDOF]  
$LunitTXT]  
}  
  
wipe
```

## **Apéndice 9 Guía para elaborar modelos a escala reducida de concreto reforzado.**

# **Guía para elaborar modelos a escala reducida de concreto reforzado**

**RÓNALD FALLAS BARBOZA**

# Índice

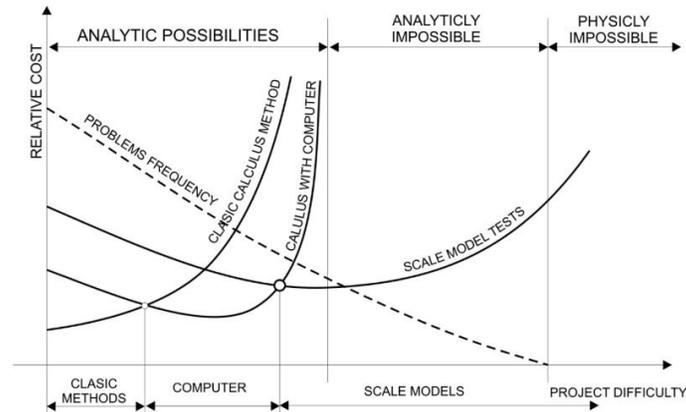
<b>1. Aspectos Generales</b> .....	3
<b>1.1 Introducción</b> .....	3
<b>1.2 Alcance</b> .....	3
<b>1.3 Objetivo</b> .....	3
<b>2. Modelos estructurales</b> .....	4
<b>2.1 Definición</b> .....	4
<b>2.2 Clasificación</b> .....	4
<b>2.3 Análisis dimensional</b> .....	5
<b>2.3.1 Teorema Pi de Buckingham's</b> .....	5
<b>2.4 Similitud</b> .....	6
<b>2.5 Factores de escala</b> .....	8
<b>3. Procedimiento para escalar elementos de concreto reforzado</b> .....	9
<b>3.1 Definir el alcance del proyecto</b> .....	10
<b>3.2 Seleccionar la instrumentación a utilizar</b> .....	10
<b>3.2.1 Cargas aplicadas</b> .....	10
<b>3.2.2 Deformaciones unitarias</b> .....	10
<b>3.2.3 Deflexiones</b> .....	11
<b>3.3 Especificar requisitos de similitud</b> .....	11
<b>3.4 Definir la escala del modelo</b> .....	11
<b>3.5 Seleccionar los materiales</b> .....	12
<b>3.5.1 Concreto</b> .....	12
<b>3.5.2 Acero de refuerzo</b> .....	12
<b>3.5.3 Formaleta</b> .....	14
<b>3.6 Plantear y realizar la fabricación del modelo</b> .....	15
<b>3.7 Determinar el comportamiento teórico del modelo</b> .....	16
<b>3.8 Preparar el equipo de carga</b> .....	17
<b>3.9 Observar y reportar la respuesta del modelo</b> .....	17
<b>Referencias bibliográficas</b> .....	19

# 1. Aspectos Generales

## 1.1 Introducción

Los elementos de concreto reforzado al formar parte del sistema sismorresistente de edificaciones, por lo tanto, es relevante el estudio de su comportamiento, con el fin conocer la respuesta ante las cargas aplicadas y así evitar fallas que provoquen colapsos y a su vez, pérdidas materiales y/o humanas.

El análisis de elementos de concreto reforzado se puede realizar mediante la prueba de modelos estructurales a escala reducida, los cuales se definen como “una representación física a escala de una estructura o una porción de esta” (Harris & Sabnis, 1999). A pesar del gran avance que existe actualmente en el desarrollo de programas computacionales analíticos que determinan el comportamiento de estructuras, se siguen desarrollando investigaciones relacionadas con modelos físicos a escala, en la figura 1 se presenta la interpretación de Hossdorf (1972) relacionada con el uso de modelos físicos y modelos computacionales.



**Figura 1** Interpretación de Hossdorf, H para la relación entre la dificultad del proyecto y el costo relativo

**Fuente:** (Hossdorf, 1972)

## 1.2 Alcance

La guía descrita en el presente documento abarca las definiciones generales de los modelos a escala reducida, así como aspectos de análisis dimensional y similitud para determinar los principales factores de escala aplicables a modelos a escala de concreto reforzado. Además, se propone un procedimiento que permita un correcto escalado de modelos estructurales, aplicable a elementos como vigas, columnas y losas, en condiciones de cargas previamente establecidas.

## 1.3 Objetivo

- Establecer una guía para la elaboración de modelos a escala reducida de concreto reforzado.

## 2. Modelos estructurales

### 2.1 Definición

Según (Harris & Sabnis, 1999) Los modelos estructurales son definidos como “cualquier representación física de una estructura o porción de la misma, a una escala reducida”, dicha definición fue desarrollada por el comité ACI 444. “Se realizan para entender de una manera directa situaciones que pueden presentarse en determinados momentos, para analizar comportamientos y observar características”(Valencia, 2010).

### 2.2 Clasificación

Los modelos estructurales pueden ser clasificados de diversas formas, la clasificación presente en este documento se basa en la realizada por (Harris & Sabnis, 1999), quienes clasificaron los modelos estructurales según la función para la cual son realizados los modelos y con base en los posibles resultados que se pueden obtener.

Debe recalcar que además de los presentados a continuación, también se pueden clasificar como modelos de efecto de viento, modelos dinámicos, conceptuales, de investigación, diseño, incluso térmicos, no obstante, dichas clasificaciones no se encuentran dentro del alcance del presente documento.

Tipo de Modelo	Principales características
Elásticos	<ul style="list-style-type: none"><li>• Los resultados están limitados al comportamiento lineal del modelo.</li><li>• Poseen similitud con el modelo, pero los materiales no necesariamente se asemejan a los del modelo.</li></ul>
Indirectos	<ul style="list-style-type: none"><li>• Son casos especiales de los modelos elásticos</li><li>• Utilizados para obtener líneas de influencia y acciones internas como fuerzas cortantes y axiales, además de momentos flectores.</li><li>• Las cargas aplicadas al modelo no poseen relación directa con el prototipo.</li></ul>
Directos	<ul style="list-style-type: none"><li>• Posee similitud geométrica con el prototipo.</li><li>• Las cargas aplicadas poseen relación directa con el prototipo.</li></ul>
De Resistencia	<ul style="list-style-type: none"><li>• Son modelos directos realizados con materiales similares a los del prototipo.</li><li>• Pretenden predecir el comportamiento del prototipo ante cargas establecidas.</li><li>• El principal problema es encontrar materiales y formas de fabricación adecuados.</li></ul>

**Cuadro 1:** Clasificación de modelos estructurales

**Fuente:** Harris & Sabnis, 1999

## 2.3 Análisis dimensional

“El análisis dimensional en cualquier investigación del comportamiento físico, debido a que permite combinar las variables en agrupaciones (términos  $\pi$ ) con una reducción posterior de cantidades desconocidas” (Harris & Sabnis, 1999).

### 2.3.1 Teorema Pi de Buckingham's

El teorema Pi de Buckingham establece que cualquier ecuación F dimensionalmente homogénea:

$$F(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad Ec (1)$$

Puede ser escrita como:

$$G(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n) = 0 \quad Ec (2)$$

Donde los términos pi son productos adimensionales de las n variables físicas  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . y  $m=n-r$ , donde r es el número de dimensiones fundamentales que están envueltas en las variables físicas.

En el Cuadro 2 muestra las cantidades físicas presentes en problemas estructurales y las medidas dimensionales respectivas.

	Variable	Unidades
I	Longitud	L
Q	Fuerza	F
M	Masa	FL <sup>-1</sup> T <sup>2</sup>
$\sigma$	Esfuerzo	FL <sup>-2</sup>
$\epsilon$	Deformación	-
a	Aceleración	LT <sup>-2</sup>
$\delta$	Desplazamiento	L
$\nu$	Razón de Poisson	-
E	Módulo de Elasticidad	FL <sup>-2</sup>

**Cuadro 2:** Cantidades físicas típicas

**Fuente:** Harris & Sabnis, 1999

A partir del Cuadro 2 y tomando como variables independientes Q, I y a; se definen las siguientes variables adimensionales:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{Q}{EI} & \pi_2 &= \frac{Ma}{EI^2} & \pi_3 &= \frac{\sigma}{E} & Ec (3) \\ \pi_4 &= \epsilon & \pi_5 &= \frac{\delta}{I} & \pi_6 &= \nu \end{aligned}$$

## 2.4 Similitud

Los modelos estructurales se pueden describir en tres tipos, dependiendo la similitud que posea con el prototipo.

Tipo de Modelo	Principales características
Verdaderos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Poseen similitud completa entre modelo y prototipo.</li> <li>• Los materiales del modelo presentan el comportamiento de los materiales del prototipo.</li> </ul>
Adecuados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Poseen una similitud de “primer orden”</li> </ul> <p>Si se está evaluando las deflexiones en una viga, el momento flector corresponderá a un primer orden, mientras que la fuerza axial, será de segundo orden.</p>
Distorsionados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los modelos distorsionados no satisfacen una o varias características de primer orden.</li> <li>• Las distorsiones se pueden provocar por desigualdades geométricas o diferencias en las propiedades de los materiales.</li> </ul>

**Cuadro 3:** tipos de modelos según similitud

**Fuente:** Harris & Sabnis (1999)

Harris & Sabnis (1999) afirman que la formulación matemática de cualquier fenómeno físico se puede reducir a una ecuación que involucra un conjunto completo de productos adimensionales, de la siguiente forma:

$$\pi_1 = \Phi(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n) \quad \text{Ec (4)}$$

A partir de la ecuación anterior, cuando la similitud completa se mantiene, la relación entre el modelo y el prototipo puede escribirse como:

$$\frac{\pi_{1p}}{\pi_{1m}} = \frac{\Phi(\pi_{2p}, \pi_{3p}, \dots, \pi_{np})}{\Phi(\pi_{2m}, \pi_{3m}, \dots, \pi_{nm})} = 1 \quad \text{ó} \quad \pi_{1p} = \pi_{1m} \quad \text{Ec (5)}$$

Donde el subíndice “p” se refiere al prototipo y el subíndice “m” al modelo.

A partir de la Ecuación 5, se derivan los factores de escala, para cada uno de los seis términos presentados en la Ecuación 3, mediante la siguiente expresión:

$$S_i = \frac{i_p}{i_m} \quad \text{Ec (6)}$$

Donde Si corresponde al factor de escala para el término i, el subíndice “p” corresponde al prototipo y el subíndice “m” al modelo. Al realizar el cociente de la Ecuación 6 para cada uno de los términos “Pi” presentes en la Ecuación 3, se obtienen los factores de escala aplicables para modelos estructurales, en términos de longitud, módulo de elasticidad y aceleración (l, E y a).

$$S_Q = S_l^2 S_E \quad S_\varepsilon = 1 \quad S_M = \frac{S_l^2 S_E}{S_a} \quad Ec (7)$$

$$S_\delta = S_l \quad S_\sigma = S_E \quad S_V = 1$$

## 2.5 Factores de escala

Para comparar los resultados obtenidos a partir de modelos a escala reducida, con los prototipos a escala real, es necesario aplicar factores de escala. Los cuales dependen del tipo de modelo que se esté considerando y del tipo de propiedad o respuesta que se analice. En el Cuadro 4 se presentan los factores de escala aplicables a modelos de concreto reforzado.

	Cantidad	Dimensión	Modelo Verdadero	Modelo Verdadero Práctico
Propiedades relacionadas al material	Esfuerzo del concreto, $\sigma_c$	FL <sup>-2</sup>	$S_\sigma$	1
	Deformación del concreto, $\varepsilon_c$	-	1	1
	Módulo del concreto, $E_c$	FL <sup>-2</sup>	$S_\sigma$	1
	Relación de Poisson, $\nu_c$	-	1	1
	Peso Específico, $\gamma_c$	FL <sup>-3</sup>	$S_\sigma/S_l$	$1/S_l$
	Esfuerzo del refuerzo $\sigma_r$	-	1	1
	Deformación del refuerzo $\varepsilon_r$	-	1	1
	Módulo del refuerzo $E_r$	FL <sup>-2</sup>	$S_\sigma$	1
	Esfuerzo de adherencia, $u$	FL <sup>-2</sup>	$S_\sigma$	1
Geometría	Dimensión Lineal, l	L	$S_l$	$S_l$
	Desplazamiento, $\delta$	L	$S_l$	$S_l$
	Desplazamiento angular, $\beta$	-	1	1
	Área de refuerzo, $A_r$	L <sup>2</sup>	$S_l^2$	$S_l^2$
Carga	Carga concentrada, Q	F	$S_\sigma S_l^2$	$S_l^2$
	Carga distribuida, w	FL <sup>-1</sup>	$S_\sigma S_l$	$S_l$
	Presión, q	FL <sup>-2</sup>	$S_\sigma$	1
	Momento, M	FL	$S_\sigma S_l^3$	$S_l^3$

**Cuadro 4:** Factores de escala para modelos de concreto reforzado

**Fuente:** Harris & Sabnis (1999)

### 3. Procedimiento para escalar elementos de concreto reforzado

El procedimiento presentado, se basa en la recomendación de Harris & Sabnis (1999) y puede ser aplicado a elementos de concreto reforzado como vigas, columnas y losas. Se debe destacar que, aunque se muestra una secuencia lógica para realizar un modelo estructural a escala, ciertos pasos pueden realizarse en un orden diferente, como lo puede ser determinar el comportamiento teórico del modelo, debido a que dicho paso puede ser realizado al inicio del proyecto, o bien, al final de este. Seguidamente, se presentan los pasos. En la figura 2, se muestra el procedimiento recomendado para realizar modelos a escala reducida.

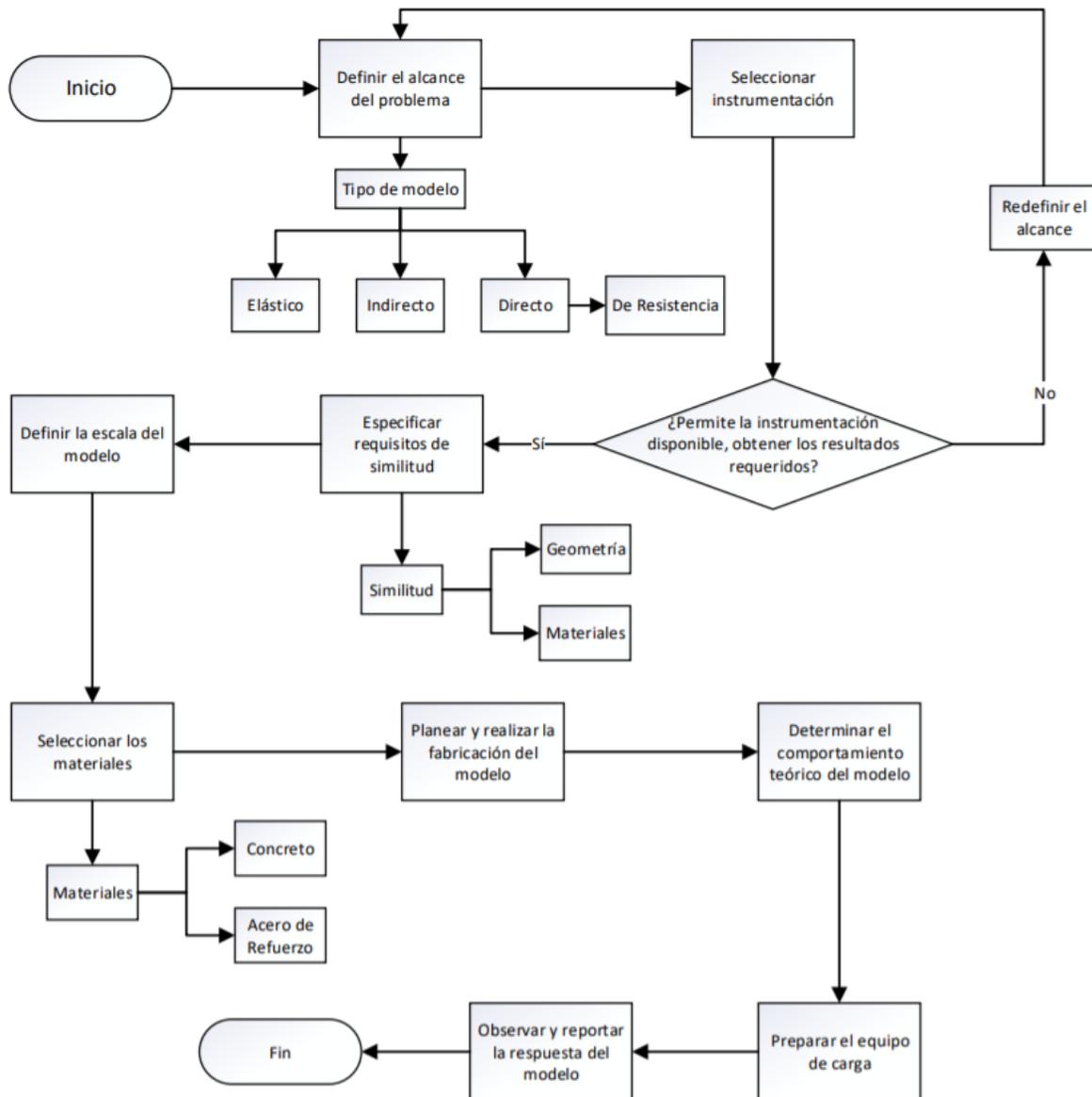


Figura 2: Procedimiento para realizar modelos a escala reducida de concreto reforzado

### **3.1 Definir el alcance del proyecto**

El primer paso para desarrollar un modelo a escala reducida es determinar las características del modelo prototipo que se pretende estudiar, estableciendo las dimensiones geométricas, materiales y la forma en la que serán aplicadas las fuerzas al elemento. Dicho prototipo deberá ser determinado a partir de un diseño adecuado, según el tipo de elemento que se desee estudiar.

Una vez establecido el prototipo, se debe conocer qué se deseará estudiar con la realización del modelo, si se desean obtener acciones internas como fuerzas axiales, de cortante o momento. Si se requiere analizar únicamente el comportamiento elástico del material, o si se desea analizar el comportamiento una vez alcanzado el rango inelástico, como recomendación, en el cuadro 1, se presenta la clasificación de los elementos de acuerdo con el tipo de análisis a realizar.

Para lograr el alcance determinado, se debe considerar la instrumentación disponible para realizar las pruebas al modelo. Debido a que la carencia de equipo o limitaciones de capacidad de estos puede restringir la obtención de datos de los experimentos a realizar.

### **3.2 Seleccionar la instrumentación a utilizar**

Como se mencionó en el paso anterior, para la determinación del alcance es fundamental conocer la instrumentación disponible para realizar las pruebas requeridas, debido a que los experimentos pueden limitarse, debido a la falta de instrumentos para realizar las pruebas o tomar los datos necesarios.

A continuación, se presentan las principales medidas realizadas en modelos a escala de concreto reforzado:

#### **3.2.1 Cargas aplicadas**

Las cargas aplicadas a los modelos estructurales son aplicadas mediante pistones de carga, los cuales registran en el transcurso del ensayo, la carga aplicada. Es indispensable conocer con anterioridad, la resistencia aproximada de los modelos a ensayar, debido a que los equipos de carga poseen una capacidad establecida y esta puede limitar el ensayo en estudio.

#### **3.2.2 Deformaciones unitarias**

Kaklauskas et al.(2019) mencionan que la medición precisa de la distribución de las deformaciones se ha hecho posible con el desarrollo de galgas extensiométricas. Por su parte, Tutak (2015) define las galgas extensométricas como un sensor que posee una rejilla conductora que cambia su resistencia eléctrica cuando se deforma, la galga extensométrica produce como salida, un cambio de resistencia que se correlaciona con la deformación producida al elemento.

### 3.2.3 Deflexiones

La medida de las deflexiones en ensayos a modelos estructurales es realizada con sensores de desplazamiento, los cuales, son conectados a un elemento fijo en el modelo a analizar, porque a partir de la elongación producida, se establece la deflexión asociada.

## 3.3 Especificar requisitos de similitud

Una vez definido el alcance que tendrá el modelo que se pretende construir, se deben establecer los requisitos de similitud del modelo en cuanto a materiales, dimensiones geométricas y resistencia mecánica del mismo.

Con respecto a los materiales, es de suma importancia que estos presenten características mecánicas similares a los considerados en el modelo prototipo. De no ser así, se producirán resultados diferentes a los previstos. Vides (2006) menciona que cuando se considera el comportamiento de las estructuras cerca al colapso, la resistencia a compresión y tensión, la ductilidad y los posibles cambios en las constantes elásticas se vuelven significativos”, por lo que se recomienda utilizar materiales con propiedades mecánicas con una tolerancia de 5%.

En cuanto a las dimensiones geométricas, se debe procurar que estas sean, en la medida de lo posible, lo más exactas, Harris & Sabnis (1999) mencionan que para mantener aproximadamente el mismo grado de precisión del modelo con respecto al prototipo, se recomienda una tolerancia de 5%.

Por último, en relación con la similitud en los resultados obtenidos en el modelo, “la experiencia hasta el momento en modelos a escala reducida, indica que los modelos directos de resistencia pueden predecir el modo de falla y la carga última de una estructura dentro de una tolerancia aceptable cercana a 10%”(Harris & Sabnis,1999).

## 3.4 Definir la escala del modelo

La escala del modelo a realizar es de suma importancia, debido a que a partir de esta escala, se determinará el tamaño del modelo, Lirola et al (2017) mencionan que los modelos a gran escala tienen desventajas debido al espacio que ocuparán y desde el punto de vista económico. Además, los modelos con escalas grandes pueden presentar problemas a la hora de realizar las fallas correspondientes, debido a que el equipo de carga no tiene la capacidad requerida. Por otro lado, si el modelo es muy reducido, podrían presentarse problemas constructivos, como lo menciona Vides (2006).

Además, en ocasiones, los materiales disponibles limitan la determinación de la escala, debido a que se debe garantizar que el acero de refuerzo considerado en el prototipo pueda ser representado de una forma exacta o aproximada en el modelo.

En relación con lo mencionado anteriormente, la elección del factor de escala no se debe tomar a la ligera y se deben considerar los aspectos descritos. Como recomendación de factores de escala prácticos para modelos de concreto reforzado, se tomará la recomendación de Harris & Sabnis (1999) para vigas y losas, para las que recomiendan unos factores de escala en un rango de  $1/10$  a  $1/4$ . No obstante, en estudios sobre modelos de resistencia de concreto reforzado, se ha considerado como factor de escala

$1/3$ , como lo son las tesis realizadas por Vides (2006) y por Valencia (2010). Por lo que finalmente, para modelos de resistencia de concreto reforzado, se recomienda tomar en cuenta que el factor de escala considerado se encuentre entre  $1/3$  a  $1/10$ .

### 3.5 Seleccionar los materiales

La selección de los materiales a utilizar en los modelos de concreto reforzado, tienen influencia directa en los resultados a obtener. Debido a que las características de estos materiales influyen directamente en el comportamiento del modelo.

A continuación, se presenta información a considerar para la selección de los materiales para la realización de modelos a escala de concreto reforzado.

#### 3.5.1 Concreto

Debido a la reducción de las secciones que provocan los modelos a escala, el concreto deberá representarse mediante microconcreto, el cual González (2010) define como un mortero estructural constituido por cemento, agua y arena. En el caso del microconcreto, el tamaño máximo del agregado es controlado y presenta alta resistencia a compresión y flexión.

Como referencia para la dosificación de microconcreto, se puede tomar como referencia el trabajo realizado por (Valverde, 2018), quien modeló cilindros a escala 1:3 de microconcreto, variando porcentajes de agregado (%AG) y la relación Agua/Cemento (A/C).

La información presentada en el Cuadro 5, corresponde a dosificaciones para realizar modelos a escala reducida, por lo que difieren a las dosificaciones utilizadas comúnmente en la industria, debido, principalmente, al alto contenido de cemento, en el Cuadro 5 se presentan las dosificaciones recomendadas para modelos a escala reducida.

<b>%AG</b>	<b>20%</b>	<b>30%</b>	<b>40%</b>	<b>50%</b>
<b>Relación A/C</b>				
<b>0,4</b>	32,52	34,84	44,26	23,37
<b>0,5</b>	24,49	28,29	28,42	33,42
<b>0,6</b>	14,76	15,08	20,34	22,01

**Cuadro 5:** Resistencia a la compresión a 28 días

**Fuente:** Valverde (2018)

#### 3.5.2 Acero de refuerzo

Con respecto al acero de refuerzo, Bustos (2017), menciona que “en el caso del acero de refuerzo, investigaciones realizadas con anterioridad a lo largo de los años en la Universidad de Costa Rica han

determinado que la mejor manera de poder simular el refuerzo de acero de un elemento estructural es mediante el uso de alambre galvanizado”.

Calibre BWG	Diámetro (mm)
6	5,16
8	4,19
9	3,76
10	3,40
11	3,05
12	2,77
13	2,41
14	2,11
15	1,83
16	1,65
18	1,24
20	0,89

**Cuadro 6:** Diámetros de alambres galvanizados

No. Varilla	Diámetro (mm)	Diámetro 1:3 (mm)	No Alambre BWG 1:3	Diámetro 1:10 (mm)	No. Alambre BWG 1:10
3	9,50	3,17	11	0,95	20
4	12,70	4,23	8	1,27	18
5	15,90	5,30	6	1,59	16
6	19,10	6,37	-	1,91	15
7	22,20	7,40	-	2,22	14
8	25,40	8,47	-	2,54	13
9	28,70	9,57	-	2,87	12

**Cuadro 7** Recomendación de alambre galvanizado para representar acero de refuerzo, según escala utilizada.

En el cuadro 7, se presentan los tipos de alambre galvanizado recomendados, según el número de varilla y escala utilizada, además se evidencia la importancia de seleccionar adecuadamente el factor de escala del modelo, debido a que se presenta una limitación si en el prototipo se presentan varillas #6 y se desea considerar una escala 1:3, ya que no existe un tipo de alambre que logre aproximar el diámetro de dicha varilla, por lo que habría que recurrir a distorsionar el modelo mediante la representación de la varilla #6 mediante la combinación de varios alambres galvanizados para lograr el área de refuerzo requerida.

“El alambre galvanizado destaca por ser un alambre completamente liso en el mercado costarricense, alejándose así de realidad de la construcción nacional, donde se hace uso de varillas corrugadas. Esto implica que se deba someter dicho alambre a un proceso manual de corrugación, con el fin de poder proveer la adherencia necesaria entre el concreto y su refuerzo (Bustos, 2017) .

Con el fin de aproximar la similitud entre el acero del modelo y del prototipo, el alambre galvanizado se debe someter a un proceso de corrugación, el cual se puede realizar con una máquina como la mostrada en la figura 3, o en caso de que no se tenga acceso a una máquina corrugadora, se pueden realizar pequeñas incisiones con la ayuda de una tenaza, para mejorar la adherencia entre el acero y el concreto.



**Figura 3:** Máquina corrugadora  
**Fuente:** Bustos (2017)

### 3.5.3 Formaleta

Con el propósito de generar la forma del elemento a ensayar y garantizar las dimensiones requeridas, es necesario el uso de formaletas para los modelos de concreto reforzado a escala. “Las formaletas deben ser a prueba de goteras y no deben ser absorbentes, para mantener constante el contenido de agua en el concreto modelo. En modelos muy reducidos se recomienda el uso de acrílicos o aluminio como materiales para elaborar las formaletas”(Vides, 2006).



**Figura 4:** Moldes de acrílico para vigas de concreto reforzado a escala reducida

### 3.6 Plantear y realizar la fabricación del modelo

Una vez definidos los materiales para la construcción del modelo a escala reducida, se debe plantear la fabricación de éste.

Inicialmente, se debe corrugar (en caso de ser necesario) el alambre galvanizado a utilizar como acero de refuerzo, es recomendable realizar el corrugado del alambre con una máquina como la mostrada en la figura 3. En caso de no contar con el equipo necesario para corrugar el alambre, se puede corrugar mediante la realización de marcas, con ayuda de una tenaza, teniendo en consideración la norma ASTM A 615 la cual menciona que las deformaciones hechas a acero de refuerzo, deben estar a un ángulo de 45° a 70° y el espaciamiento entre deformaciones no debe exceder el 70% del diámetro nominal del alambre a utilizar. En la figura 5, se muestran aros de alambre galvanizado utilizados como refuerzo transversal en un modelo a escala reducida de una viga.



*Figura 5: Aros de alambre galvanizado a escala reducida*

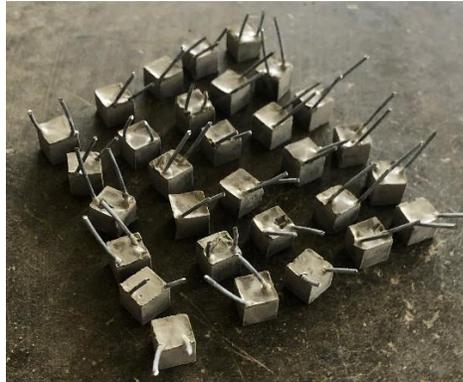
Debe mencionarse que el alambre galvanizado comúnmente presenta una cierta curvatura, debido a la forma de almacenarlo, por lo que se debe enderezar con ayuda de una prensa, con el fin de que este alambre se encuentre completamente recto a la hora de utilizarlo para la construcción de un modelo a escala.

Una vez se tenga corrugado el alambre y se hayan elaborado los aros y el refuerzo longitudinal, se debe ensamblar el refuerzo. Para realizar el amarre del alambre galvanizado, se recomienda el uso de alambre No.18, debido a que la utilización de un alambre más grueso puede generar dificultades a la hora de realizar la fijación de los elementos. En la figura 6, se muestra el refuerzo transversal y longitudinal de una viga a escala reducida.



*Figura 6: Moldes de acrílico para vigas de concreto reforzado a escala reducida*

Posteriormente, se debe ubicar el acero de refuerzo en la formaleta y garantizar la ubicación exacta del refuerzo, para la cual se recomienda el uso de separadores que posean la dimensión específica para el recubrimiento, como se muestra en la figura 7.



*Figura 7: Separadores de pasta de cemento a escala reducida*

Finalmente, se debe realizar la mezcla y colado del microconcreto. Con respecto al microconcreto, se recomienda realizar una adecuada cuantificación de la cantidad requerida y considerar un desperdicio igual o superior al 30%. Por último, además de los modelos a escala, se deben elaborar cilindros de concreto con el fin de conocer el desarrollo de resistencia del microconcreto.

### **3.7 Determinar el comportamiento teórico del modelo**

Con el propósito de analizar el grado de exactitud con el que se puede determinar el comportamiento a flexión de estructuras de concreto reforzado a partir de modelos a escala reducida, se puede construir y fallar el prototipo en estudio, lo cual supone una inversión en materiales y un tiempo de espera, debido a que los ensayos a realizar, comúnmente son ejecutados en fechas específicas, según la edad a la que se desee evaluar el concreto.

Debido a lo anterior, realizar el estudio con ayuda de un programa computacional, resulta viable si se tienen limitaciones económicas para la construcción del modelo prototipo. Actualmente, estos programas poseen una gran variedad de funciones y utilidades que permiten una adecuada representación del modelo en estudio. No obstante, es necesario conocer las dimensiones y características de refuerzo, así como conocer las propiedades mecánicas de los materiales a considerar.

Existe una gran variedad de softwares que permiten construir modelos de concreto reforzado con el objetivo de analizar el comportamiento de estos elementos, no obstante, debe mencionarse que, de los programas computacionales presentados en esta sección, únicamente el programa Opensees no requiere una licencia para realizar el análisis requerido, si se desea utilizar otro programa, se deberá contar con la licencia respectiva o en ocasiones, se tiene acceso a licencias estudiantiles, las cuales poseen una capacidad de análisis limitada y se podría ver afectada la obtención de los resultados requeridos. A continuación, se presenta una lista de los posibles softwares que podrían ser utilizados para determinar la respuesta teórica del modelo en estudio

- Perform 3D
- Abaqus
- Opensees
- Ansys
- Xtract
- Robot
- Atena

### 3.8 Preparar el equipo de carga

Para realizar las pruebas a los modelos a escala reducida, se debe preparar los elementos a fallar y los dispositivos que se utilizarán para medir los parámetros requeridos. Se recomienda preparar el equipo de carga y toma de datos con una semana de anticipación a la prueba.

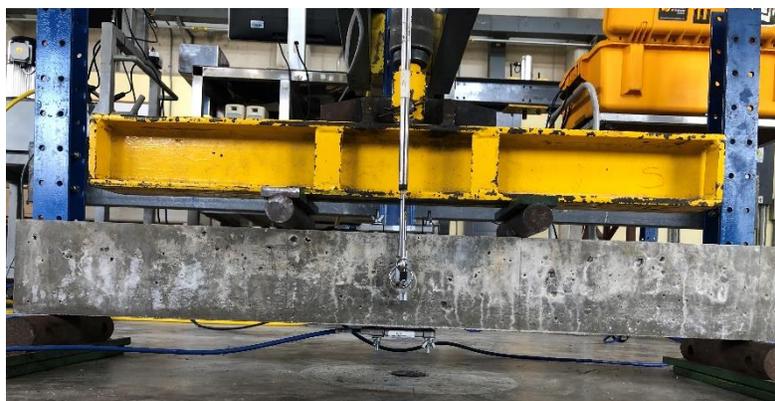
En la figura 8, se muestra la instalación de los dispositivos, donde se colocaron las galgas extensométricas, las cuales se ubicaron en los extremos superior e inferior de la viga con el objetivo de determinar las deformaciones unitarias en las fibras extremas de las vigas.



*Figura 8: Colocación de dispositivos metálicos para la instalación de galgas extensométricas*

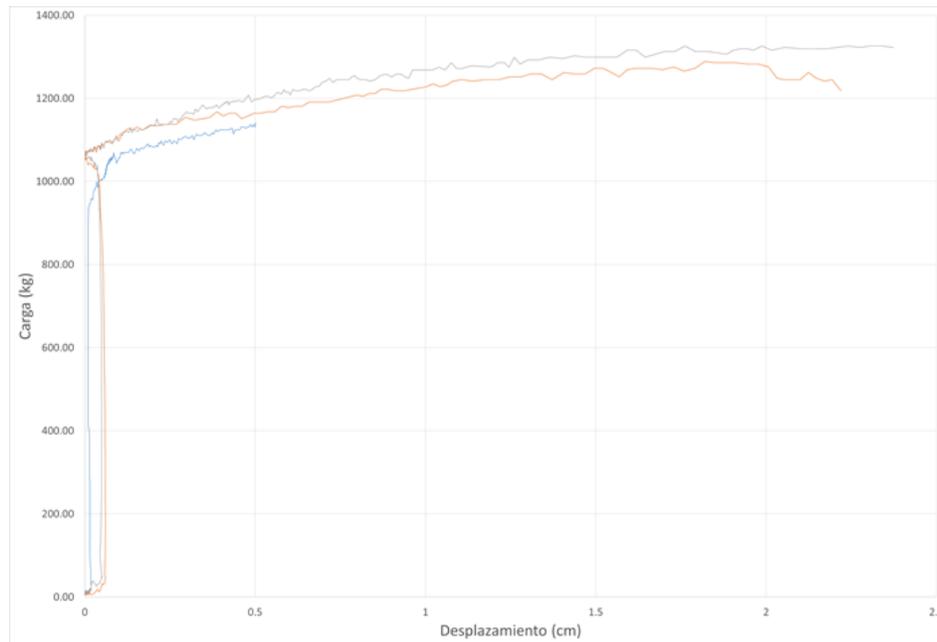
### 3.9 Observar y reportar la respuesta del modelo

Una vez se tenga lista la instalación del equipo de carga, se procede a realizar las pruebas, respetando las edades de falla y rangos aceptables de tiempo para su elaboración. Previo a la ejecución de las pruebas, se debe verificar el estado de los dispositivos de medida, con el fin de no generar afectación en la toma de datos de las pruebas.



*Figura 9: Prueba de compresión a vigas de concreto reforzado a escala reducida*

Finalmente, se deben reportar los datos obtenidos de las pruebas, los cuales deben ser escalados, según el cuadro 4. En la figura 10, se muestran los gráficos obtenidos de fuerza-desplazamiento al realizar una prueba de flexión a vigas a escala reducida.



**Figura 10:** Gráfico de fuerza desplazamiento de vigas a escala reducida

## Referencias bibliográficas

- American Society for Testing and Materials. (2020). ASTM A-615: Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement. *Astm*, 6. <https://doi.org/10.1520/A0615>
- Bustos, J. (2017). DESARROLLO DE METODOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO TÉRMICO DE ACERO DE REFUERZO NO CORRUGADO UTILIZADO EN MODELOS DE RESISTENCIA EN CONCRETO REFORZADO A ESCALA. *Informe Final Proyecto de Graduación San José: Universidad de Costa Rica*, 9, 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- González, G. (2010). DISEÑO DE MEZCLAS DE MICROCONCRETO CON ADITIVOS. *Trabajo de Diploma Santa Clara: Universidad Central*.
- Harris, H. G., & Sabnis, G. M. (1999). STRUCTURAL MODELING AND EXPERIMENTAL TECHNIQUES. In *Florida: Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. <https://doi.org/10.1115/1.3140679>
- Hossdorf, H. (1972). MODELOS REDUCIDOS. MÉTODO DE CÁLCULO. *Instituto Eduardo Torroja de Construcción y Cemento*.
- Kaklauskas, G., Sokolov, A., Ramanauskas, R., & Jakubovskis, R. (2019). Reinforcement strains in reinforced concrete tensile members recorded by strain gauges and FBG sensors: Experimental and numerical analysis. *SENSORS*, 19(1), 1–13. <https://doi.org/10.3390/s19010200>
- Lirola, J. M., Castañeda, E., Lauret, B., & Khayet, M. (2017). A review on experimental research using scale models for buildings: application and methodologies. *ENERGY AND BUILDINGS*, 142, 72–110. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.060>
- Tutak, P. (2015). Application Of Strain Gauges In Measurements Of Strain Distribution In Complex Objects. *JOURNAL OF APPLIED COMPUTER SCIENCE METHODS*, 6(2), 135–145. <https://doi.org/10.1515/jacsm-2015-0004>
- Valencia, J. (2010). DISEÑO DE VIGAS ALTAS CON MODELOS A ESCALA EN MICRO CONCRETO REFORZADO, USANDO LA METODOLOGÍA TRADICIONAL FRENTE A LA DEL STRUTAND TIE MODEL. *Informe Final Proyecto de Graduación Bogotá: Universidad de La Salle*, 101.
- Valverde, S. (2018). COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN AXIAL DEL MICROCONCRETO PARA MODELOS A ESCALA REDUCIDA. *Informe Final Proyecto de Graduación Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica*, 107.
- Vides, F. (2006). METODOLOGÍA PARA REALIZAR MODELOS DE CONCRETO REFORZADO A ESCALA REDUCIDA. *Informe Final Proyecto de Graduación Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander*.

# Apéndice 10 Comparación de programas computacionales bajo los criterios establecidos

	Facilidad para ejecutar comandos	Organización y accesibilidad de comandos	Representación de materiales	Facilidad de establecer dimensiones geométricas	Facilidad de aplicación de cargas	Variabilidad de resultados	Representación gráfica de resultados	Total	Peso ponderado definido
Facilidad para ejecutar comandos		1	1	1	1	0.2	0.2	4.4	5.7%
Organización y accesibilidad de comandos	1		0.2	5	1	5	0.2	12.4	16.1%
Representación de materiales	1	5		5	5	1	5	22	28.5%
Facilidad de establecer dimensiones geométricas	1	0.2	0.2		1	1	1	4.4	5.7%
Facilidad de aplicación de cargas	1	1	0.2	1		5	0.2	8.4	10.9%
Variabilidad de resultados	5	0.2	1	1	0.2		1	8.4	10.9%
Representación gráfica de resultados	5	5	0.2	1	5	1		17.2	22.3%
							Total	77.2	100.0%

Cuadro 1: Peso ponderado de los criterios considerados

Facilidad para ejecutar comandos	Perform3D	Abaqus	OpenSees	Ansys	Xtract	Robot	Atena	Total	Peso Relativo
Perform3D		1	5	1	1	0.2	1	9.20	12.15%
Abaqus	1		10	1	1	1	1	15.00	19.82%
OpenSees	0.2	0.1		0.2	0.2	0.2	0.2	1.10	1.45%
Ansys	1	1	5		1	1	0.2	9.20	12.15%
Xtract	1	1	5	1		1	5	14.00	18.49%
Robot	5	1	5	1	1		1	14.00	18.49%
Atena	1	1	5	5	0.2	1		13.20	17.44%
							Total	75.70	100.00%

Organización y accesibilidad de comandos	Perform3D	Abaqus	OpenSees	Ansys	Xtract	Robot	Atena	Total	Peso Relativo
Perform3D		1	5	1	0.2	0.2	1	8.40	10.05%
Abaqus	1		5	1	1	1	1	10.00	11.96%
OpenSees	0.2	0.2		0.2	0.2	0.2	0.2	1.20	1.44%
Ansys	1	1	5		5	0.2	5	17.20	20.57%
Xtract	5	1	5	0.2		1	5	17.20	20.57%
Robot	5	1	5	5	1		0.2	17.20	20.57%
Atena	1	1	5	0.2	0.2	5		12.40	14.83%
							Total	83.60	100.00%

Representación de materiales	Perform3D	Abaqus	OpenSees	Ansys	Xtract	Robot	Atena	Total	Peso Relativo
Perform3D		1	0.2	1	1	1	1	5.20	6.74%
Abaqus	1		1	1	5	1	0.2	9.20	11.92%
OpenSees	5	1		5	5	5	5	26.00	33.68%
Ansys	1	1	0.2		1	5	1	9.20	11.92%
Xtract	1	0.2	0.2	1		0.2	0.2	2.80	3.63%
Robot	1	1	0.2	0.2	5		0.2	7.60	9.84%
Atena	1	5	0.2	1	5	5		17.20	22.28%
							Total	77.20	100.00%

Facilidad de establecer dimensiones geométricas	Perform3D	Abaqus	OpenSees	Ansys	Xtract	Robot	Atena	Total	Peso Relativo
Perform3D		5	10	1	5	1	1	23.00	29.15%
Abaqus	0.2		5	0.2	1	0.2	1	7.60	9.63%
OpenSees	0.1	0.2		1	1	5	1	8.30	10.52%
Ansys	1	5	1		5	1	0.2	13.20	16.73%
Xtract	0.2	1	1	0.2		1	5	8.40	10.65%
Robot	1	5	0.2	1	1		1	9.20	11.66%
Atena	1	1	1	5	0.2	1		9.20	11.66%
							Total	78.90	100.00%

Facilidad de aplicación de cargas	Perform3D	Abaqus	OpenSees	Ansys	Xtract	Robot	Atena	Total	Peso Relativo
Perform3D		1	10	0.2	0.2	1	1	13.40	15.99%
Abaqus	1		10	1	1	1	1	15.00	17.90%

OpenSees	0.1	0.1	5	0.2	0.2	5	0.2	5.80	6.92%
Ansys	5	1	5	1	1	0.2	0.2	12.40	14.80%
Xtract	5	1	5	1	1	1	1	14.00	16.71%
Robot	1	1	0.2	5	1	1	1	9.20	10.98%
Atena	1	1	5	5	1	1	1	14.00	16.71%
								<b>Total</b>	<b>83.80</b>
									<b>100.00%</b>

Variabilidad de resultados	Perform3D	Abaqus	OpenSees	Ansys	Xtract	Robot	Atena	Total	Peso Relativo
Perform3D	1	1	0.2	0.2	1	5	1	8.40	10.05%
Abaqus	1	1	0.2	1	5	1	5	13.20	15.79%
OpenSees	5	5	5	5	5	1	5	26.00	31.10%
Ansys	5	1	0.2	5	5	5	1	17.20	20.57%
Xtract	1	0.2	0.2	0.2	5	0.2	1	2.80	3.35%
Robot	0.2	1	1	0.2	5	5	5	12.40	14.83%
Atena	1	0.2	0.2	1	1	0.2	1	3.60	4.31%
								<b>Total</b>	<b>83.60</b>
									<b>100.00%</b>

Representación gráfica de resultados	Perform3D	Abaqus	OpenSees	Ansys	Xtract	Robot	Atena	Total	Peso Relativo
Perform3D	1	0.2	10	0.2	0.2	1	1	12.60	11.17%
Abaqus	5	10	10	5	5	1	5	31.00	27.48%
OpenSees	0.1	0.1	10	0.1	0.2	0.1	0.2	0.80	0.71%
Ansys	5	0.2	10	5	5	5	5	30.20	26.77%
Xtract	5	0.2	5	0.2	5	1	1	12.40	10.99%
Robot	1	1	10	0.2	1	5	5	18.20	16.13%
Atena	1	0.2	5	0.2	1	0.2	1	7.60	6.74%
								<b>Total</b>	<b>112.80</b>
									<b>100.00%</b>

**Cuadro 2:** Comparación de alternativas

	Facilidad para ejecutar comandos	Organización y accesibilidad de comandos	Representación de materiales	Facilidad de establecer dimensiones geométricas	Facilidad de aplicación de cargas	Variabilidad de resultados	Representación gráfica de resultados	Total
Perform3D	0.007	0.016	0.019	0.017	0.017	0.011	0.025	11%
Abaqus	0.011	0.019	0.034	0.005	0.019	0.017	0.061	17%
OpenSees	0.001	0.002	0.096	0.006	0.008	0.034	0.002	15%
Ansys	0.007	0.033	0.034	0.010	0.016	0.022	0.060	18%
Xtract	0.011	0.033	0.010	0.006	0.018	0.004	0.024	11%
Robot	0.011	0.033	0.028	0.007	0.012	0.016	0.036	14%
Atena	0.010	0.024	0.063	0.007	0.018	0.005	0.015	14%

**Cuadro 3:** Calificación final de las alternativas

# Anexos

## Anexo 1 Archivo de unidades y parámetros para OpenSees

```
#-----  
#By Angel Navarro Mora, 2018  
#Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción  
#Escuela de Ingeniería en Construcción  
#Tecnológico de Costa Rica  
#-----  
  
#Define input units -----  
#Lenght units  
set cm 1.; #centimeter as lenght basic unit, with 0 cm is the lenght basic unit  
set m [expr 100.*$cm]; #centimeter  
set mm [expr 0.1*$cm]; #Milimeter  
set in [expr 2.54*$cm]; #Inch  
set ft [expr 30.48*$cm]; #Foot/Feet  
  
#Force units  
set kgf 1.; #Define kilograms force as force basic unit  
set N [expr 9.81*$kgf]; #Newton  
set kN [expr 1000.*$N]  
set Tf [expr 1000.*$kgf]; #Tonnes force  
set lbf [expr 0.4545*$kgf]; #Pounds force  
set kip [expr 1000.*$lbf]; #Kilopounds force  
  
#Time units  
set sec 1.; # define basic units  
#-----  
  
#Constants -----  
-----#  
#-----  
set g [expr 9.80665*$m/pow($sec,2.)]; # gravitational acceleration  
set Pi [expr 4.*atan(1.)]; # define constants  
set NumE 2.7182818  
set conMk 10.1971621298  
set Ubig 1.e10; # a really large number  
set Usmall [expr 1./$Ubig]; # a really small number  
#-----  
  
#Compound Units -----#
```

```

#-----#

#Area units
set cm2 [expr $cm*$cm]
set mm2 [expr $mm*$mm]
set m2 [expr $m*$m]
set in2 [expr $in*$in]
set ft2 [expr $ft*$ft]

#Intertia units
set cm4 [expr $cm*$cm*$cm*$cm]
set mm4 [expr $mm*$mm*$mm*$mm]
set m4 [expr $m*$m*$m*$m]
set in4 [expr $in*$in*$in*$in]
set ft4 [expr $ft*$ft*$ft*$ft]

#Stress units
set MPa [expr 1.*$N/$mm2]
set kgcm2 [expr $kgf/$cm2]
set kgm2 [expr $kgf/$m2]
set psi [expr $lbf/$in2]
set ksi [expr $kip/$in2]

#Area of Steel bars -----#
set Ab3 [expr 0.71*pow($cm,2)]
set Ab4 [expr 1.29*pow($cm,2)]
set Ab5 [expr 1.99*pow($cm,2)]
set Ab6 [expr 2.84*pow($cm,2)]
set Ab7 [expr 3.87*pow($cm,2)]
set Ab8 [expr 5.10*pow($cm,2)]
set Ab9 [expr 6.45*pow($cm,2)]
#-----#

#Output units -----#
set LunitTXT "cm"; # define basic-unit text for output
set FunitTXT "kgf"; # define basic-unit text for output
set TunitTXT "sec"; # define basic-unit text for output
#-----#

# separation lines -----#
set sep [string repeat - 100]
set sep2 [string repeat "" 100]
set sep3 [string repeat -#- 10]
#-----#

```

## Anexo 2 Parámetros de análisis estático

```
# -----  
-----  
# static analysis parameters  
# I am setting all these variables as global variables (using variable rather than set  
command)  
# so that these variables can be uploaded by a procedure  
#                               Silvia Mazzoni & Frank McKenna, 2006  
#  
  
# CONSTRAINTS handler -- Determines how the constraint equations are enforced in the  
analysis (http://opensees.berkeley.edu/OpenSees/manuals/usermanual/617.htm)  
# Plain Constraints -- Removes constrained degrees of freedom from the system  
of equations (only for homogeneous equations)  
# Lagrange Multipliers -- Uses the method of Lagrange multipliers to enforce  
constraints  
# Penalty Method -- Uses penalty numbers to enforce constraints --good for  
static analysis with non-homogeneous eqns (rigidDiaphragm)  
# Transformation Method -- Performs a condensation of constrained degrees of  
freedom  
variable constraintsTypeStatic Plain;          # default;  
if { [info exists RigidDiaphragm] == 1 } {  
    if { $RigidDiaphragm=="ON" } {  
        variable constraintsTypeStatic Lagrange;      # for large model, try  
Transformation  
        }; # if rigid diaphragm is on  
    }; # if rigid diaphragm exists  
constraints $constraintsTypeStatic  
  
# DOF NUMBERER (number the degrees of freedom in the domain):  
(http://opensees.berkeley.edu/OpenSees/manuals/usermanual/366.htm)  
# determines the mapping between equation numbers and degrees-of-freedom  
# Plain -- Uses the numbering provided by the user  
# RCM -- Renumbers the DOF to minimize the matrix band-width using the Reverse  
Cuthill-McKee algorithm  
set numbererTypeStatic RCM  
numberer $numbererTypeStatic  
  
# SYSTEM (http://opensees.berkeley.edu/OpenSees/manuals/usermanual/371.htm)  
# Linear Equation Solvers (how to store and solve the system of equations in the  
analysis)  
# -- provide the solution of the linear system of equations  $Ku = P$ . Each solver is  
tailored to a specific matrix topology.  
# ProfileSPD -- Direct profile solver for symmetric positive definite matrices  
# BandGeneral -- Direct solver for banded unsymmetric matrices  
# BandSPD -- Direct solver for banded symmetric positive definite matrices  
# SparseGeneral -- Direct solver for unsymmetric sparse matrices  
# SparseSPD -- Direct solver for symmetric sparse matrices
```

```

#           UmfPack -- Direct UmfPack solver for unsymmetric matrices
set systemTypeStatic BandGeneral;           # try UmfPack for large model
system $systemTypeStatic

# TEST: # convergence test to
# Convergence TEST (http://opensees.berkeley.edu/OpenSees/manuals/usermanual/360.htm)
# -- Accept the current state of the domain as being on the converged solution path
# -- determine if convergence has been achieved at the end of an iteration step
#           NormUnbalance -- Specifies a tolerance on the norm of the unbalanced load at
the current iteration
#           NormDispIncr -- Specifies a tolerance on the norm of the displacement
increments at the current iteration
#           EnergyIncr-- Specifies a tolerance on the inner product of the unbalanced
load and displacement increments at the current iteration
#           RelativeNormUnbalance --
#           RelativeNormDispIncr --
#           RelativeEnergyIncr --
variable TolStatic 1.e-8;                   # Convergence Test: tolerance
variable maxNumIterStatic 6;                # Convergence Test: maximum number of
iterations that will be performed before "failure to converge" is returned
variable printFlagStatic 0;                # Convergence Test: flag used to print
information on convergence (optional)      # 1: print information on each step;
variable testTypeStatic EnergyIncr ;       # Convergence-test type
test $testTypeStatic $TolStatic $maxNumIterStatic $printFlagStatic;
# for improved-convergence procedure:
    variable maxNumIterConvergeStatic 2000;
    variable printFlagConvergeStatic 0;

# Solution ALGORITHM: -- Iterate from the last time step to the current
(http://opensees.berkeley.edu/OpenSees/manuals/usermanual/682.htm)
#           Linear -- Uses the solution at the first iteration and continues
#           Newton -- Uses the tangent at the current iteration to iterate to
convergence
#           ModifiedNewton -- Uses the tangent at the first iteration to iterate to
convergence
#           NewtonLineSearch --
#           KrylovNewton --
#           BFGS --
#           Broyden --
variable algorithmTypeStatic Newton
algorithm $algorithmTypeStatic;

# Static INTEGRATOR: -- determine the next time step for an analysis
(http://opensees.berkeley.edu/OpenSees/manuals/usermanual/689.htm)
#           LoadControl -- Specifies the incremental load factor to be applied to the
loads in the domain
#           DisplacementControl -- Specifies the incremental displacement at a specified
DOF in the domain
#           Minimum Unbalanced Displacement Norm -- Specifies the incremental load
factor such that the residual displacement norm is minimized

```

```

#           Arc Length -- Specifies the incremental arc-length of the load-displacement
path
# Transient INTEGRATOR: -- determine the next time step for an analysis including
inertial effects
#           Newmark -- The two parameter time-stepping method developed by Newmark
#           HHT -- The three parameter Hilbert-Hughes-Taylor time-stepping method
#           Central Difference -- Approximates velocity and acceleration by centered
finite differences of displacement
integrator DisplacementControl $IDctrlNode $IDctrlDOF $Dincr

# ANALYSIS -- defines what type of analysis is to be performed
(http://opensees.berkeley.edu/OpenSees/manuals/usermanual/324.htm)
#           Static Analysis -- solves the KU=R problem, without the mass or damping
matrices.
#           Transient Analysis -- solves the time-dependent analysis. The time step in
this type of analysis is constant. The time step in the output is also constant.
#           variableTransient Analysis -- performs the same analysis type as the
Transient Analysis object. The time step, however, is variable. This method is used
when
#           there are convergence problems with the Transient Analysis object at
a peak or when the time step is too small. The time step in the output is also
variable.
set analysisTypeStatic Static
analysis $analysisTypeStatic

```

# Referencias

- ACI. (1999). Aggregates for concrete. *American Concrete Institute*, 1–26.
- Almada N, D. V, Noel Bárcena, J. A., & Enciso, M. T. (2016). Determinación y Análisis de la gráfica Momento-Curvatura de diferentes secciones de vigas de concreto reforzado. *Tecnológico de Monterrey*, RP-28. <http://www.laccei.org/LACCEI2016-SanJose/ReferedPapers/RP228.pdf>
- American Society for Testing and Materials. (2019). ASTM D-75: Standard Practice for Sampling Aggregates. *Annual Book of ASTM Standards*, 1–7. <https://doi.org/10.1520/D0075>
- American Society for Testing and Materials. (2020a). ASTM A-615: Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement. *Astm*, 6. <https://doi.org/10.1520/A0615>
- American Society for Testing and Materials. (2020b). ASTM C125: Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. *ASTM International*, 1–9. <https://doi.org/10.1520/C0125-20>.
- American Wood Council. (2005). Beam Formulas With Shear and Moment Diagrams. *American Forest & Paper Association*.
- Betancourt, D. (2018). *Cómo hacer una matriz de priorización*. Ingeniero Empresa. [https://ingenioempresa.com/matriz-de-priorizacion/#Matriz\\_de\\_priorizacion\\_Ejemplo\\_detallado](https://ingenioempresa.com/matriz-de-priorizacion/#Matriz_de_priorizacion_Ejemplo_detallado)
- Bustos, J. (2017). **DESARROLLO DE METODOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO TÉRMICO DE ACERO DE REFUERZO NO CORRUGADO UTILIZADO EN MODELOS DE RESISTENCIA EN CONCRETO REFORZADO A ESCALA**. *Informe Final Proyecto de Graduación San José: Universidad de Costa Rica*, 9, 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Chine, B., Cuevas, R., Jiménez, R., Ortiz, G., & Pridybailo, G. (2018). CORrosión del concreto reforzado y DEgradación de sus propiedades MECánicas (CODE\_MEC1): Etapa 1 Estudio experimental y modelación computacional de la carbonatación del concreto. *Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica*.
- Ching, F., & Adams, C. (2008). **GUÍA DE CONSTRUCCIÓN ESCALADA**. *Editorial Limusa*.
- CSCR. (2010). Código Sísmico de Costa Rica. *Editorial Tecnológica de Costa Rica*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Elizondo, G. (2013). **RESISTENCIA VS. RELACIÓN A/C DEL CONCRETO A TRES EDADES Y CON DOS TIPOS DE CEMENTO (UG Y MP-AR)**. *Informe Final Proyecto de Graduación Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica*.
- Espinoza, E. (1991). **MEZCLAS DE MICROCONCRETO PARA MODELOS ESTRUCTURALES**. *Informe Final Proyecto de Graduación San José: Universidad de Costa Rica*.
- González Cuevas, O. M., Robles Fernández-Villegas, F., González Cuevas, O. M., & Fernández-Villegas, F. R. (2013). **ASPECTOS FUNDAMENTALES DEL CONCRETO REFORZADO**. *LIMUSA*.

- Harris, H. G., & Sabnis, G. M. (1999). **STRUCTURAL MODELING AND EXPERIMENTAL TECHNIQUES**. In *Florida: Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*.  
<https://doi.org/10.1115/1.3140679>
- Jinxuejun, J., & Wanggenhui, H. (2015). The relationship between moment and curvature and the elastic-plastic seismic response analysis of high pier section. **OPEN MECHANICAL ENGINEERING JOURNAL**, 9(1), 892–899.  
<https://doi.org/10.2174/1874155X01509010892>
- León, H. (2009). **MODELACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS DE MICROCONCRETO**. *Trabajo de Diploma Cuba: Universidad Central Marta Abreu de Las Villas*, 1–104.  
<http://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/5079/C09033.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Lirola, J. M., Castañeda, E., Lauret, B., & Khayet, M. (2017). A review on experimental research using scale models for buildings: application and methodologies. **ENERGY AND BUILDINGS**, 142, 72–110.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.060>
- Mazzoni, S. 2020 **ANÁLISIS EN OPENSEES**. Comunicación Personal
- Ministerio de Economía, I. y C. (1973). Decreto N° 10854-MEIC Norma oficial de especificaciones para los agregados finos y gruesos para concreto. *San José: Imprenta Nacional*, 4, 1–8.
- Navarro, A. (n.d.). Propuesta para la dosificación de microconcreto para modelos a escala reducida 1:3. *Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica (En Proceso de Publicación)*.
- Nilson, A. (2004). **DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES**. *New York: McGrawHill*.
- Reyes, B., Marmolejo, M., & Salom, Y. (2018). Esfuerzos y Deflexiones en Vigas. *Universidad Tecnológica de Bolívar*, October, 9.  
<https://www.researchgate.net/publication/328554436>
- Sánchez de Guzmán, D. (2006). **TECNOLOGÍA DEL CONCRETO Y DEL MORTERO**. *Bogotá: Bhandar Editores*.
- Sigcha, B. (2014). **MÓDELOS FÍSICOS EXPERIMENTALES REDUCIDOS DE ESTRUCTURAS DE PUENTES DE ACERO**. *Informe Final Proyecto de Graduación Quito: Universidad Central Del Ecuador*.
- Simeon, J. (2005). *Impurezas Orgánicas En Arenas*. 01, 6.  
<http://www.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoAgregados/IMPUREZAS.pdf>
- Simeon, J. (2007). Análisis de tamaño de partículas por tamizado en agregado fino y grueso y determinación de material más fino que el tamiz No.200 en agregado mineral por lavado. *San Salvador: Universidad Centroamericana*, 1(01), 15.  
<file:///C:/Users/alum.fial8/Desktop/shi/GRANULOMETRIA.pdf>
- UC Berkeley. (2006). The Open System for Earthquake Engineering Simulation.  
<https://opensees.berkeley.edu/OpenSees/home/about.php>
- Valencia, J. (2010). DISEÑO DE VIGAS ALTAS CON MODELOS A ESCALA EN MICRO CONCRETO REFORZADO, USANDO LA METODOLOGÍA TRADICIONAL FRENTE A LA DEL STRUTAND TIE MODEL. *Informe Final Proyecto de Graduación Bogotá: Universidad de La Salle*, 101.
- Valverde, S. (2018). **COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN AXIAL DEL MICROCONCRETO PARA MODELOS A ESCALA REDUCIDA**. *Informe Final Proyecto de Graduación Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica*, 107.
- Viquez, M. (1999). **MARCOS DE MICROCONCRETO SOMETIDO A CARGA MONOTÓNICA: EFECTO DE CARGA**

**AXIAL EN EL COMPORTAMIENTO  
CARGA VERSUS DESPLAZAMIENTO.**  
*Informe Final Proyecto de Graduación San  
José: Universidad de Costa Rica.*

Wight, J., & MacGregor, J. (2012). **REINFORCED  
CONCRETE MECHANICS & DESIGN.** In  
*Pearson.*