

**CONSTRUCCIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL DEL VIADUCTO
ARMANDO PUYANA PUYANA (LA FLORA).**

**ARNOLD HERNÁN TAPIAS CÁCERES
JEFFER MAURICIO ARIZA MEDINA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA**

2009

**CONSTRUCCIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL DEL VIADUCTO
ARMANDO PUYANA PUYANA (LA FLORA).**

**ARNOLD HERNÁN TAPIAS CÁCERES
JEFFER MAURICIO ARIZA MEDINA**

**Proyecto de Grado en Modalidad de Investigación para optar el
Título de Ingeniero Civil**

**DIRECTOR
ESPERANZA MALDONADO
Ingeniería Civil**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA**

2009

AGRADECIMIENTOS

JEFFER MAURICIO ARIZA

A mi novia por ser mi luz y mi fuerza.

A mi familia por su apoyo.

A la profesora Esperanza Maldonado, al profesor Gustavo Chío y al profesor Jose Carlos Gutiérrez por todas sus enseñanzas y aportes para la realización de este proyecto.

ARNOLD HERNAN TAPIAS

A mi familia por todo el apoyo brindado.

A mis profesores por sus enseñanzas y su valiosa colaboración.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	<i>i</i>
LISTA DE FIGURAS	<i>i</i>
RESUMEN	<i>iii</i>
INTRODUCCION	1
OBJETIVOS	2
1.TEORIA DE MODELOS	3
1.1RELACION ENTRE MODELO Y PROTOTIPO	4
1.1.1 Análisis dimensional.	4
1.1.1.1 Teorema Pi de Buckingham`s	5
1.1.2 Factores de escala.	7
1.1.2.1 Modelos elásticos estáticos.	8
1.2 PRINCIPALES PROBLEMAS RELACIONADOS CON LOS MODELOS PLÁSTICOS	10
1.2.1 Modelamiento de la fluencia en sistemas prototipo.	11
1.2.2 Consideraciones del coeficiente de Poisson`s.	11
1.2.3 Variación de espesores en formas comerciales.	12
1.3 ERRORES EN MODELOS	12
1.3.1 Recomendaciones para minimizar errores en modelos	14
2. ESTADO DEL ARTE	18
3. ESPECIFICACIONES VIADUCTO PUYANA PUYANA	19
3.1 ESPECIFICACIONES DE LA ESTRUCTURA	20
3.2 DIMENSIONES DE LA ESTRUCTURA	21
3.2.1 Vigas.	21
3.2.2 Pilares.	21
4. MODELAMIENTO DE LA ESTRUCTURA MEDIANTE UN SOFTWARE	23

5. MODELO EXPERIMENTAL	25
5.1 DEFINICIÓN DE LA ESCALA PARA EL MODELO.	25
5.2 MATERIALES ÚTILES PARA EL MODELAMIENTO.	26
5.2.1 Material escogido para el modelo.	26
5.2.2 Otros materiales para el proceso constructivo.	29
5.3. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO.	30
6. ENSAYOS AL MODELO	32
6.1 PROCEDIMIENTO.	33
6.2 PROBLEMAS PARA LOS ENSAYOS.	34
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	35
BIBLIOGRAFÍA	39

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 <i>Características de los diferentes tipos de modelos a escala.</i>	3
Tabla 1.2 <i>Cantidades físicas y sus respectivas unidades</i>	6
Tabla 1.3 <i>Cantidades físicas para estructuras de concreto</i>	7
Tabla 1.4 <i>Factores de escala para modelos elásticos estáticos</i>	10
Tabla 1.5 <i>Posibles errores en modelamiento de estructuras</i>	13
Tabla 2.1 <i>Recopilación de modelos hechos a escala</i>	18
Tabla 3.1 <i>Dimensionamiento pilares viaducto la Flora.</i>	22
Tabla 4.1 <i>Fuerzas aplicadas y desplazamientos obtenidos del modelo analítico.</i>	24
Tabla 5.1 <i>Propiedades de algunos materiales plásticos utilizados para la fabricación de modelos a escala.</i>	27
Tabla 5.2 <i>Módulos de elasticidad de la resina polyester.</i>	28
Tabla 6.1 <i>Fuerzas aplicadas y desplazamientos esperados.</i>	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 <i>Foto en perspectiva del viaducto la Flora.</i>	19
Figura 3.2 <i>Planta y perfil del viaducto la Flora.</i>	20
Figura 3.3 <i>Secciones vigas viaducto la Flora.</i>	21
Figura 3.4 <i>Secciones pilares viaducto la Flora.</i>	22
Figura 4.1 <i>Modelo en 3D del Viaducto la Flora</i>	23
Figura 5.1 <i>Resina polyester. Apariencia física.</i>	28
Figura 5.2 <i>Moldes fabricados en balsa.</i>	29
Figura 5.3 <i>Gel de moldeo en estado líquido y sólido.</i>	30

Figura 5.4 <i>Ensamblaje de las piezas.</i>	31
Figura 5.5 <i>Pórtico ensamblado.</i>	31
Figura 6.1 <i>Pórtico ensamblado.</i>	32
Figura 6.2 <i>Gato hidráulico del Laboratorio de materiales.</i>	33

RESÚMEN

TÍTULO: CONSTRUCCIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL DEL VIADUCTO ARMANDO PUYANA PUYANA (LA FLORA)*

AUTORES:

ARIZA MEDINA, Jeffer Mauricio**

TAPIAS CÁCERES, Arnold Hernán**

PALABRAS CLAVES: Puente Viga - losa, Modelo experimental escalado, Proceso Constructivo.

DESCRIPCIÓN:

El contenido de este documento, describe el procedimiento constructivo que se implementó en la elaboración de un modelo elástico a escala del Viaducto Armando Puyana Puyana. Para ello, se recopiló y seleccionó información de una serie de documentos en los que se desarrolla el tema de modelos experimentales a escala.

Se presenta una teoría de técnicas experimentales para modelos a escala, la cual es la base del trabajo realizado, en ella, se plantea el procedimiento a aplicar para realizar el escalamiento de una estructura real, dependiendo del tipo de análisis que se requiere efectuar, ya que este es el que determina la escala y el tipo de material con los que se puede desarrollar el modelo.

Se presenta el procedimiento llevado a cabo en la elaboración del modelo experimental, desde el dimensionamiento realizado en la estructura real, el proceso matemático utilizado para su escalamiento, la investigación, elaboración y caracterización del material implementado en su construcción, y el análisis matemático llevado a cabo para la comparación de los resultados obtenidos en el modelo experimental.

Por último, se concluye con una serie de recomendaciones acerca de los principales inconvenientes que se pueden presentar durante el proceso constructivo, si no se escoge adecuadamente la escala a trabajar y el modelo a realizar; así como algunas sugerencias para optimizar el proceso constructivo del modelo experimental.

* Trabajo de grado

** Universidad Industrial de Santander (UIS), Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Directora: Esperanza Maldonado

ABSTRACT

TITLE: CONSTRUCTION OF AN EXPERIMENTAL MODEL OF THE VIADUCT ARMANDO PUYANA PUYANA (LA FLORA)*

AUTHORS:

ARIZA MEDINA, Jeffer Mauricio**

TAPIAS CÁCERES, Arnold Hernán**

KEY WORDS: Girder - Flagstone Bridge, Experimental model, Constructive procedure.

DESCRIPTION:

The content of this document, describes the constructive procedure that was implemented on the elaboration of an elastic scale model of the Viaduct Armando Puyana Puyana. For it, it was gathered and selected information from several documents where the topic of experimental scale models is developed.

A theory of experimental techniques for scale models is presented, which is the base of the work done, in there, it is established the procedure to carry out the scaling of a real structure, according to the type of analysis that is required, because it is what determines the scale and the type of material with those the model can be developed.

It is presented the executed procedure on the elaboration of the experimental model, from the sizing made on the real structure, the mathematical procedure used for its scaling, the investigation, elaboration and characterization of the used material on its construction, to the mathematical analysis implemented to compare the obtained results from the experimental model.

Finally, it is made a conclusion with a series of recommendations about the main drawbacks that can be presented during the constructive procedure, if the scale and the model are not properly chosen; as well as some suggestions to optimize the experimental model's constructive process.

* Grade work

** Universidad Industrial de Santander (UIS), Faculty of Physical-Mechanical engineering, Faculty of Civil Engineering. Directress: Esperanza Maldonado

INTRODUCCIÓN

Uno de los desafíos más grandes que se tiene en el proceso de construcción de una estructura es predecir el comportamiento estructural de la misma. Determinar cuáles podrían ser las fallas posibles del diseño es quizá una de las tareas más importantes que determinarán la seguridad estructural del un proyecto.

En esta carrera por desarrollar metodologías de estudio de comportamiento estructural de los proyectos, ha llevado a desarrollar una técnica de análisis la cual consiste en la elaboración de modelos a escala, que asemejen el comportamiento real que podría presentar la estructura bajo posibles condiciones de carga, muchas de ellas provocadas por efectos naturales como el caso de los sismos, efectos de viento entre otras.

En la actualidad el puente de la Flora es una estructura fundamental en el desarrollo vial de la ciudad de Bucaramanga, Santander. Trabajando en conjunto con el puente García Cadena se convierten en las arterias viales principales que comunican a los distintos municipios de la zona metropolitana de la ciudad en especial Floridablanca y Piedecuesta.

Debido a su importancia nace la necesidad de conocer de una mejor forma su comportamiento futuro mediante la implementación del modelo experimental del mismo, con el cual sería factible apreciar su comportamiento.

OBJETIVOS

Objetivo General

- Hacer un modelo experimental a escala de los elementos representativos del viaducto *Armando Puyana Puyana* (la Flora).

Objetivos Específicos

- Aplicar la metodología establecida para el escalamiento de un modelo real.
- Adquirir una formación como investigadores experimentales en el campo de construcción de modelos a escala de estructuras reales.
- Realizar un modelo experimental del puente de la flora que represente la estructura.
- Establecer una metodología para manipular y caracterizar el material empleado en la construcción del modelo.

1. TEORIA DE MODELOS

Se entiende por modelo la reproducción a escala de una estructura con los materiales adecuados, que sometida a unas cargas permite medir magnitudes previamente escogidas, para que con estos resultados y unos factores de escala, pueda predecirse el comportamiento de la estructura. El Comité De Análisis Experimental Para Las Estructuras De Hormigón (ACI) define los modelos estructurales como la representación de una estructura o una porción de una estructura, comúnmente construida a escala reducida. A continuación se muestra la Tabla 1.1, que presenta los diferentes tipos de modelo a escala.

Tabla 1.1 *Características de los diferentes tipos de modelos a escala.*

Tipo de modelo	Características
Elástico	Estos modelos son geoméricamente similares al prototipo, pero los materiales no tienen que ser similares. Los modelos elásticos solo pueden predecir el comportamiento en el rango elástico.
Indirectos	Un modelo indirecto es un caso especial de modelo elástico, es usado para obtener diagramas de influencia de las reacciones y de esfuerzos internos. La carga aplicada no tiene ninguna correspondencia a la aplicada realmente en el prototipo, pero las cargas verdaderas se logran a partir de una superposición de los valores de influencia.
Directos	Un modelo directo es geoméricamente similar en todos los aspectos al prototipo. Las cargas son aplicadas de igual forma que en el prototipo y las repuestas a las condiciones de carga son similares a las que se presentan en el tamaño real.
Resistencia o replica	Es un caso especial de modelos directos. Son hechos de materiales similares a los del prototipo y pueden predecir el comportamiento de este, por encima de su falla. Cada uno de los materiales utilizados satisface las condiciones de similitud de los materiales del prototipo.
Efectos de viento	Se planean para evaluar el comportamiento estructura – efectos de viento.
Dinámicos	Son usados para estudiar la vibración o dinámica de las estructuras por efecto de las cargas aplicadas. Con estos modelos se analizan estructuras sometidas a sismos
Otros modelos	Se encuentran modelos termales donde los efectos de temperatura son estudiados, también modelos fotomecánicos, que estudian los efectos ópticos.

Los modelos estructurales se emplean para verificar resultados dados por los métodos analíticos o para desarrollar investigaciones donde los modelos analíticos son matemáticamente complejos. Los modelos estructurales tienen la ventaja de representar el comportamiento de una estructura hasta el colapso. El tiempo y el costo son las mayores desventajas del uso de modelos estructurales, así que los modelos físicos son normalmente usados cuando estas condiciones lo permitan.

1.1 RELACION ENTRE MODELO Y PROTOTIPO

Los modelos reducidos son útiles siempre que se establezca la relación existente con el prototipo, que es conocida como principio de similitud. Según este, dos sistemas son similares cuando la variación de parámetros físicos cuantificables es tal que ambos sistemas, geoméricamente magnificados o reducidos, similares entre si y bajo la acción de causas físicas similares, transcurren de un modo físicamente similar. Esto quiere decir que los procesos o fenómenos en sistemas semejantes están descritos por medio de las mismas funciones matemáticas. El principio de similitud, exige el cumplimiento de condiciones designadas como factores de escala, que se obtienen a partir del análisis dimensional.

1.1.1 Análisis dimensional. El análisis dimensional permite la combinación de variables dentro de un grupo conveniente con una reducción de cantidades desconocidas.

1.1.1.1 Teorema Pi de Buckingham¹. El teorema Pi de Buckingham^s expresa que una ecuación dimensionalmente homogénea que envuelve ciertas cantidades físicas puede ser reducida a una ecuación equivalente que las involucre en productos adimensionales. Para los modelos estructurales este teorema fórmula que la solución de una ecuación para alguna cantidad física de interés (ver Ecuación 1.1):

$$F(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad [1.1]$$

Que puede escribirse según la Ecuación 1.2.

$$G(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m) = 0 \quad [1.2]$$

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 numero de dimensiones fundamentales que están envueltas en las variables físicas.

Es primordial acertar en la escogencia de las variables dimensionalmente independientes y cuales están involucradas en el estudio, debido que algunas cantidades físicas pueden ser combinaciones de otras, cosa que podría minimizar cálculos y en algunas ocasiones dar soluciones a problemas complejos.

La Tabla 1.2 presenta la lista de cantidades físicas que podrían estar envueltas en problemas estructurales y las medidas dimensionales que las describen.

¹PALACIOS, Julio. Análisis dimensional: El teorema de pi. Madrid: ED Espasa-Calpe, 1955, 266 p. Citado por VIDES DE LA HOZ, Félix. Metodología para Realizar Modelos de Concreto Reforzado a Escala Reducida: Teoría de Modelos. Bucaramanga, 2006, 83 h. Trabajo de Grado (Ingeniero Civil). Universidad Industrial de Santander. Facultad Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil.

Tabla 1.2 *Cantidades físicas y sus respectivas unidades*

	Cantidad	Unidades
l	Longitud	L
P	Fuerza	F
t	Tiempo	T
θ	Temperatura	θ
E	Modulo de elasticidad	FL^{-2}
ϵ	Deformación unitaria	-----
σ	Esfuerzos	FL^{-2}
ν	Relación de Poisson's	-----
M	Masa	$FL^{-1}T^{-2}$
a	Aceleración	LT^{-2}
δ	Desplazamiento	L
α	Coefficiente de expansión lineal	θ^{-1}

Para determinar los términos π no hay una metodología efectiva, por lo tanto se definen por preferencia personal. Los siguientes puntos sirven de guía para formular los términos π :

1. Todas las variables deben ser incluidas
2. Los términos m (numero de productos adimensionales) deben ser independientes.
3. En general no hay solo una manera de escoger los términos π_i , se tiene que trabajar con formulaciones alternativas para estudiar diferentes caminos de solución.

Distinguir las variables que afectan un fenómeno es relativamente difícil. El diseñador debe entender muy bien el problema, el porqué y como las variables influyen en el fenómeno. Antes de iniciar el análisis dimensional de un problema, se debe probar con una solución teórica del fenómeno. Incluso usualmente la teoría descubre la acción de las más importantes variables. Si las ecuaciones diferenciales que gobiernan el fenómeno están a disposición, ellas muestran cuales son las variables más significativas. Si no se conoce las ecuaciones que

gobiernan al fenómeno, entonces el diseñador del modelo debe tener una visión amplia del problema. Es claro que el análisis dimensional es útil si se identifican las variables físicas relevantes.

En modelos para estructuras de concreto las cantidades físicas y sus dimensiones son las mostradas en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3 *Cantidades físicas para estructuras de concreto*

	l	Q	M	σ	ϵ	a	δ	v	E
F	0	1	1	1	0	0	0	0	1
L	1	0	-1	-2	0	1	1	0	-2
T	0	0	2	0	0	-2	0	0	0

Los términos π más convenientes para modelos estructurales son los expresados en la Ecuación [1.3].

$$\begin{aligned}
 \pi_1 &= \frac{Q}{El}, & \pi_2 &= \frac{Ma}{El^2}, & \pi_3 &= \frac{\sigma}{E} \\
 \pi_4 &= \epsilon, & \pi_5 &= \frac{\delta}{l}, & \pi_6 &= v
 \end{aligned}
 \tag{1.3}$$

1.1.2 Factores de escala. Las relaciones de similitud para modelos estructurales se obtienen a partir de los términos π de la ecuación [1.3]. Los factores de escala se derivan de la Ecuación [1.4].

$$\pi_m = \pi_p
 \tag{1.4}$$

Para cada uno de los seis términos, después se relacionan modelo y prototipo con la Ecuación [1.5]:

$$S_i = i_p / i_m
 \tag{1.5}$$

S_i : Es definido como el factor de escala para la cantidad i ; los subíndices p y m denotan el prototipo y el modelo, respectivamente.

Los factores de escala pueden representarse solamente con las cantidades dimensionalmente independientes presentes en los términos π de la ecuación

[1.3], son estas: longitud, modulo de elasticidad y aceleración (l , E y a).

Los factores de escala para modelos estructurales son:

$$\begin{aligned}
 S_Q &= S_l^2 S_E, & S_\varepsilon &= 1, & S_M &= \frac{S_l^2 S_E}{S_a} \\
 S_\delta &= S_l, & S_\sigma &= S_E, & S_v &= 1
 \end{aligned}
 \tag{1.6}$$

Para que los esfuerzos sean equivalentes, la relación entre los módulos de elasticidad debe ser igual a 1 ($S_E = 1$), se logra utilizando materiales con propiedades similares en modelo y prototipo.

1.1.2.1 Modelos elásticos estáticos. Los materiales usados en un modelo elástico estático de un prototipo deben cumplir con la condición de permanecer elásticos en el rango de carga, y tener la misma relación de Poisson's que el material del prototipo. En estructuras se ha comprobado que en sus estados de pre-fisuración, tanto el concreto como el concreto reforzado pueden ser considerados como elásticos. Bajo la acción de cargas moderadas el modelo puede ser construido con cualquier material que se pueda considerar como elástico; las deflexiones se pueden determinar con suficiente exactitud por la teoría clásica de la elasticidad lineal. En la Tabla 1.4, se muestran los requisitos de similitud para modelos elásticos, los factores

independientes escogidos son el modulo de elasticidad y la longitud, todos los factores son funciones de S_E y S_L . En la literatura abundan ejemplos de modelos elásticos contruidos con resinas sintéticas o plásticos², estos materiales satisfacen solamente la condición de igualdad en la relación de Poisson´s (Ecuación [1.6]).

$$V_p = V_m \quad [1.5]$$

La ventaja de trabajar con materiales cuyos módulos de elasticidad sean menores de 7 a 15 veces los del concreto, es la facilidad para tomar las mediciones de deformaciones bajo cargas moderadas. Estos modelos solo permiten el estudio del comportamiento en el rango elástico.

²DIAZ de SMITTER, María. Análisis Experimental de un Modelo de una Estructura de Concreto Armado Realizado en Plástico. En: Boletín IMME Nos. 43-44 (julio-diciembre 1973). Pág. 68. Citado por VIDES DE LA HOZ, Félix. Metodología para Realizar Modelos de Concreto Reforzado a Escala Reducida: Teoría de Modelos. Bucaramanga, 2006, 83 h. Trabajo de Grado (Ingeniero Civil). Universidad Industrial de Santander. Facultad Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil.

Tabla 1.4 Factores de escala para modelos elásticos estáticos

Cantidades	Dimensiones	Factor de escala
Propiedades relativas al material		
Esfuerzo	FL^{-2}	S_E
Modulo de elasticidad	FL^{-2}	S_E
Relación de Poisson's	----	1
Peso específico	FL^{-3}	S_E/S_L
Deformación unitaria	----	1
Geometría		
Dimensión lineal	L	S_L
Desplazamiento lineal	L	S_L
Desplazamiento angular	----	1
Área	L^2	S_L^2
Momento de inercia	L^4	S_L^4
Cargas		
Cargas concentrada Q	F	$S_E S_L^2$
Carga distribuida lineal w	F^{-1}	$S_E S_L$
Presión uniforme	FL^{-2}	S_E
Momento torsor	FL	$S_E S_L^3$
Fuerza cortante	F	$S_E S_L^2$

1.2 PRINCIPALES PROBLEMAS RELACIONADOS CON LOS MODELOS PLÁSTICOS³

Estas son algunas características peculiares adicionales de los plásticos; el conocimiento de estas características puede ser útil en la construcción y pruebas del modelo y la interpretación de los datos.

³HARRIS, Harry; SABNIS, Gajanan. Structural Modeling and Experimental Techniques: Elastic Models – Materials and Techniques. United States of America. 2 Ed. CRC Press. 1999. Pág. 103-104.

1.2.1 Modelamiento de la fluencia en sistemas prototipo. Se ha demostrado que el comportamiento de la fluencia de los plásticos puede ser problemático en la interpretación de los datos de esfuerzo; sin embargo esto puede ser muy útil si el modelo es usado para el estudio de los efectos de la fluencia en el comportamiento del prototipo. Ross (1946) simuló el comportamiento de la influencia en estructuras de concreto reforzado utilizando refuerzos fabricados en plástico fenólico. La unidad de fluencia de ambos materiales es aproximadamente igual a un factor de escala de tiempo de 240; esto es, la unidad de fluencia de plásticos en 50 horas es igual a la unidad de fluencia del concreto en 500 días. Usando este material para la construcción de modelos de elementos de concreto reforzado, él condujo experimentos en periodos cortos de tiempo para determinar la fluencia de pandeo en columnas y para estudiar la redistribución de reacciones debido a la solución de apoyos en vigas continuas. Utilizando modelos en resinas acrílicas no plásticas, también estudió el efecto de fluencia sobre componentes horizontales de las reacciones de un arco doblemente articulado.

Un excelente estudio de la fluencia de pandeo en techos de membranas cilíndricas bajo cargas gravitacionales utilizando modelos de plexiglás, ha sido dirigido por Kordina (1964).

1.2.2 Consideraciones del coeficiente de Poisson's. Para estructuras conformadas por cerchas el requerimiento de similitud en el coeficiente de Poisson puede ser despreciable, sin embargo para estructuras tipo placas, redes y cascarones, donde la respuesta estructural es sensible al coeficiente de Poisson, el requerimiento de similitud debe ser satisfecho. Si la estructura prototipo es de acero ($\nu_P=0.3$), entonces los modelos construidos con plásticos acrílicos, con

un coeficiente de poisson de aproximadamente 0.35, serían razonablemente satisfactorios, con un pequeño error en el cumplimiento del requerimiento de similitud. Sin embargo, si esto es requerido para el modelo de una estructura de concreto ($V_p=0.15 - 0.20$), entonces esto puede causar alguna discrepancia entre las respuestas del prototipo y modelo, dependiendo del grado de sensibilidad de la respuesta estructural con respecto al coeficiente de poisson.

1.2.3 Variación de espesores en formas comerciales. El proceso de formado puede causar variaciones significativas de espesores en formas comerciales de plásticos que pueden ser mas grandes como $\pm 15\%$ del espesor nominal. Si no se considerado en el análisis, esto puede afectar seriamente la interpretación de los datos de prueba. Por tanto, si son usadas formas comerciales se debe tener cuidado de trabajar con la mejor calidad disponible, para minimizar estas variaciones.

1.3 ERRORES EN MODELOS⁴

Los errores en modelos estructurales se presentan en cualquiera de los pasos principales de este proceso: planeación, fabricación, cargas, recolección de datos e interpretación.

⁴VIDES DE LA HOZ, Félix. Metodología para Realizar Modelos de Concreto Reforzado a Escala Reducida: Teoría de Modelos. Bucaramanga, 2006, 83 h. Trabajo de Grado (Ingeniero Civil). Universidad Industrial de Santander. Facultad Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil.

Tabla 1.5 Posibles errores en modelamiento de estructuras

Fase del proceso	Errores posibles
Planeación	<ul style="list-style-type: none"> - Errores en análisis dimensional - Fallas en el reconocimiento de variables relevantes - Errores en la proporción del modelo - Escogencia inadecuada del material <p>En la fase de la planificación, el ingeniero a cargo del estudio de modelos debe definir el alcance y, así, la exactitud aceptable del resto del proyecto. Los errores en esta fase son de gran preocupación y deben evitarse.</p>
Fabricación	<ul style="list-style-type: none"> - Geometría - Propiedades de los materiales <p>En el proceso de fabricación la exactitud en la geometría o en las dimensiones es fundamental, sobretodo en la colocación del refuerzo.</p>
Cargas	<ul style="list-style-type: none"> - Condiciones límites - Magnitud de carga - Dirección de carga - Distribución de carga - Tiempo de carga - Efectos de gravedad en la carga <p>La fase cargante es igualmente importante, porque la cargas del prototipo debe reproducirse tan fielmente como sea posible</p>
Instrumentación y recolección de datos	<ul style="list-style-type: none"> - Errores en la escritura y la lectura de los datos - Errores en los calibradores eléctricos - Errores en instrumentos que se ayudan con presiones - Errores de medidas por imprecisiones de los instrumentos
interpretación	<ul style="list-style-type: none"> - Errores en la interpretación de graficas, o en la opiniones personales

Los errores enumerados en la Tabla 1.5 caben en una de las tres categorías generales de errores: equivocaciones, errores aleatorios y errores sistemáticos.

Equivocaciones. Estos son errores que no tienen ningún lugar en los experimentos científicos, deben eliminarse con el cuidado y repetición de las medidas. Las equivocaciones frecuentes pueden ser: usar una lógica incorrecta en el análisis dimensional, leer mal un instrumento, montar un calibrador en una posición incorrecta, cometer errores en la colocación de cargas.

Errores aleatorios. Son asociados con el hecho que un fenómeno aleatorio bajo determinadas circunstancias no siempre lleva el mismo resultado, entre los diferentes resultados hay regularidad estadística, es decir son errores que ocurren por la unión de varias circunstancias que se presentan sin planearse.

Errores sistemáticos. Son errores de magnitud constante, a los que simplemente se les puede hacer una corrección y hacer desaparecer el error. Si cambia en la magnitud durante el curso del experimento, la relación de las medidas, uno a otro, es alterada. Un error sistemático típico es por ejemplo la calibración incorrecta de un instrumento de la medición.

1.3.1 Recomendaciones para minimizar errores en modelos

- Exactitud en la fabricación y en las dimensiones. La exactitud en las dimensiones es necesaria porque afecta la fabricación de los modelos, en la hechura de formaletas y en el proceso de construcción. En general se considera aceptable, tener una tolerancia de $\pm 5\%$. Para esto:
 1. Las formaletas deben ser exactas y además construirse de un material que no cambie de dimensiones con el tiempo o con los cambios de ambiente. Ej. aluminio (para modelos muy reducidos).
 1. En la construcción de modelos se pueden presentar errores en las dimensiones de los espesores. Deben minimizarse para obtener exactitud en los resultados.

- Exactitud en las propiedades de los materiales. En caso de modelos elásticos puede pasarse por alto algunos requerimientos de similitud sin afectar la exactitud.

Las propiedades mecánicas, son sumamente sensibles en los ensayos y aumenta con la disminución de tamaño del espécimen. Los errores asociados con estas propiedades son clasificados como de fabricación o de ensayos. Los efectos de encogimiento y de flujo plástico no son fáciles de simular, aunque los modelos y prototipos tengan construcciones idénticas.

- Exactitud en los ensayos y las mediciones. El éxito de un estudio de modelo depende de los equipos de ensayo, la necesidad que las cargas del prototipo sean bien representadas. Además de la carga, la instrumentación debe ser considerada en la exactitud de los resultados, se debe tener mucho cuidado en la ubicación de los equipos de medidas. El éxito total de los ensayos dependerá de la precisión con que sean tomadas las medidas. Las cargas deben ser medidas con celdas de cargas, que tienen una precisión del rango de 0.5%, la exactitud en las medidas de los desplazamientos puede llegar a ser de 0.000025mm de acuerdo al LDTVs (linear variable differential transformers) utilizado y en las medidas de deformaciones o curvaturas, los calibradores eléctricos de deformaciones son los más usados. La exactitud en estas mediciones depende también de la selección del material para el modelo.

- Exactitud en la interpretación de los resultados de los ensayos.

La experiencia indica que los modelos de resistencia predicen el modo de falla y la carga última de una estructura prototipo con una tolerancia del orden de 10%. Este grado de exactitud depende de un conocimiento íntimo de las propiedades de los materiales del modelo como se describió anteriormente.

Cuando se interpretan resultados experimentales, es preciso compararlos con alguna respuesta teórica, teniendo en cuenta que cuando se presenta alguna diferencia se debe analizar porque el análisis teórico no concurre al mismo resultado de la experimentación. Si no podemos definir el porqué de esta desavenencia, especialmente en estructuras de concreto se procede a trabajar con el resultado experimental.

Se encuentran dificultades graves en los resultados de la prueba, así como en su interpretación sólo cuando las propiedades materiales de los modelos se desvían de las propiedades del prototipo a una magnitud tal que se cambian los modos de falla; por ejemplo, esto podría pasar si la resistencia a tensión del material del modelo es suficientemente alta para prevenir una falla a tensión esperada.

- Fiabilidad global de resultados en el modelo. Un aspecto desafortunado en los estudios de modelos es que hay suficiente tiempo y dinero para una sola o pocas pruebas. Para evitar pérdida de exactitud como resultado de errores sistemáticos en cualquiera de las técnicas empleadas, es recomendable seguir los siguientes pasos:















- Calibrar instrumentos antes de las pruebas
- Chequear la simetría
- Comparar con resultados analíticos
- Observar las tendencias en los datos
- Observaciones del comportamiento en su totalidad
- Repeticiones en algunas pruebas

En modelos diseñados correctamente, la relación entre el valor teórico y el valor experimental de resistencia, no debe ser mayor del 10% para considerarla como una buena aproximación.

2. ESTADO DEL ARTE

Para la realización del modelo a escala del viaducto Puyana Puyana se investigó algunos modelos a escala de varios puentes realizados en distintas universidades para diferentes tipos de análisis, algunos de ellos para pruebas de viento, de sismo y cargas en movimiento.

Tabla 2.1 *Recopilación de modelos hechos a escala*

Nombre del puente	Localización	Tipo de puente	Tipo de modelo	Objeto del modelo	Escala	Materiales	Imagen del Puente	Imagen del modelo	Referencias
Puente Vega de Asa	ubicado a 750 kilómetros al suroeste de la ciudad de Caracas, Venezuela	Estructura metálica apernada	Dinámico	Realiza pruebas de Monitoreo de Salud Estructural	1/20	Perfiles de aluminio estructural			8º CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERIA MECANICA Cusco, 23 a 25 de Octubre de 2007
Puente sobre el estrecho de Tacoma	Estrecho de Tacoma EE.UU	Puente colgante	Efectos de viento	Fijar las bases de la metodología experimental para el estudio de puentes bajo cargas de viento	1/200	Acero			UNIVERSIDADE DA CORUÑA ESCOLA TÉCNICA SUPERIOR DE ENXEÑEIRO DE CAMIÑOS, CANAIS E PORTOS - ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y OPTIMIZACIÓN AEROELÁSTICA DE PUENTES COLGANTES EN ENTORNOS DE COMPUTACIÓN DISTRIBUIDA - TESIS DOCTORAL -CAPITULO 2 - Marzo de 2006
Puente sobre el Canal de Chacao	Canal de Chacao, Chile	Puente colgante	Efectos de viento	Estudio del comportamiento del Puente bajo cargas de viento	1/215	Acero			ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y OPTIMIZACIÓN AEROELÁSTICA DE PUENTES COLGANTES EN ENTORNOS DE COMPUTACIÓN DISTRIBUIDA - TESIS DOCTORAL -CAPITULO 2 - Marzo de 2006
Puente sobre el Estrecho de Akashi.	Estrecho de Akashi, Japón	Puente colgante	Efectos de viento	Estudio del comportamiento del Puente bajo cargas de viento	1/100	Acero			ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y OPTIMIZACIÓN AEROELÁSTICA DE PUENTES COLGANTES EN ENTORNOS DE COMPUTACIÓN DISTRIBUIDA - TESIS DOCTORAL -CAPITULO 2 - Marzo de 2006
Puente Puerto Salgar	Puerto Salgar, Colombia	Estructura metálica apernada	Directo	La evaluación por confiabilidad estructural de los elementos principales de uno de los puentes de acero más importantes de la red vial nacional de Colombia.	1/25	Acero y madera			Ingeniería y Universidad, enero-junio 2006, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
Puentes de tablero rígido pretensados en concreto	China	Estructura en concreto pretensado	Directo	Evaluación de distintas sollicitaciones de carga sobre la estructura	1/4	Concreto			Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084 China
Puente Cajamarca	Cajamarca, Colombia	Estructura metálica apernada	Directo	La evaluación por confiabilidad estructural de los elementos principales de uno de los puentes de acero más importantes de la red vial nacional de Colombia.	1/50	Acero			Ingeniería y Universidad, enero-junio 2006, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

3. ESPECIFICACIONES VIADUCTO PUYANA PUYANA

Figura 3.1 Foto en perspectiva del viaducto la Flora.



Los problemas de congestión vial en la carrera 15 y su punto de conexión con la Autopista a Floridablanca preocupan desde hace años. Una primera solución, que se empezó a plantear en 1990, fue la construcción de la Transversal Oriental, la cual llevó a que en 1995 se empezara a construir el Viaducto de la Flora para conectar la meseta con Floridablanca, por encima del eje central principal de la 15.

La Flora se convierte en Viaducto Armando Puyana Puyana

Mediante el Acuerdo 035 de 2007, el Concejo de Bucaramanga rinde homenaje al fundador del Instituto Caldas y la Universidad Autónoma de Bucaramanga (UNAB).

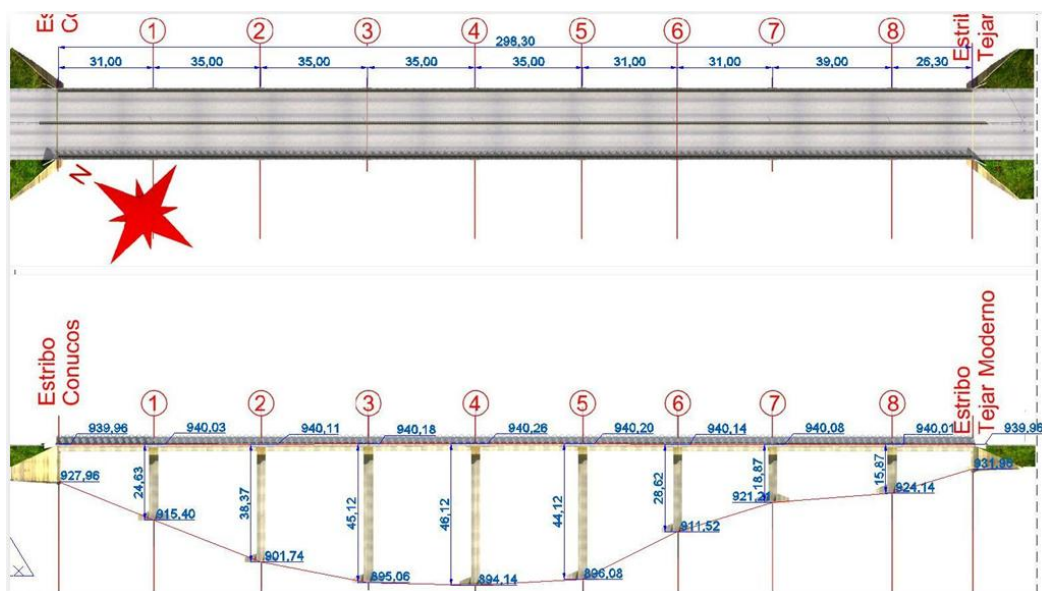
El Concejo Municipal de Bucaramanga, por iniciativa del concejal Carlos Enrique Virviescas Pinzón, determinó rendirle un tributo a Don Armando Puyana Puyana por sus aportes al desarrollo de la región, al establecer

que el puente vehicular y peatonal ubicado sobre la Quebrada La Flora pase a llamarse Viaducto "Armando Puyana Puyana" (ver Figura 3.1).

3.1 ESPECIFICACIONES DE LA ESTRUCTURA

El viaducto la flora es una estructura en concreto pretensado, construido con un sistema de pila y losa, con una longitud total de 298.3 metros. Consta de 2 estribos (estribo Conucos al norte y estribo tejar moderno al sur) y 8 pilares. El tablero está dividido en tres secciones lo que da como resultado cuatro juntas ubicadas de la siguiente forma, dos en los estribos y las otras 2 en los ejes 3 y 6 (ver Figura 3.2).

Figura 3.2 Planta y perfil del viaducto la Flora.

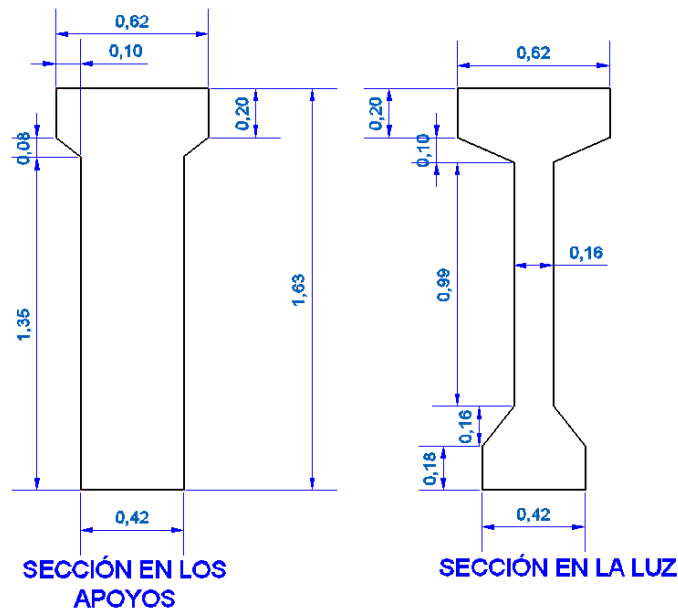


La altura aproximada es de 46 metros en el pilar más alto que corresponde al eje 4, y la luz más grande la encontramos entre los ejes 7 y 8 de 39 metros. Tiene un ancho total de 25 metros y consta de tres carriles y sendero peatonal en cada sentido.

3.2 DIMENSIONES DE LA ESTRUCTURA

3.2.1 Vigas. Las vigas están conformadas por los perfiles mostrados en la Figura 3.3 y construidas en concreto pretensado, son vigas simplemente apoyadas, en total son 10 vigas excepto en el tramo comprendido entre los ejes 7 y 8, el cual tiene 11 vigas debido a la longitud de su luz de 39m.

Figura 3.3 Secciones vigas viaducto la Flora.

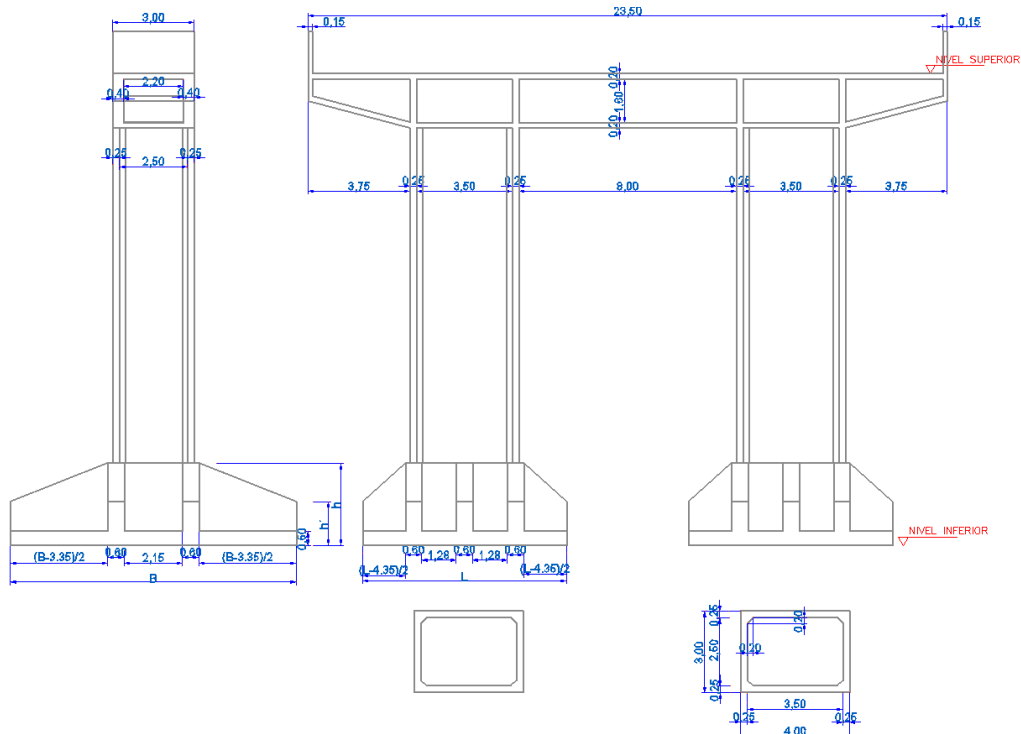


3.2.2 Pilares. Como ya mencionamos anteriormente el puente consta de 8 pilares los cuales varían geoméricamente su altura según el perfil del terreno. En la Tabla 3.1 se pueden observar las dimensiones de los pilares, así como las secciones principales (ver Figura 3.4).

Tabla 3.1 Dimensionamiento pilares viaducto la Flora.

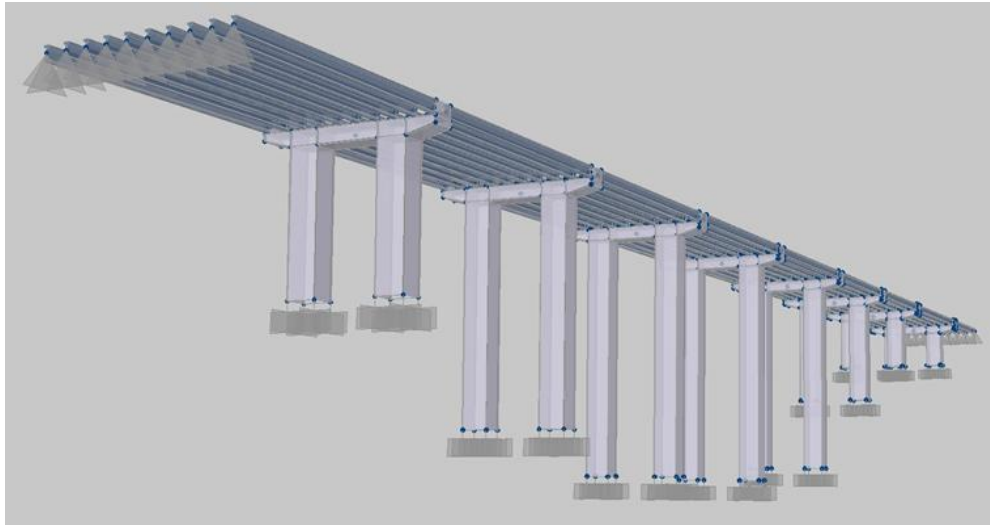
VARIABLES DE LAS PILAS				DIMENSIONES DE LA ZAPATA			
EJE	NIVEL SUPERIOR	NIVEL INFERIOR	H(m)	B	L	h	h'
1	937.91	915.41	22.51	8.00	7.00	2.50	1.30
2	937.99	901.74	36.25	9.50	7.50	2.75	1.50
3	938.10	895.06	43.04	10.50	7.50	3.00	1.60
4	938.14	894.14	44.00	10.50	7.50	3.00	1.60
5	938.08	896.08	42.00	10.00	7.50	3.00	1.60
6	938.02	911.52	26.50	8.00	7.00	2.50	1.30
7	937.96	921.21	16.75	7.00	6.00	1.75	1.00
8	937.89	924.14	13.75	7.00	6.00	1.75	1.00

Figura 3.4 Secciones pilares viaducto la Flora.



4. MODELAMIENTO DE LA ESTRUCTURA MEDIANTE UN SOFTWARE

Figura 4.1 *Modelo en 3D del Viaducto la Flora*



Para poder analizar los resultados obtenidos en el modelo experimental, es necesario comparar estos con los resultantes de un método analítico, para este modelamiento fue necesario utilizar un software, que nos permitiera hacer un análisis exacto y muy aproximado al modelo real. En la Figura 4.1 se observa el modelo general del puente en 3D. En este caso, como solo se desean evaluar las respuestas del comportamiento de la estructura en el campo elástico, se realizara un análisis de los desplazamientos en el pórtico mas crítico de la estructura (Eje 4), así como la deflexión máxima de la viga (entre los ejes 3 y 4).

Los resultados obtenidos de los modelos analíticos se encuentran consignados en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Fuerzas aplicadas y desplazamientos obtenidos del modelo analítico.

	F (KN)	D (cm)
Viga	500	12.3
Pórtico <small>sentido X</small>	1000	2.13
Pórtico <small>sentido Y</small>	5000	8.97

Para más detalles del modelamiento analítico, ver el anexo 4 “MODELAMIENTO DE LA ESTRUCTURA MEDIANTE UN SOFTWARE”

5. MODELO EXPERIMENTAL

5.1 DEFINICIÓN DE LA ESCALA PARA EL MODELO.

Para definir la escala de un modelo hay varios factores que se deben tener en cuenta; uno de ellos está directamente relacionado con el dimensionamiento del mismo ya que depende de sus secciones límites (máximas y mínimas), otro factor que se debe tener en cuenta es el tipo de modelo experimental que se desea realizar (ver Tabla 1.1).

En el caso de modelamiento de puentes que se observan en la Tabla 2.1 estos manejan escalas comprendidas entre 1:20 y 1:100, este intervalo puede variar para casos especiales de estructuras de grandes dimensiones que imposibiliten por factores constructivos su realización.

El costo en su construcción también influye en la escala que se escoja para el modelo, por este motivo se toma la decisión de realizar un análisis únicamente del pórtico más crítico (eje 4) y la viga comprendida entre los ejes 3 y 4 de la estructura.

La escala escogida para el modelo fue de 1:25 analizando los factores que se mencionaron y también previendo complicaciones constructivas que se pudieran presentar si se elegía una escala menor y también dificultades en la lectura de los datos de desplazamientos obtenidos en éste.

Debido a que las pruebas que se van a realizar en el modelo son mediciones de desplazamientos de la estructura en su rango elástico, sin llevar este a la falla, mediante la aplicación de cargas puntuales, resulta muy conveniente la utilización de esta escala, no solamente por

su facilidad constructiva, sino también por la facilidad de realizar la calibración del modelo. Para ver en más detalle el proceso de escalamiento del modelo ver Anexo 5:“*METODOLOGIA PARA ESCALAR UN MODELO REAL*”

5.2 MATERIALES ÚTILES PARA EL MODELAMIENTO.

Teniendo en cuenta que el modelo corresponde a un modelo elástico, en el cuál se busca conocer análisis de desplazamientos en el rango elástico, se optó por utilizar un material de fácil manipulación con propiedades mecánicas similares a las del concreto en el rango mencionado. Debido a las medidas del prototipo y la complicación en el proceso constructivo no se utilizó micro concreto, ya este es idóneo para modelos inelásticos que simulen al ciento por ciento el comportamiento del prototipo inclusive en los rangos inelásticos hasta llegar a la falla, caso contrario a los objetivos de este proyecto.

En la Tabla 5.1⁵ se muestran algunos materiales que pueden ser útiles en la construcción de modelos elásticos, con algunas de sus propiedades mecánicas de interés en estos estudios.

5.2.1 Material escogido para el modelo. Con la asesoría de un experto en materiales, el profesor JOSE CARLOS GUTIERREZ de la escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander, se optó por utilizar una resina de polyester mezclada con carbonato de calcio. (Ver Figura 5.1).

⁵HARRIS, Harry; SABNIS, Gajanan. Structural Modeling and Experimental Techniques: Elastic Models – Materials and Techniques. United States of America. 2 Ed. CRC Press. 1999. Pág. 103-104.

Tabla 5.1 Propiedades de algunos materiales plásticos utilizados para la fabricación de modelos a escala.

Properties of Some Plastics Suitable for Structural Models										(continued) Properties of Some Plastics Suitable for Structural Models			
Plastic	Thermal Characteristic	Available Shapes	Tensile Strength, psi	Compressive Strength, psi	Flexural Strength, psi	Modulus of Elasticity, psi	Poisson's Ratio	Elongation at Rupture Percent	Specific Gravity	Softening Temperature, °C	Coefficient of Expansion, in./in./°C	Machinability	Joining Characteristics
Cellulose nitrates (celluloid)	Thermoplastic	Sheets, rods, and tubes	3000-7000	3000-10,000	3000-17,000	65-400 × 10 ³	0.40-0.42	40-90	1.35-1.70	70-100	11-17 × 10 ⁻⁵	Excellent	Can be cemented with solvent cements and ethyl acetate (acetone)
Cellulose acetates (plasticite)	Thermoplastic	Sheets, rods, and tubes	2250-11,000	2200-10,900	2200-11,500	65-260 × 10 ³	0.40		1.24-1.32	250-350	8-16 × 10 ⁻⁵		Can be cemented with solvent cements and ethyl acetate (acetone)
Methyl methacrylates* (Plexiglas, Lucite Peropex)	Thermoplastic	Sheets, rods, and tubes	7000-11,000	12,000-20,000	3000-17,000	420-500 × 10 ³	0.35-0.38	3-10	1.17-1.20	80-160	5-9 × 10 ⁻⁵	Excellent	Can be cemented with commercial adhesives or a solution of the plastic and chloroform
PVC (Boltaron)	Thermoplastic	Sheets, rods, and tubes	5000-10,000	8000-13,000	3500-13,500	350-600 × 10 ³	0.38-0.40	85-100	1.38-1.40	80-105	5-8 × 10 ⁻⁵	Excellent	Can be welded with PVC epoxy cements
Polyethylenes (Alkathene)	Thermoplastic	Sheets, rods, tubes, molding powders	1000-5000	—	2000-7000	17-80 × 10 ³	0.45-0.50		0.91-0.96	85-127	9-18 × 10 ⁻⁵		Can be cemented with rubber cements
Natural or synthetic rubber	Thermoplastic	Sheets and extruded shapes	1000-4000	—	—	200-350	0.50	300-800	0.95-1.20	70-75	9-12 × 10 ⁻⁵		(Solvents are acetone, and cellulosive)
Polyester resins (Marco, Palatal)	Thermosetting	Casting resins	5000-6000	12,000-20,000	—	300-400 × 10 ³	0.35-0.45	2	1.20-1.35	80-90	3-6 × 10 ⁻⁵	Fair	Can be cemented with epoxy cements
Epoxy resins (Epon, Araldite)	Thermosetting	Casting resins	5000-12,000	15,000-30,000	—	430-600 × 10 ³	0.33-0.45	5-10	1.20	—	3-9 × 10 ⁻⁵	Good	

Figura 5.1 Resina polyester. Apariencia física.



El material se seleccionó debido a la ventaja de que la mezcla se encuentra en estado líquido, facilitando así la conformación de los elementos del modelo utilizando moldes previamente elaborados, que cumplen con las dimensiones necesarias para realizar el modelamiento a escala en cuestión.

Para fabricar la resina se realizaron varios ensayos con el fin de obtener una mezcla con buenas propiedades de homogeneidad, así mismo se realizaron pruebas mecánicas, en un principio para escoger las proporciones que generaran mayor resistencia de la resina, y seguido a esto se efectuaron para caracterizar de una mejor forma la mezcla previamente seleccionada. Los resultados de estos ensayos se ven en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Módulos de elasticidad de la resina polyester.

	E (Mpa)	σ_u (Mpa)
Compresión	2960	70
Tensión	3878	30

Para mayor información remítase a los anexo 2. “FABRICACIÓN DE MATERIALES PARA EL MODELO” y anexo 3 “CARACTERIZACION DEL MATERIAL”.

5.2.2 Otros materiales para el proceso constructivo. Para la elaboración de las piezas a escala se optó por la utilización del balsa (Ver Figura 5.2), que es una madera de baja densidad, fácil de trabajar, lo que agilizó la construcción de las formas necesarias para la posterior fabricación de los elementos con la resina.

Figura 5.2 *Moldes fabricados en balsa.*



El gel de moldeo es una mezcla de gelatina sin sabor con agua y glicerina (Ver Figura 5.3), que en su apariencia física se asemeja al gel balístico. Este se utiliza para fabricar los moldes en los cuales se funde la resina. Lo que hace este material es copiar la forma del elemento que se desea fabricar. Para esto se puede utilizar modelos en balsa, plastilina, y cualquier material fácil de esculpir.

Figura 5.3 *Gel de moldeo en estado líquido y sólido.*



El proceso de fabricación y utilización de este gel se encuentra con más detalle en el anexo 2. “FABRICACIÓN DE MATERIALES PARA EL MODELO”.

5.3. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO.

Una vez que las piezas fueron fundidas, se procedió a ensamblarlas utilizando una masilla de resina (Ver Figura 5.4), y para darle un mejor acabado al modelo se pulieron los imperfectos. Ver anexo 6 “PROCESO CONSTRUTIVO”. En la Figura 5.5 se aprecia el pórtico ensamblado del eje 4 del viaducto.

Figura 5.4 *Ensamblaje de las piezas.*



Figura 5.5 *Pórtico ensamblado.*



6. ENSAYOS AL MODELO

Figura 6.1 *Pórtico ensamblado.*



Para realizar las pruebas estáticas al modelo, se cuenta con el laboratorio de materiales de la escuela de ingeniería civil (Ver Figura 6.1). En él, se debe realizar el montaje del pórtico para su ensayo en el muro de cargas, donde se le aplicará dos tipos de cargas estáticas; una en sentido horizontal en dirección X y otra en la dirección Y. Se aplicará una carga vertical para el caso de la viga.

Las fuerzas a aplicar y los desplazamientos esperados se encuentran en la Tabla 6.1, estos resultados serán comparados con los resultados

contenidos en el anexo 4. “Modelamiento de la estructura mediante un software” obtenidos del modelo analítico.

Tabla 6.1 *Fuerzas aplicadas y desplazamientos esperados.*

	F_{real} KN	$F_{escalada}$ Kgf	$D_{esperada}$ mm
Viga	500	11.5	4.9
Pórtico <small>sentido X</small>	1000	23	0.85
Pórtico <small>sentido Y</small>	5000	115	3.6

6.1 PROCEDIMIENTO.

Las cargas serán aplicadas por un gato hidráulico (Ver Figura 6.2) el cual se encuentra sincronizado con un computador que recolecta la información del ensayo.

Figura 6.2 *Gato hidráulico del Laboratorio de materiales.*



Estas cargas a aplicar no son los suficientemente altas como para llevar el modelo a la rotura, para garantizar que el modelo experimental se encuentre solicitado en el rango elástico.

6.2 PROBLEMAS PARA LOS ENSAYOS.

Los ensayos no se pudieron realizar antes de la fecha de entrega de este trabajo, debido a que el equipo necesario (el gato hidráulico) para llevar a cabo las pruebas experimentales, carece de un enfriador que previene el daño del mismo, lo que imposibilita su utilización. Por éste motivo, la fecha de la realización de dichos ensayos, no se encuentra aún definida.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Para la selección del material del modelo a escala, se debe tener muy claro el tipo de ensayos y análisis que se desean realizar, ya que de esto dependerá la confiabilidad y exactitud en la obtención e interpretación de los datos que se buscan. En este estudio se optó por un material que simulara las características del concreto en el rango elástico, si se hubiese proyectado el modelo realizado como uno inelástico, hubiese sido necesario utilizar otro material, como el micro-concreto.
- Para caracterizar un material es necesario realizar varios tipos de ensayos, con un alto número de probetas para cada uno, lo cual garantice una mayor confiabilidad en la recolección de datos de sus propiedades mecánicas. En esta investigación se realizó un número determinado de pruebas debido al costo y al tiempo que esto implica, pero se recomienda efectuar más ensayos que corroboren los obtenidos.
- Según los resultados de la caracterización de la resina obtenidos, se garantiza que este material presenta un comportamiento elástico, lo que lo hace idóneo para la fabricación de modelos elásticos.
- La escala influye en gran medida, para la comodidad al momento de la elaboración y en la exactitud en la hora de la medición. Esta se encuentra limitada por varios factores, tales como: las dimensiones de la estructura que se requiere modelar, el tipo de

análisis que se desee efectuar, el costo para su elaboración, el sitio y los equipos necesarios para su construcción y la realización de las pruebas.

- La selección de la escala para este modelo, fue determinada analizando principalmente el factor económico y el factor constructivo. Para el primero se presentaba la limitante de los recursos disponibles y para el segundo se analizaron las dimensiones mismas del modelo.
- Antes de utilizar cualquier material para la construcción del modelo a escala, sobre todo aquellos que requieren ser elaborados mediante mezclas, se recomienda realizarles ensayos en pequeña escala, que garantice la conformación del material esperado. Esto con el fin de evitar sobrecostos en el presupuesto disponible.
- Cuando se requiera realizar un número elevado de piezas iguales para conformar la geometría de la estructura, se recomienda utilizar como formaleta un material distinto al gel de moldeo, ya que este presenta adherencia con la resina después de cada fundida, lo que dificulta la extracción de las piezas ya fundidas. Además de esto, se recomienda convertir el proceso de fundición en actividades paralelas utilizando varias formaletas, con el fin de optimizar tiempos en la construcción.
- Se recomienda contar con la asesoría de un experto para cada uno de los subprocesos de la construcción del modelo a escala. Como se aprecia en este trabajo, se conto con la asesoría de los

Profesores Esperanza Maldonado y Gustavo Chio Cho en el enfoque del proyecto, del Profesor José Carlos Gutiérrez para la selección y elaboración del material, y con el Técnico Jaime Alberto Cadena para la caracterización del material.

- Con este trabajo se establecieron los primeros parámetros en lo concerniente a elaboración de modelos a escala y se aprecia todo el trabajo que conlleva un análisis experimental, siendo el expuesto en este trabajo uno de los más simplificados que corresponde al caso de modelos elásticos estáticos.
- Este trabajo puede ser utilizado como una guía para las personas que deseen emprender proyectos de investigación utilizando modelos a escala. Se plantearon las bases y el proceso para llevar a cabo el escalamiento de una estructura sin importar la geometría y el tipo de análisis a realizar.
- El modelo a escala construido con la resina, permite realizar análisis estáticos en el rango elástico, es decir permite aplicar cargas en cualquier dirección y en cualquier punto de la estructura, para medir sus deflexiones.
- Para los ensayos proyectados, las cargas a ser aplicadas corresponden a cargas puntuales, esto se debe a la facilidad de simular estas cargas con el equipo que se cuenta. Esto no implica decir que la estructura no pueda ser ensayada bajo la acción de otros tipos de carga, siempre y cuando no sobrepasen el límite elástico del modelo.

- Esta investigación no abarca en totalidad el comportamiento que se pudiera presentar en la estructura real, sin embargo constituye un primer paso, para la elaboración de modelos más complejos que simulen los comportamientos no lineales de la estructura.

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS:

HARRIS, Harry; SABNIS, Gajanan. Structural Modeling and Experimental Techniques. United States of America. 2 Ed. CRC Press. 1999.

TESIS:

VIDES DE LA HOZ, Felix. Metodología para Realizar Modelos de Concreto Reforzado a Escala Reducida: Teoría de Modelos. Bucaramanga, 2006, 83 h. Trabajo de Grado (Ingeniero Civil). Universidad Industrial de Santander. Facultad Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil.

NIETO MOURONTE, Félix. Análisis de sensibilidad y optimización aeroelástica de puentes colgantes en entornos de computación distribuida: capítulo 2, El flameo en puentes de gran vano. A Coruña, Marzo de 2006. Tesis Doctoral. Universidade da Coruña. Escola técnica superior de enxeñeiros de camiños, canais e portos.

REVISTAS, FOLLETOS, ARTICULOS Y NOTAS:

Edgar Eduardo Muñoz Díaz, Federico Núñez, Wilson Rodríguez Calderón, Camilo Otálora Sánchez, Daniel Mauricio Ruiz Valencia.

Evaluación por confiabilidad estructural de puentes en acero apoyada en monitoreo e instrumentación. 16 de marzo de 2006.

SIMPOSIOS, SEMINARIOS, CONFERENCIAS Y PONENCIAS Y APUNTES DE CLASE:

Laya Pereira, A; Méndez Orellana, J. Determinación experimental de los parámetros dinámicos del modelo a escala del puente vega de asa. En: 8º Congreso iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Cusco, 23 a 25 de Octubre de 2007.