

# Modelos de microconcreto para la enseñanza del comportamiento de estructuras de hormigón reforzado

Jairo Uribe Escamilla\* y Carlos Alberto Rodríguez Flórez\*\*

Para el ingeniero estructural es fundamental entender el comportamiento de las estructuras ante las diversas solicitaciones a que se ven sometidas. En el caso del hormigón reforzado, esto se puede lograr de manera económica mediante el uso de modelos directos a escala reducida. Infortunadamente, en nuestro medio muy pocas veces se utiliza en la enseñanza esta excelente herramienta, por falta de conocimientos sobre cómo hacer los modelos y de equipos que faciliten su construcción y ensayo. Precisamente por eso en la Escuela Colombiana de Ingeniería se desarrolló un laboratorio de modelos de microhormigón con el fin de facilitarles el aprendizaje a sus alumnos y aprovechar la experiencia adquirida para ayudar a otras universidades en el desarrollo de sus propios laboratorios. Se espera contribuir de este modo a mejorar la enseñanza de la ingeniería estructural en el país. En este artículo, fruto de la convocatoria interna de proyectos de investigación hecha por la Escuela en 1999, se presentan los equipos diseñados y los resultados obtenidos hasta agosto de 2003 en ensayos de materiales, vigas, columnas, pórticos y bóvedas. Éstos demuestran que con inversiones relativamente modestas es posible apreciar en forma cualitativa las diferencias de comportamiento de las estructuras de concreto reforzado causadas por cambios en los parámetros de diseño.

\* Ingeniero civil de la Universidad Nacional de Colombia, MSc., Ph.D., profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

\*\* Ingeniero civil de la Universidad Nacional de Colombia, MIC, profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

## DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

### Planteamiento del problema

La formación del ingeniero estructural requiere el cabal entendimiento de cómo se comportan las estructuras, dependiendo de las solicitaciones, del sistema estructural empleado y de los materiales que la constituyen.

La anterior afirmación es aún más cierta hoy en día, cuando los adelantos en computación electrónica han tergiversado en muchas ocasiones el papel del ingeniero calculista en el desarrollo de un proyecto y llevado a pensar que la enseñanza de la ingeniería estructural debería limitarse al aprendizaje de cuáles son los programas comerciales más apropiados y a su manejo mecánico, para beneficio de los futuros empleadores.

Uno de los mejores métodos de enseñanza en el área de las estructuras para incentivar la imaginación y el interés, así como para satisfacer la curiosidad de los estudiantes, es el uso de modelos físicos que les per-

mitan a los alumnos concebir una estructura, calcularla, construirla, ensayarla y evaluar los resultados. Las ventajas en economía, en magnitud de cargas de ensayo, en dimensiones de equipos de prueba que ofrece el empleo de modelos a escala

Uno de los mejores métodos de enseñanza en el área de las estructuras para incentivar la imaginación y el interés, así como para satisfacer la curiosidad de los estudiantes, es el uso de modelos físicos que les permitan a los alumnos concebir una estructura, calcularla, construirla, ensayarla y evaluar los resultados.

reducida, así como los progresos en técnicas de medición y en materiales para fabricarlos, hacen que éstos sean las muestras más usadas en el análisis experimental. Es así como universidades de prestigio en Estados Unidos han enfrentado el problema señalado atrás. En todas ellas se conside-

ra que el entendimiento del comportamiento físico de las estructuras, obtenido mediante el estudio de modelos físicos, es invaluable.

Infortunadamente, en nuestro medio muy pocas veces se utiliza esta excelente herramienta, en particular por falta de conocimientos sobre cómo hacer los modelos y de equipos que faciliten su construcción y ensayo. En la Escuela Colombiana

de Ingeniería se realizó una investigación conjunta con la Universidad de Lehigh, con base en modelos estructurales, en 1973 y 1974, pero posteriormente se suspendió dicha actividad.

### Objetivos

Dentro del plan de desarrollo de la Escuela Colombiana de Ingeniería se contempló contar con un Laboratorio de Modelos Estructurales que permitiera llevar a cabo docencia e investigación de calidad, con el fin de constituirse en líder en este campo y lograr una formación estructural excelente de los ingenieros civiles de la Escuela. Con la experiencia adquirida por este medio se pretende ayudar a otras universidades en el desarrollo de sus propios laboratorios de modelos, con el objeto de mejorar la enseñanza de la ingeniería de estructuras en todo el país y contribuir así al bienestar de la nación colombiana.

Como el material estructural más común de obras civiles en nuestro medio es el concreto reforzado, el primer paso fue diseñar un Laboratorio de Modelos de Microconcreto que incluyera diseño de mezclas, equipo básico de construcción y de ensayo, y el desarrollo de modelos que permitan entender el comportamiento ante las diversas solicitaciones de carga a que se ven sometidas las vigas, columnas, pórticos, uniones viga-columna, placas y cascarones de concreto reforzado.

Se entiende por *microconcreto* el obtenido con una mezcla de arena gruesa y material cementante; generalmente se emplea como tal el cemento Portland. El refuerzo se logra con alambres dotados de muescas, para simular el corrugado del refuerzo normal.

Una primera etapa de dicho plan de desarrollo fue el proyecto descrito en este artículo, cuyos objetivos específicos se pueden resumir así:

1. Investigar las variables que influyen en las propiedades del microconcreto obtenido con algunos materiales usados en la región de Bogotá en la fabricación de concreto reforzado. Con base en ello, formular recomendaciones de dosificación de mezclas y escalas más apropiadas para los modelos con fines didácticos.
2. Investigar los materiales disponibles en el mercado nacional que puedan servir para modelar el acero de refuerzo.
3. Diseñar y fabricar, si es del caso, los equipos que permitan adecuar estos materiales a las necesidades del modelo.

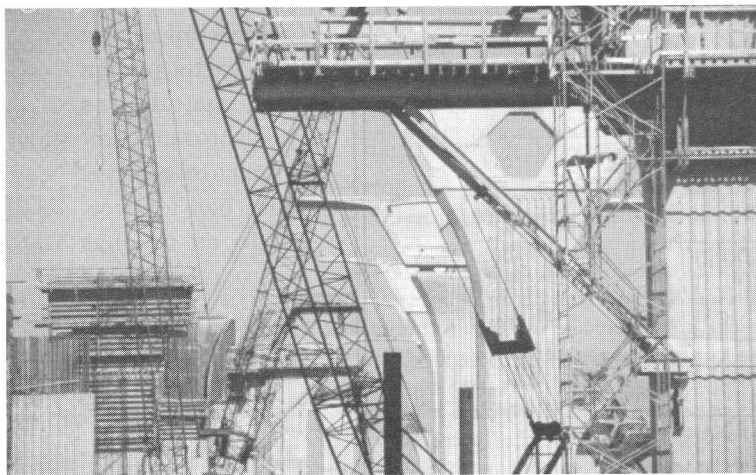
4. Estudiar los equipos y materiales para construcción y ensayo de modelos que se encuentran en el mercado, con el fin de recomendar los más apropiados para los modelos de microconcreto reforzado; diseñarlos y fabricarlos, si llegase a ser necesario o conveniente.

5. Construir y ensayar modelos directos de microconcreto reforzado en escalas reducidas de elementos de obras civiles y de algunas estructuras, con el propósito de escoger los que más contribuyan al entendimiento del comportamiento estructural por parte de los alumnos.

6. Producir finalmente una guía para la construcción y funcionamiento de un laboratorio básico para ensayo de modelos en microconcreto de elementos y sistemas estructurales empleados en obras civiles, que pueda servir a las otras universidades del país interesadas en mejorar sus planes docentes.

### ASPECTOS DEL USO DE MODELOS EN EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS

Según Harris y Sabnis(1), hay varias formas de definir y clasificar los modelos estructurales. Para hacerlo interesante en primer lugar conocer el propósito del modelo, o



sea, lo que esperamos obtener de la experimentación. Se habla entonces de modelos *elásticos, indirectos, directos, de resistencia, para instrucción, investigación y diseño*, amén de otras categorías cuyas definiciones pueden estudiarse en la referencia citada.

Los modelos propuestos y ensayados en este laboratorio son *modelos directos* por ser geoméricamente similares al prototipo en todos los aspectos y haber sido cargados de igual manera que aquél. Además, *son modelos de resistencia*, pues las cargas se han ido incrementando hasta obtener su falla.

Sin embargo, teniendo en cuenta que son *modelos para instrucción* y que su fin principal es entender diferencias de comportamiento más que extrapolar resultados para aplicárselos al prototipo, se ha dejado en segundo plano la exigencia de un cumplimiento estricto de las leyes de similitud, ya que éste complicaría innecesariamente el diseño de los modelos y exigiría equipos costosos que estarían fuera del alcance de la mayor parte de nuestras universidades para su aplicación masiva en la enseñanza.

El estudio experimental de una estructura por medio de un modelo es en sí mismo un pequeño proyecto de ingeniería que exige una secuencia lógica y ordenada de eventos, como se indica a continuación.

**MATERIALES PARA LA FABRICACIÓN DE LOS MODELOS**

**Selección de los materiales**

De acuerdo con la experiencia obtenida en el Laboratorio de Concretos de la Escuela Colombiana de Ingeniería, se decidió usar como agregados arena y grava procedentes de la mina San Pedro, de Armero (Tolima), por ser de calidad reconocida y consistente para elaboración

de mezclas. En la figura 1 se muestra la granulometría empleada para los diseños y en la figura 2 se observa la curva *Carga vs. Deformación unitaria* de un ensayo a compresión de un cilindro a escala 1:3, de 28 días.

Para la mezcla se escogió cemento Paz del Río, que en la época de iniciación de este trabajo (febrero de 2000) presentaba buenas características.

**Factores de escala**

Atendiendo las experiencias de investigaciones dirigidas en nuestro medio por el primero de los autores (Gómez, Puccini, Rey, Marín, Mendoza, Montoya y Díaz) (2 a 8), y teniendo en cuenta que cuanto menos diferentes sean las dimensiones del modelo con respecto a las del prototipo, son más confiables los resultados del estudio del modelo (1), se adoptaron como factores de escala las relaciones 1:3, 1:5 y 1:6.

**Granulometrías del microconcreto de los modelos**

Se realizó un diseño de mezcla del prototipo para una resistencia del orden de 25 MPa a los 28 días y asentamiento de 80 mm (concreto habitual en la región de Bogotá), sin aditivos, para el cual se obtuvo una pro-

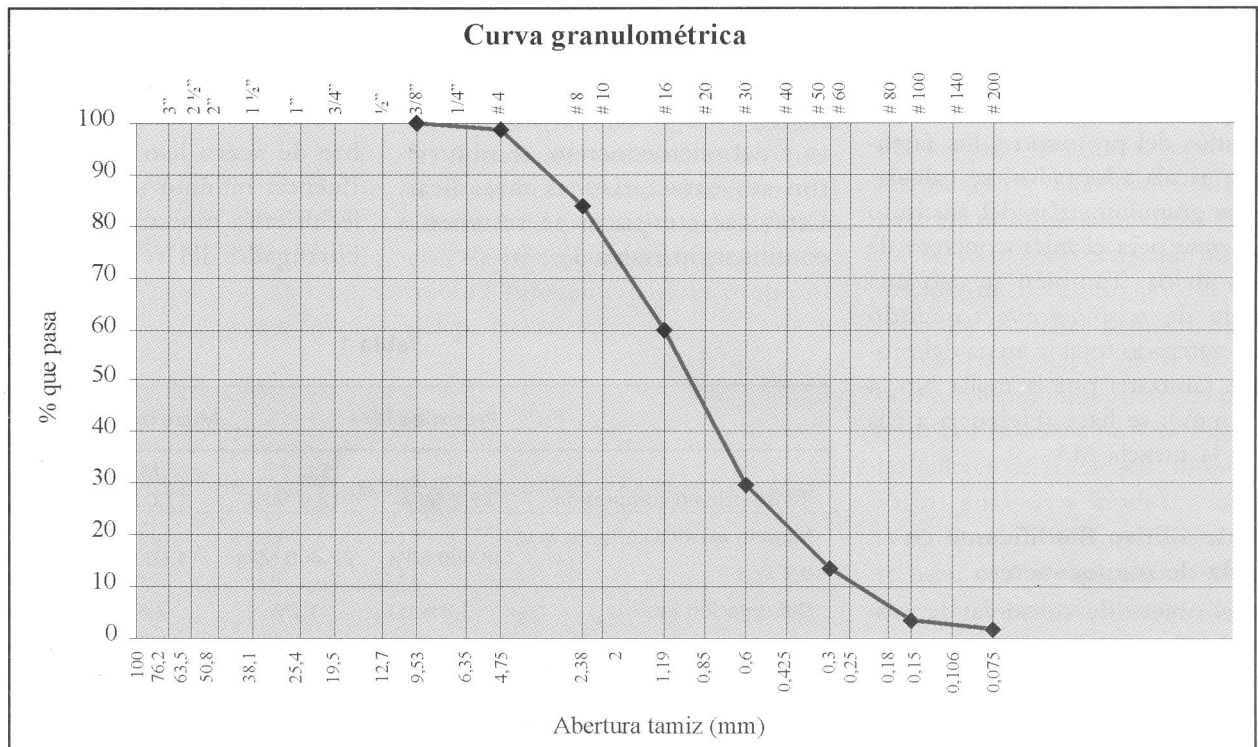


Figura 1. Granulometría de la arena empleada.

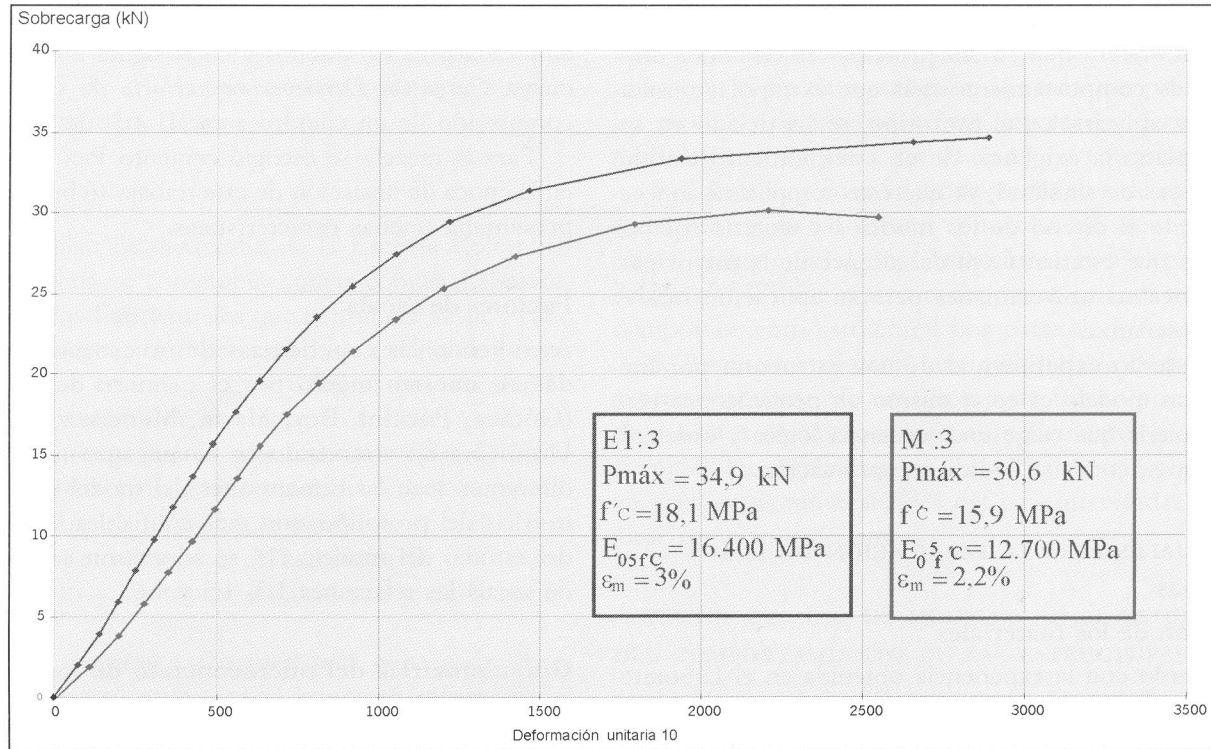


Figura 2. Ensayo de compresión; escala 1:3.

porción por metro cúbico de 3.500 N de cemento, 10.650 N de grava, 7.140 N de arena y relación agua/cemento (en peso) de 0,50.

Según las granulometrías de los agregados del prototipo y los factores de escala adoptados, se calcularon las granulometrías del sustituto de la grava para el microconcreto de los modelos. También se usó una mezcla de microconcreto tomando como agregado total la arena del prototipo tamizada por la malla No. 4 (4,76 mm.); se hace referencia a ella como la mezcla M3.

**Uso de aditivo fluidificante en mezcla de microconcreto**

Con el objeto de conservar la misma relación agua/cemento del concreto del prototipo en el microconcreto, se usó un aditivo fluidificante (Sikament H 200) en proporción del 1,5% del peso del cemento.

**Características mecánicas del concreto del prototipo y de las mezclas de microconcreto**

Con base en los diagramas *Esfuerzo vs. Deformación unitaria* del concreto y del microconcreto, se obtuvieron sus características mecánicas. Estas características se resumen a continuación (tabla 1):

**Acero de refuerzo**

Para el prototipo se supuso acero corrugado con esfuerzo de fluencia mínimo especificado de 420 MPa.

Para los modelos se utilizó alambre de acero liso con esfuerzo de fluencia mínimo sin especificar. Se le hicieron muescas para simular el corrugado del refuerzo ordinario

Tabla 1

	Prototipo	Microconcreto		
		Esc 1:3	M3	Esc 1:5
Resistencia en compresión	27,2 MPa	18,0 MPa	17,0 MPa	17,1 MPa
Modulo elástico cortante a $0,5 f'_c$	28.600 MPa	27.400 MPa	14.600 MPa	16.000 MPa
Deformación en $f'_c$ ( $\epsilon_m$ )	1,8%	1,2%	2,6%	2,8%
Relación de Poisson	0,18	0,17	0,17	0,17
Resistencia en flexión (M.R.)	4,0 MPa	3,2 MPa	2,4 MPa	2,6 MPa
Resistencia en tensión indirecta	2,2 MPa	3,6 MPa	3,8 MPa	4,0 MPa

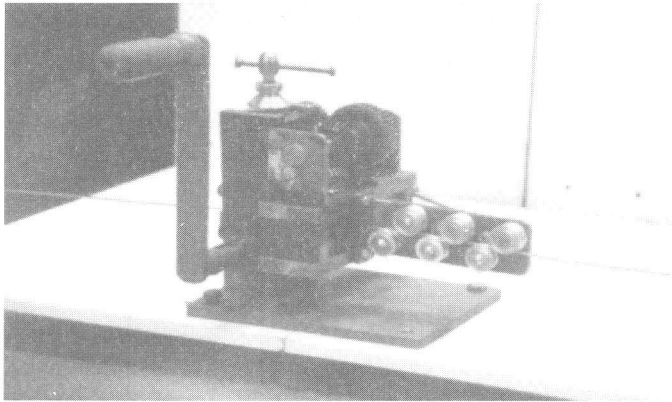


Figura 3. Máquina para hacer muescas en el alambre.

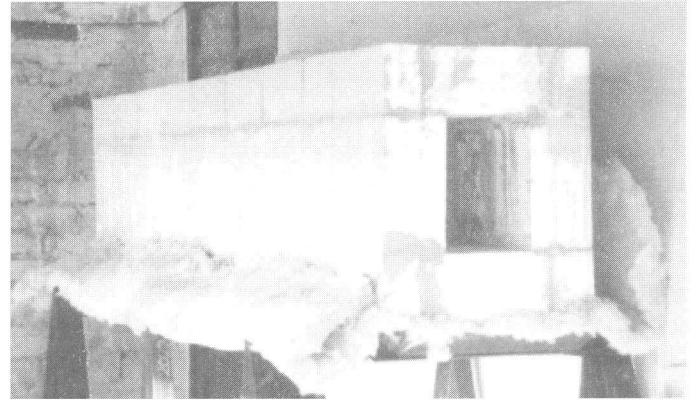


Figura 4. Horno para revenir alambres.

por medio de una máquina fabricada en el taller del Laboratorio de Ensayo de Materiales. En la figura 3 se muestra la máquina utilizada para hacer dichas muescas. Los alambres así deformados se trataron térmicamente con el objeto de aumentar su ductilidad y normalizar su resistencia. Para ello se construyó un horno apropiado (figura 4).

A continuación se presenta un resumen de las propiedades del acero de refuerzo del prototipo y las promedios de los alambres con muescas, de refuerzo del microconcreto (tabla 2).

En la figura 5 se presentan las relaciones *Carga vs. Deformación unitaria* de los alambres después del tratamiento térmico.

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES SOBRE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN LOS MÓDELOS**

Analizando los resultados del ensayo de cilindros y de alambres de refuerzo, se llegó a las siguientes conclusiones:

1. Para lograr una buena analogía entre el comportamiento en compresión del concreto del prototipo y del microconcreto del modelo es necesario usar en el microconcreto aditivos reductores de agua.
2. Los gráficos *Esfuerzo unitario vs. Deformación unitaria* en los que se describe el comportamiento del concreto del prototipo y de las mezclas de microconcreto, guardan similitud suficiente para el propósito del proyecto.

3. La resistencia en tensión indirecta del microconcreto aumenta al disminuir el tamaño del modelo.

**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE EQUIPOS**

**Horno para el tratamiento térmico del refuerzo**

El alambre utilizado como refuerzo de los modelos se fabrica mediante trabajo en frío, que aumenta a medida que disminuye su diámetro. Como resultado, entra en la zona de endurecimiento por deformación del material original y termina con resistencias y ductilidades diferentes para los distintos diámetros. Por tanto, se hace indispensable un tratamiento de revenido con el fin de normalizar dichas propiedades. Teniendo en cuenta el alto costo de los hornos disponibles en el mercado se optó por diseñar uno y fabricarlo en los talleres de la Escuela. Después de varios ensayos y modificaciones se llegó al diseño definitivo, en el que se usan cuatro resistencias longitudinales de 1 Kw cada una y que cuenta con una puerta de acceso para los termómetros de control (figura 2). Se espera, en un futuro próximo, poder controlar con computador el funcionamiento de dicho horno.

Tabla 2

Material	Diámetro	ME (GPa)	EF (MPa)	EM (MPa)	RA (%)	EA (MPa)
Barra	3/4 pulg	200	421	540	50	11,0
Alambre	3,9 mm	190	532	571	51	7,1 - 6,0
Alambre	2,0 mm	230	446	502	44	6,2 - 5,3
Alambre	1,5 mm	220	598	682	24	4,6 - 3,9

ME: Módulo elástico      EF: Esfuerzo de fluencia      EM: Esfuerzo máximo  
 RA: Reducción de área      EA: Esfuerzo de arranque (escala 1:3 – escala 1:5)

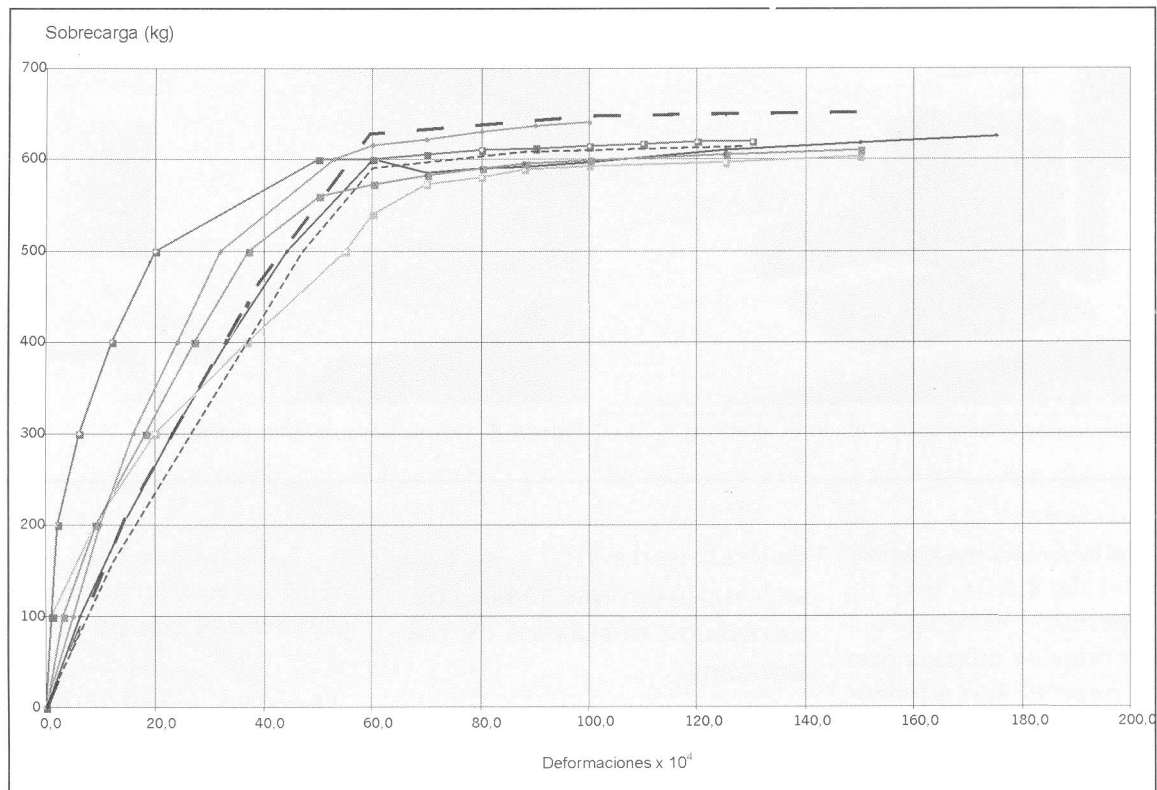


Figura 5. Curvas Carga vs. Deformación unitaria de alambres deformados y revenidos.

### Apoyos para el ensayo de columnas

Para el ensayo de columnas es indispensable tener mecanismos de apoyo que permitan un control estricto de la axialidad de las cargas. Con este

propósito se diseñaron aditamentos especiales que permiten desplazar y rotar la probeta hasta lograr dicha axialidad. Estos aditamentos, fabricados también en el taller de la Escuela, funcionaron muy bien.

### Formaletas

Las formaletas de las vigas fabricadas hasta el momento se hicieron en madera contrachapada y se forraron internamente con plástico autoadhesivo. La calidad de los acabados fue buena. Las formaletas de las columnas se elaboraron en acrílico para las de sección cuadrada y en tubo PVC para las de sección circular; se utilizó aceite para facilitar el desmoldeo. Los acabados fueron muy buenos, como era de esperarse.



Figura 6. Ensayo de una viga continua de dos luces con cargas concentradas en el centro de cada luz.

### Estudio y recomendaciones sobre marcos de prueba y sistemas de carga

Parte fundamental de un laboratorio de modelos estructurales son los marcos de prueba, los cuales permiten ensayar miembros y estructuras tanto en un plano como en el espacio. Uno de los objetivos del proyecto fue diseñar marcos sencillos y

económicos que cumplieran esta función. A la fecha se tiene un diseño completo, con el cual se fabricaron cinco puestos de trabajo para el nuevo Laboratorio de Modelos Estructurales de la Escuela. Además, se elaboró un esquema general de un marco alterno. En cuanto a ensayos en el espacio, se está estudiando adaptar el diseño de mesas de trabajo empleadas en el Laboratorio de Modelos de la Universidad de Cornell.

Los principales sistemas utilizados para cargar modelos estructurales son pesas, gatos mecánicos o hidráulicos, sistemas hidrostáticos y mesas de anclaje con desplazamiento lento. Para el proyecto se fabricaron pesas en newtons con el fin de fomentar en los alumnos el uso del sistema internacional de unidades que prescribe la ley. Por otra parte, se fabricaron dos minigatos mecánicos de 5 y 10 kN de capacidad. El diseño se hizo con base en el de dos gatos importados, modificándolo para poder controlar mejor su desplazamiento. Como era de esperarse, además de una mejor precisión se obtuvo un ahorro considerable en costos.

Para la segunda etapa del proyecto se importarán minigatos hidráulicos de 10 kN de capacidad, que permitan controlar desplazamientos muy lentos.

#### Celda para medición de fuerzas

En muchos casos se aplican sobre los modelos fuerzas de pequeña magnitud que deben medirse con buena aproximación. Con este objeto se construyó una celda de carga, que consiste básicamente en un cilindro hueco de acero cuyo diámetro interior es 13 mm, diámetro exterior 15 mm y altura total 80 mm. Al cilindro se le fijaron cuatro deformímetros eléctricos. Esta celda es capaz de medir fuerzas hasta de 5.000 N, con sensibilidad de 1 N.

#### Estudio y recomendaciones sobre medición de deflexiones y deformaciones

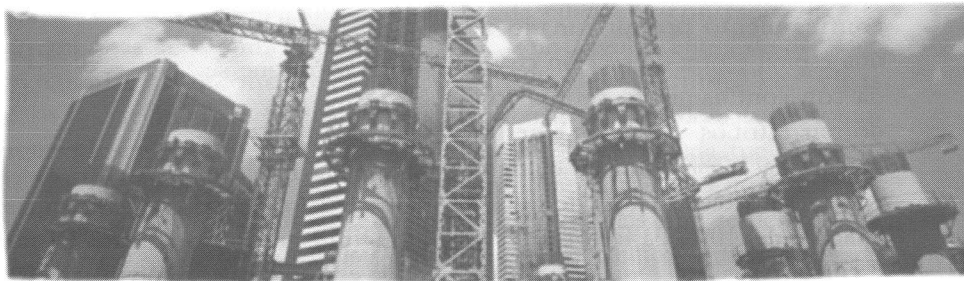
Se estudiaron las características y campos de aplicación de los diversos sistemas para medir desplazamientos y deformaciones, a saber: sistemas ópticos, deformímetros mecánicos y eléctricos, y transductores.

Hasta el momento se han utilizado deformímetros mecánicos y eléctricos y se está tramitando la adquisición de un sistema de adquisición automática de datos.

## MODELOS DE MIEMBROS Y SISTEMAS ESTRUCTURALES

### Modelos ensayados

El propósito fundamental de los modelos de miembros estructurales es facilitar el entendimiento por parte de los alumnos del comportamiento de dichos modelos ante las cargas y de los parámetros que lo determinan. Teniendo en cuenta las limitaciones económicas que impiden la adquisición de equipos sofisticados de medición, se busca una apreciación cualitativa, más que cuantitativa, de las diferencias entre unos y otros al variar dichos parámetros. En consecuencia, las leyes de similitud con los prototipos se han aplicado sólo parcialmente, pues no se consideran indispensables para lograr el propósito enunciado.



En esta primera etapa se diseñaron modelos que permitieran apreciar los siguientes aspectos:

- a) Diferencias entre columnas armadas con estribos y con espiral.
- b) Influencia de los estribos en vigas simples.
- c) Influencia de la proporción de refuerzos negativos y positivos en vigas continuas.
- d) Comportamiento de arcos, bóvedas y domos.
- e) Comportamiento de uniones columna-viga.

#### Diseño, fabricación y ensayo

De acuerdo con lo anterior, se diseñaron, fabricaron y ensayaron los siguientes modelos:

- Cuatro columnas de dos longitudes diferentes: dos de sección circular con restricción lateral en espiral y las otras dos de sección cuadrada con restricción lateral proporcionada con estribos.
- Tres vigas simples subreforzadas de dos longitudes diferentes: una con estribos (90 cm) y las otras dos sin ellos (90 cm y 54 cm).
- Dos vigas continuas de dos luces: una con estribos y otra sin ellos.
- Un pórtico simple de una luz y un piso.

- Una bóveda cilíndrica.
- Una unión columna-viga.

La fabricación de los mismos exigió que se corrugaran, cortaran y revinieran 50 kg de alambre de refuerzo. Con dicho material se fabricaron las canastas de refuerzo.

A continuación se resumen los detalles de los modelos y la descripción de los ensayos.

### Columnas

De acuerdo con los objetivos del proyecto, las columnas se diseñaron de tal manera que se pudiera observar la diferencia de comportamiento entre una de sección circular con confinamiento proporcionado por una espiral y otra de sección cuadrada con confinamiento proporcionado por estribos. Se buscó tener una cuantía de 1,9%, típica en columnas reales con excentricidad de la carga aplicada del 10%. El factor de escala escogido fue 1/6.

Inicialmente se diseñaron columnas con las siguientes características:

a) Sección circular, diámetro 80 mm. L: 330 mm; armadura longitudinal 8 Ø 3,9 mm; armadura transversal: flejes helicoidales Ø 1,5 mm, paso 50 mm. Microconcreto:  $f'_c = 28$  MPa; esfuerzo de fluencia del acero: 415 MPa.

b) Sección cuadrada, lado 71 mm. L: 330 mm; armadura longitudinal 8 Ø 3,9 mm; armadura transversal: flejes cuadrados Ø 0,5 mm cada 50 mm. Microconcreto:  $f'_c = 28$  MPa. Esfuerzo de fluencia del acero: 415 MPa.

De cada tipo de columna se hicieron dos especímenes con el fin de tener una idea de la confiabilidad de los resultados.

Los ensayos se hicieron con los aditamentos descritos anteriormente para simular una condición de apoyos articulados y carga axial. Las

columnas se llevaron hasta la falla en la máquina universal Shimadzu con una velocidad de aplicación de la carga de 20 kN/minuto. Las deformaciones se midieron en la mitad de la altura de las columnas con dos deformímetros eléctricos colocados en la dirección del eje y diametralmente opuestos en las columnas circulares; en las cuadradas iban adosados a caras opuestas.

Al analizar los resultados de los ensayos se obtuvieron valores inesperados de deformación que se atribuyeron a porosidades en la zona de fijación

de los deformímetros eléctricos, cuya longitud era del orden de 10 mm. Por esta razón se resolvió repetirlos y construir un aditamento con deformímetros mecánicos para medir las deformaciones en una longitud más representativa: 100 mm, lo que a su vez obligó a aumentar la longitud de las probetas. Los datos de las nuevas columnas quedaron entonces así:

c) Sección circular, diámetro 80 mm; L: 450 mm; armadura longitudinal 8 Ø 4,0 mm; armadura transversal: flejes helicoidales, Ø 1,5 mm, paso 50 mm. Microconcreto:  $f'_c = 57$  MPa. Esfuerzo de fluencia del acero: 340 MPa.

d) Sección cuadrada, lado 71 mm; L: 450 mm; armadura longitudinal 8 Ø 4,0 mm; armadura transversal: flejes cuadrados Ø 0,5 mm, cada 50 mm. Microconcreto:  $f'_c = 57$  MPa. Esfuerzo de fluencia del acero: 340 MPa.

### Vigas simplemente apoyadas

Para comenzar el estudio de vigas se diseñó un modelo con sección trans-

versal de 50 × 90 mm, o sea con relación  $h/b = 1,8$ . Se reforzó longitudinalmente con 3 alambres Ø 3,9 mm, que corresponde a cuantía = 0,78%, que permite catalogarla como subreforzada. A un tipo no se le colocó armadura transversal; al otro, en cambio, se le pusieron estribos

Ø 1,5 mm cada  $d/2 = 40$  mm.

Para el microconcreto se supuso  $f'_c = 28$  MPa y para el refuerzo un esfuerzo de fluencia de 415 MPa.

Se fabricaron dos especímenes de cada tipo con el fin de poder juzgar la confiabilidad de los re-

sultados. Las vigas, de 1.000 mm de longitud, se ensayaron simplemente apoyadas en los extremos, con cargas iguales aplicadas en su plano principal en los tercios medios de la luz de 900 mm. Se utilizó la máquina universal Shimadzu con una velocidad de aplicación de carga de 1 kN/minuto y una viga puente rígida para repartir la carga en los dos puntos. Se midió la deflexión en el centro de la luz por medio de deformímetros mecánicos con sensibilidad de 0,01 mm. Los especímenes se cargaron hasta la falla.

Como las vigas sin refuerzo transversal fallaron por flexión, se decidió fabricar dos vigas del mismo tipo con igual sección transversal y armadura longitudinal pero menor longitud: 540 mm. En este caso sí se logró una falla por cortante.

### Vigas continuas de dos luces

Se diseñaron dos vigas continuas con sección transversal de 40 × 70 mm y

---

El propósito fundamental de los modelos de miembros estructurales es facilitar el entendimiento por parte de los alumnos del comportamiento de dichos modelos ante las cargas y de los parámetros que lo determinan.

---



una longitud total de 1.600 mm, para ser ensayadas como vigas continuas de dos luces de 750 mm, con cargas concentradas en el centro de cada luz. El microconcreto tenía  $f'_c = 31$  MPa y el refuerzo longitudinal un esfuerzo de fluencia: 340 MPa. Éste consistía de tres alambres  $\varnothing$  3,2 mm en la parte superior de la porción central, correspondiente al apoyo intermedio, y de 2  $\varnothing$  3,2 mm + 1  $\varnothing$  2,3 mm en la parte inferior de cada una de las dos luces. Una de ellas no tenía armadura transversal; a la otra se le colocaron flejes  $\varnothing$  1,5 mm cada  $d/2$  (30 mm). No se hicieron duplicados y se prevé repetir las pruebas con dos especímenes de cada tipo en el presente semestre.

Por ser vigas muy largas (1.600 mm) y no haber entre las columnas de una máquina universal, se optó por apoyar una viga metálica rígida en el marco móvil de la máquina y apoyar sobre ella la muestra para ensayo. Se cargó entonces por medio de un gato hidráulico, permitiendo que la máquina marcara la carga aplicada.

Es interesante observar que como las muestras se ensayaron saturadas (dos horas después de retirarlas del tanque de curado), el agrietamiento desde su iniciación fue muy visible al emerger por él el agua libre del microconcreto.

#### *Pórticos simples con miembros ortogonales*

Para iniciar el estudio de pórticos se diseñó uno con miembros ortogonales, de una luz y un piso. Sus especificaciones fueron longitud de la viga horizontal: 710 mm. Altura total de las columnas: 400 mm. Sección transversal constante de 40 mm de base  $\times$  70 mm de altura. Refuerzo longitudinal inferior en la viga: tres alambres  $\varnothing$  3,2 mm. Refuerzo longitudinal superior en la viga: 2 alambres  $\varnothing$  3,2 mm. Armadura longitudinal en las columnas: 4 alambres  $\varnothing$  3,2 mm. Armadura transversal en viga y columnas: flejes rectangulares  $\varnothing$  1,5 mm cada 30 mm. Microconcreto:  $f'_c = 31$  MPa. Esfuerzo de fluencia del acero: 340 MPa. En la figura 7 se puede apreciar el marco.

Los ensayos se efectuaron sometiendo la viga a flexión con dos cargas verticales iguales, simétricas con respecto al centro de la luz de la viga, a 7 cm de distancia una de otra. Simultáneamente se aplicó una carga lateral, paralela al eje de la viga y a 65 mm de dicho eje. La carga horizontal se mantuvo siempre con una magnitud igual al 15% de la carga vertical total, tratando de que la falla ocurriera simultáneamente en la luz de la viga y en el nudo del marco solicitado por un mayor momento. Los marcos tenían apoyo de rodillo del lado de la carga lateral y de segundo grado en el lado opuesto.

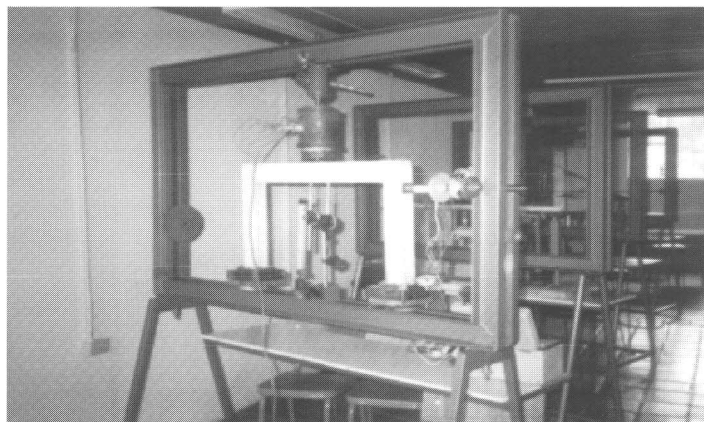


Figura 7. Ensayo del pórtico simple.

#### *Bóveda cilíndrica*

Se construyó una bóveda cilíndrica con radio de 400 mm, 10 mm de espesor y un ángulo central de  $81^\circ$ , que conduce a una luz libre de 520 mm. Las vigas longitudinales de apoyo tenían 20 mm de base y 50 mm de altura. La longitud total de la bóveda fue de 2.040 mm y estaba dotada con tímpanos de 20 mm de espesor, en sus extremos. Otros detalles son: refuerzo de la bóveda y los tímpanos: malla electrosoldada formada por alambre de  $\varnothing$  1,0 mm cada 12 mm en las dos direcciones; refuerzo longitudinal inferior en las vigas: 2  $\varnothing$  3,2 mm; armadura transversal en las vigas: flejes  $\varnothing$  1,0 mm, simulando una espiral con paso de 20 mm. Microconcreto de la bóveda y los tímpanos:  $f'_c = 28$  MPa. Microconcreto de las vigas:  $f'_c = 21$  MPa. Esfuerzo de fluencia del refuerzo: 340 MPa.

El ensayo consistió en aplicar una carga vertical distribuida uniformemente sobre la proyección horizontal de la bóveda. Para ello se aplicaron pesos iguales sobre 36 puntos distribuidos uniformemente sobre dicho plano. La carga consistió en bolsas llenas de grava, con peso total de 15 N cada una, que se iban depositando en sacos suspendidos de los 36 puntos mencionados. Se incrementó la carga en seis etapas hasta llegar a una carga repartida de 2.110 N/mm<sup>2</sup>. La carga de cada saco se distribuyó en cuatro partes iguales por medio de arañas fabricadas con varilla delgada, cuyos centros coincidían con los de los 36 puntos. En la figura 8 se puede apreciar la bóveda.

Se instalaron deformímetros eléctricos sobre el perímetro exterior de la sección central del modelo, tanto en sentido longitudinal como transversal, localizados en los bordes inferiores de las vigas, en la clave de la bóveda y a mitad de camino entre aquéllas y ésta.

Las deflexiones se midieron con deformímetros mecánicos de sensibilidad 0,001 pulgadas, ubicados en el centro de la luz de las vigas, tanto en sentido vertical como horizontal.

### Unión columna-viga

Se fabricó un macizo común con dos uniones columna-viga. Cada viga está formada por una columna de 80 mm de longitud libre, con una sección transversal de 50 × 50 mm, armadas longitudinalmente con cuatro alambres de 3,2 mm de diámetro, flejes de 2 mm cada 20 mm, y una viga en voladizo, ortogonal a la columna, de 160 mm de longitud libre y sección transversal igual a la de la columna, lo mismo que su armadura. En las dos esquinas había continuidad de los alambres de la viga y la columna. En una de las uniones, denominada A, no se colocó arma-

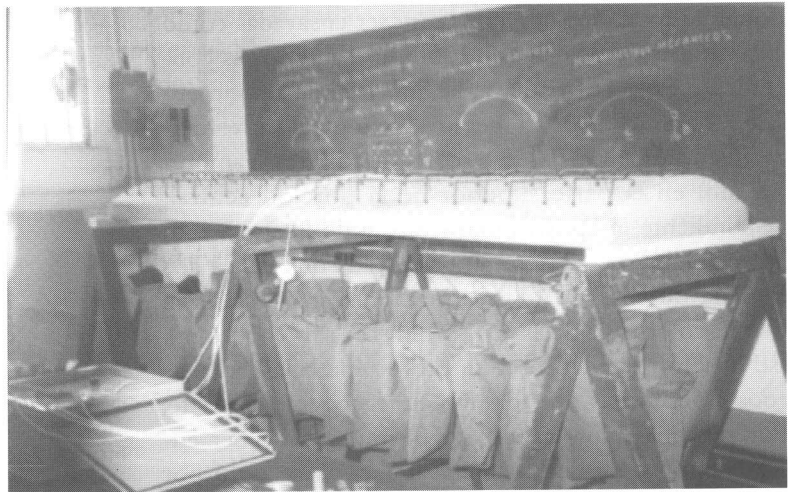


Figura 8. Ensayo de la bóveda cilíndrica.

dura adicional; en la otra, en cambio, se pusieron dos alambres de 3,2 mm de diámetro en cada lado en dirección diagonal y otro igual en dirección normal a los anteriores. A esta unión se la llamó B.

Con el fin de ensayar la unión A se aplicó una fuerza de 2 kN en la unión B para inmovilizarla y se aplicó carga lentamente en el extremo libre de la viga A por medio de un minigato. La carga se midió con un

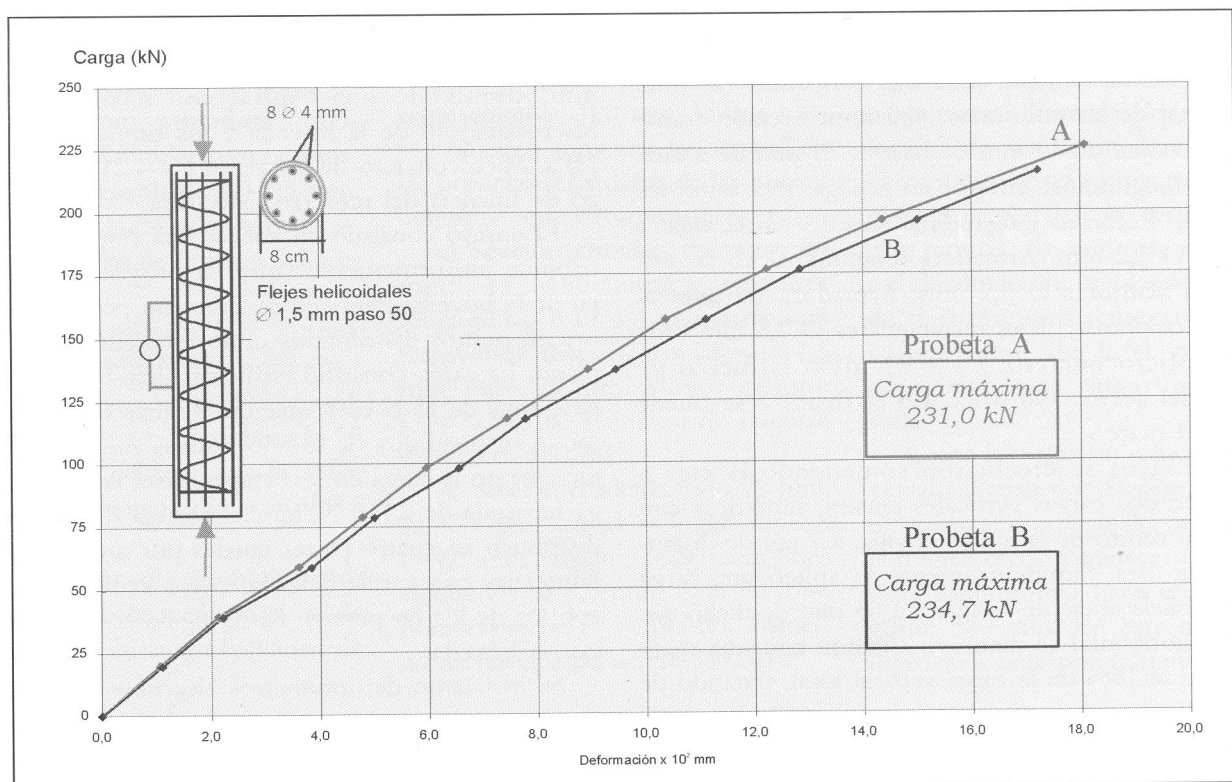


Figura 9. Ensayo de columnas circulares con espiral.

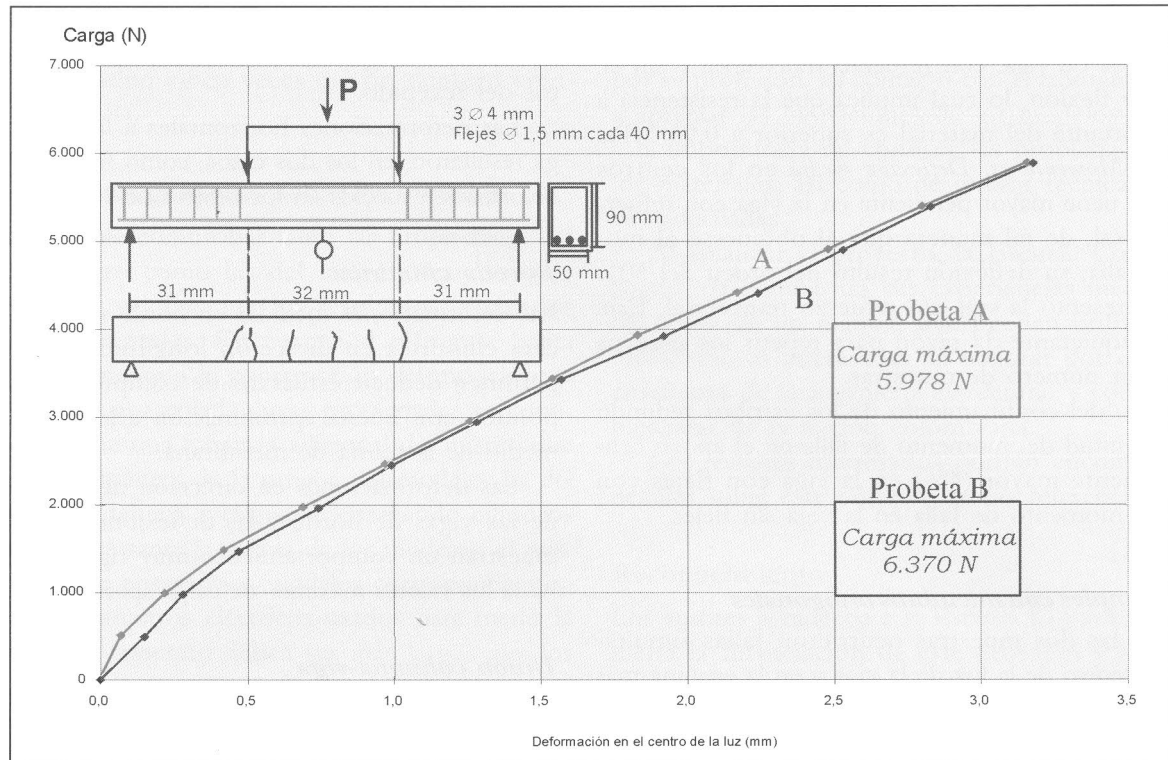


Figura 10. Ensayo de vigas simples con estribos.

anillo de carga y las deflexiones se midieron con deformímetros mecánicos. El mismo sistema pero al contrario se utilizó para ensayar la unión B.

### Análisis de resultados

Los ensayos se llevaron a cabo, como estaba previsto, sin mayores dificultades. Con las mediciones hechas se efectuaron los respectivos diagramas *Carga vs. Deformación unitaria* y *Carga vs. Deflexión* en los puntos de interés para los diferentes modelos. En las figuras 9, 10 y 11 se muestran algunos de estos diagramas. Los principales resultados y recomendaciones se resumen a continuación.

### Columnas con sección circular

La carga media de falla sobre las columnas de sección circular y 330 mm de longitud fue 234 kN, con dispersión de tan sólo 2,2%.

Al estudiar el gráfico *Carga aplicada vs. Deformación unitaria*, se observa el comportamiento esperado en un espécimen, pero inesperado en el otro que presenta un endurecimiento a partir de una carga de 100 kN. Podría explicarse este fenómeno poro en la zona donde se instaló el deformímetro eléctrico, que, al cerrarse con el aplastamiento, habría tenido deformaciones menores al aumentar la carga. Por esta razón se decidió repetir los ensayos con el aditamento de deformímetros mecánicos descrito antes.

En las nuevas columnas con longitud 450 mm se obtuvo una buena correspondencia entre los ensayos de muestras gemelas.

### Columnas con sección cuadrada

La carga media de falla de los dos especímenes de 330 mm fue 246 kN, con dispersión de 7,4%.

Sorpresivamente, la carga de falla para la columna de sección cuadrada resultó superior en 4,6% a su homóloga de sección circular, contrariamente a lo previsto en el diseño.

En las columnas de 450 mm los valores de la carga de falla de las columnas rectangulares son 1,5% mayores que los de las columnas con sección circular.

### Vigas simplemente apoyadas

La carga de falla tuvo un valor medio de 9,78 kN, con una dispersión de 8,3%, que se considera baja. Conforme con lo esperado en las vigas subreforzadas, la falla ocurrió por fluencia del refuerzo.

Los gráficos *Carga vs. Deflexión en el centro de la luz* corresponden a lo esperado y presentan, en general, baja dispersión.

### Vigas continuas de dos luces

Los dos tipos de viga, con refuerzo transversal y sin él, fallaron por flexión, lo cual implica que la resistencia a esfuerzo cortante del material es superior a 0,93 MPa. La gráfica *Momento vs. Deflexión media* en los centros de las luces tiene mayor pendiente en la viga con refuerzo transversal, de tal manera que al obtenerse el momento de falla, su deflexión resultó del orden del 50% de la que presentó la viga sin refuerzo transversal. Este resultado inquietante da razón para repetir los ensayos sobre mayor número de muestras.

El efecto del confinamiento de los estribos redundó en una magnitud del momento de falla en el apoyo central ligeramente mayor (4%) en la viga con flejes con respecto al momento de falla en la viga sin flejes.

### Pórticos simples con miembros ortogonales

En una de las dos muestras ocurrieron fallas simultáneas en el centro de la luz de la viga y en la esquina más solicitada por flexión, como se esperaba; en la otra muestra la falla se presentó únicamente en la viga durante todo el intervalo de carga, sin que llegara a agrietarse la esquina. Esta diferencia de comportamiento pudo

deberse al distinto esfuerzo de fluencia en los alambres de refuerzo longitudinal, ocasionado por diferentes efectos del revenido.

Las deformaciones horizontales a la altura de la carga resultaron, en los dos casos, como función lineal de la deformación medida en los centros de la luz:  $\delta_h = 1,6 \delta_{cl}$ .

### Bóveda cilíndrica

Las deformaciones medidas en borde superior de la cáscara cilíndrica en dirección longitudinal y transversal permiten deducir esfuerzos de compresión que corresponden con buena aproximación a los calculados por medio de la teoría de membrana.

Las deformaciones en dirección del eje en el centro de las vigas de borde y las deflexiones en esos puntos muestran un comportamiento muy rígido de esas vigas hasta los valores máximos de carga aplicada ( $2.100 \text{ N/m}^2$ ).

### Unión columna-viga

Las dos uniones fallaron por agrietamiento en la sección de la columna en la vecindad del macizo de anclaje y la carga media de falla se apartó tan sólo 4,8% de la carga última calculada.

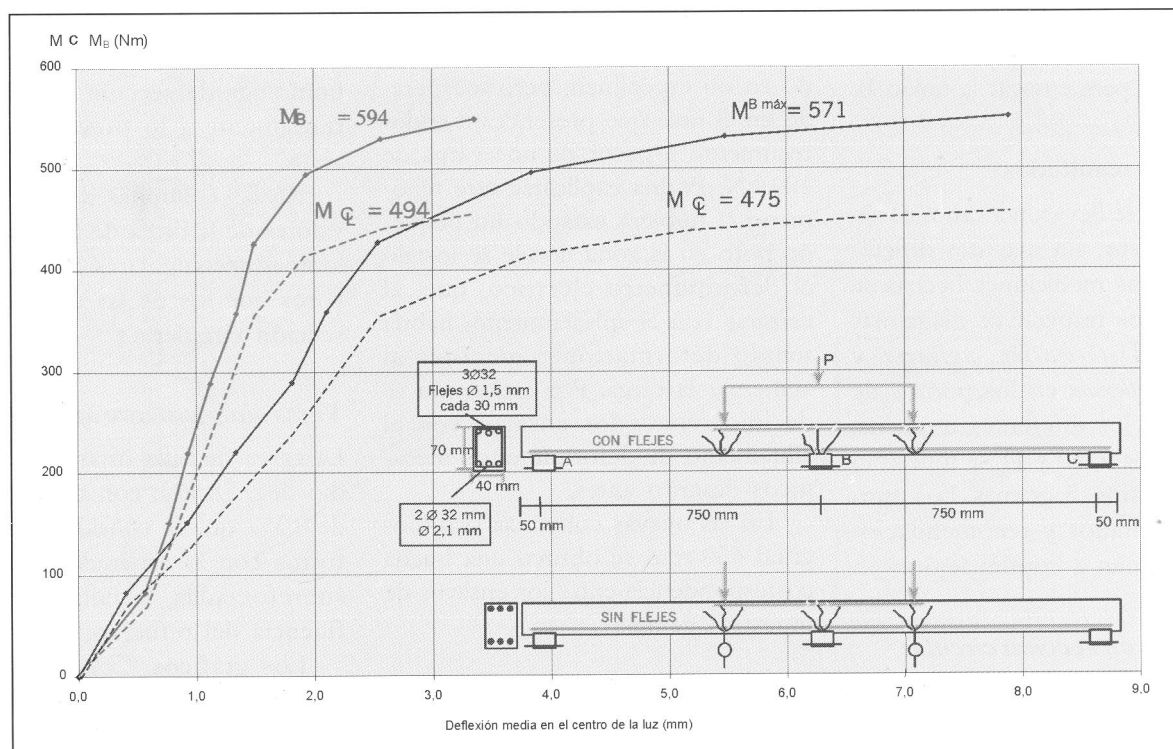


Figura 11. Ensayo de vigas continuas de dos luces, con estribos y sin ellos.

Por otra parte, ninguna de las dos probetas se agrietó dentro de la unión misma, a diferencia de lo que ocurrió en un prototipo cinco veces mayor, también ensayado en la Escuela.

### Recomendaciones generales sobre los modelos

- Es indispensable comprobar tanto las propiedades del acero de refuerzo como las del microhormigón para poder comparar válidamente los resultados calculados con los experimentales. En cuanto al refuerzo, basta constatar previamente a la construcción del modelo que éste proviene de una colada cuyas propiedades se conocen o que se tiene una longitud adicional del mismo que permita ensayarlo antes de la prueba del modelo. La del microhormigón deberá averiguarse ensayando cilindros testigo tomados durante la colada de los modelos, el mismo día en que se ensayan los modelos correspondientes.
- Los deformímetros eléctricos usados para medir la deformación del concreto deben ser más largos que los empleados hasta ahora, con el fin de obtener datos más confiables de la deformación media de las probetas.

### CONCLUSIÓN

Aunque esta investigación está sólo en su primera etapa y los modelos y técnicas descritos requieren algunos ajustes, la experiencia obtenida hasta el momento permite concluir que los modelos directos hechos con microconcreto reforzado sirven efectivamente para visualizar el comportamiento de los miembros y estructuras de concreto reforzado de tamaño real, en especial cuando se cambian parámetros fundamentales. El costo de dichos modelos y de los equipos que se necesitan para su fabricación y ensayo es relativamente bajo y está al alcance de todas nuestras facultades de ingeniería.

El contacto con el laboratorio les ayuda a los estudiantes a apreciar las limitaciones de los modelos matemáticos y la importancia de conocer las propiedades reales de los materiales, así como de utilizar técnicas constructivas adecuadas.



Por otra parte, los proyectos con modelos sirven para desarrollar la creatividad de los alumnos y entusiasmarlos por su profesión. El contacto con el laboratorio les ayuda a apreciar las limitaciones de los modelos matemáticos y la importancia de conocer las propiedades reales de los materiales, así como de utilizar técnicas constructivas adecuadas.

Al finalizar el proyecto, la Escuela Colombiana de Ingeniería compartirá sus experiencias mediante la publicación de un manual que puedan utilizar todas las universidades interesadas en mejorar por este medio la enseñanza de la ingeniería estructural y contribuir así al bienestar de la nación colombiana.

Los lectores interesados podrán encontrar mayores detalles sobre este proyecto en las referencias utilizadas.

### Reconocimiento

Los autores agradecen a la Escuela Colombiana de Ingeniería la financiación de este proyecto y a los señores Augusto Rojas, mecánico, y Édgar Aranda y Jairo Páez, laboratoristas, la colaboración prestada para el éxito del mismo.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Harris, Harry G. y Sabnis, Gajanan M., *Structural Modeling and Experimental Techniques*, 2<sup>nd</sup> ed., Boca Ratón, Florida, EE.UU., CRC Press, 1999.
- (2) Gómez, Claudio, *Estudio de paraboloides hiperbólicos mediante modelos de microconcreto*, proyecto de grado, Universidad de los Andes, 1977.
- (3) Puccini, Piero Miguel, *Estudio de la variación del módulo de elasticidad y la inercia efectiva como consecuencia del nivel de carga y el agrietamiento en vigas de microconcreto reforzado*, tesis de maestría, Universidad de los Andes, 1980.
- (4) Rey, Ricardo, *Dosificación de mezclas de microconcreto II*, tesis de maestría, Bogotá, Universidad de los Andes, 1984.
- (5) Marín, Olga Lucía, *Influencia del volumen de agregados en la resistencia a compresión del microhormigón*, proyecto de grado, Universidad de los Andes, 1985.
- (6) Mendoza, Carlos, *Desarrollo, construcción y ensayo de un modelo de microhormigón reforzado*, proyecto de grado, Universidad de los Andes, 1986.
- (7) Montoya, Óscar Alfredo, *Presiones dinámicas en silos a diferentes velocidades de vaciado*, proyecto de grado, Universidad de los Andes, 1988.
- (8) Díaz, Fernando Alfonso, *Influencia de las propiedades del material ensilado en las presiones dinámicas de descarga en silos*, proyecto de grado, Universidad de los Andes, 1989.
- (9) Uribe, Jairo y Rodríguez, Carlos Alberto, *Diseño de un laboratorio de modelos de microconcreto para la enseñanza del comportamiento de estructuras de hormigón reforzado*, Memorias, XIV Jornadas Estructurales de la Ingeniería de Colombia, Bogotá, Sociedad Colombiana de Ingenieros, 2001.