

Modelación estructural para cargas sísmicas

Structural Modeling for Seismic Loads

Ángel Eduard Rodríguez Suesca*

Resumen

Expone parte de los resultados de una investigación que involucra la modelación física como herramienta importante para el análisis de estructuras y materiales de gran complejidad o de comportamiento desconocido. Se plantea una descripción de los parámetros más importantes de la modelación física, que son estudiados y aplicados en modelos experimentales de estructuras ante cargas de diferente tipo. Entre estos requisitos imprescindibles, es de fundamental atención las complicaciones que conlleva la modelación ante cargas dinámicas, especialmente las de origen sísmico. Es así como se describen detalles importantes de la modelación dinámica, estudiados en la planeación, construcción y ensayo de modelos físicos actualmente.

Palabras clave: modelación estructural, Modelos físicos, Técnicas experimentales.

Abstract

It summarizes some of the results of an investigation that involves the physical modeling, as an important tool for the structures' analysis and the great complexity or unknown behavior's materials. There is a description of the most important parameters of the physical modeling which are studied and applied to the structures' experimental models, subjected to different types of loads. Among these requisites, it is of vital care the complications associated with the modeling for dynamic loads, especially those of seismic origin. In this way are described important details of the dynamic modeling, studied in the planning, construction and testing of physical models currently.

Key words: Structural Modeling, Physical Models, Experimental Techniques.

* Ingeniero Civil, Magister en Ingeniería Civil, Especializado en Estructuras y Sísmica, Docente de la Facultad de Ingeniería-UPTC, Investigador Grupo de Investigación en Construcción Antisísmica -GICA-. angel_eduardrs@yahoo.es

1. Introducción

Gracias a que los computadores son cada día más poderosos y sofisticados, el ingeniero estructural actual dispone de más herramientas analíticas y numéricas para estudiar sistemas estructurales de mayor complejidad, incluso con posibilidades de modelación no lineal y dinámica. Sin embargo, la verificación de la validez de los procedimientos analíticos y el chequeo del verdadero comportamiento deben basarse siempre en pruebas experimentales sobre modelos físicos de la estructura. A causa del tamaño de las estructuras civiles y del alto costo de las pruebas en este campo, se prefiere trabajar con modelos de prueba a escala reducida del sistema o componente por estudiar.

Significativos avances para el arte y la ciencia de la modelación física se han venido desarrollando desde la segunda guerra mundial, al punto de que muchos problemas estructurales han sido resueltos mucho antes de la evolución de las tecnologías computacionales. En el área de estructuras, los modelos de pequeña escala han resultado ser una poderosa herramienta para ampliar el conocimiento y el entendimiento del comportamiento de muchas situaciones complejas donde las técnicas analíticas son inadecuadas. Los modelos analíticos de comportamiento son desarrollados y puestos a punto por comparación de resultados obtenidos de pruebas de modelos experimentales, por lo que el avance de la modelación física debe estar siempre a la par con el avance de la modelación analítica.

A continuación se quiere mostrar, en forma generalizada, algunos de los aspectos por tener en cuenta en el proceso de modelación estructural, a fin de motivar las investigaciones con base en procedimientos experimentales, como única manera de avanzar en el conocimiento del comportamiento de materiales y sistemas estructurales (investigación científica), dejando la modelación computacional como complemento para aplicación del conocimiento obtenido en sistemas de características similares.

2. Modelación física en la ingeniería estructural

Los modelos estructurales han jugado un papel

significativo en la educación, investigación y diseño de estructuras en la ingeniería. Es así como la experimentación a escala reducida y de especímenes ha sido importante en la enseñanza de la mecánica estructural y de los conceptos fundamentales de la ingeniería. Sin embargo, un gran número de dificultades se encuentra en la planeación, ejecución e interpretación de un estudio experimental de comportamiento estructural, para lo cual existe una serie de procesos contenidos en una extensa disciplina denominada análisis experimental, necesaria para garantizar resultados valederos en el desarrollo de estructuras reales.

2.1 Modelos estructurales

2.1.1 Definición. Un modelo estructural es definido como “cualquier representación física de una estructura o una porción de una estructura. Comúnmente, el modelo será construido a una escala reducida”. Definición desarrollada por el comité ACI 444 “*Experimental Analysis for Concrete Structures*” [1]. Esta aplica igualmente bien a modelos de estructuras hechas de cualquier material. Una segunda definición: “Un modelo estructural es cualquier elemento estructural o conjunto de elementos estructurales construidos a escala reducida (en comparación con las estructuras de tamaño real: prototipos) a fin de ser ensayados y para los cuales se deben emplear las leyes de similitud para interpretar los resultados del ensayo” [2].

Ambas definiciones abarcan una amplia gama de estudios de modelación sobre estructuras prototipo (tamaño real), como edificios, puentes, diques, torres, reactores, cascarones, estructuras mecánicas y aeroespaciales, entre otras estructuras. En cuanto a las cargas se incluyen: las acciones estáticas, la simulación de sismos, efectos térmicos y de viento, entre otras.

2.1.2 Clasificación. Los modelos estructurales pueden ser clasificados y denominados de diversas maneras, que generalmente tienen que ver con la utilidad del modelo y el tipo de resultados que se quiere obtener. Las denominaciones de modelos más utilizadas en la ingeniería estructural [2] son:

Modelos elásticos: se utilizan cuando se desean obtener respuestas elásticas. Tienen una similitud directa con el prototipo, pero se hacen de materiales homogéneos y elásticos que no son necesariamente los mismos del prototipo. Los resultados están restringidos al comportamiento elástico del prototipo.

Modelos indirectos: son formas especiales de los modelos elásticos utilizados para obtener líneas de influencia para reacciones y acciones internas como fuerzas cortantes, momentos flectores y fuerzas axiales. Las cargas aplicadas al modelo no tienen relación directa con las aplicadas al prototipo, pues los efectos se obtienen por superposición de los valores en los diagramas de influencia.

Modelos directos: un modelo directo tiene similitud geométrica con el prototipo en todos los aspectos, y las cargas se le aplican de la misma manera que al prototipo. Los esfuerzos y deformaciones totales y unitarias en el modelo para condición de carga son representativos de las que ocurren en el prototipo. Un modelo elástico puede ser también un modelo directo.

Modelos de resistencia: se les conoce también como modelos de resistencia última o modelos reales y son modelos directos hechos de materiales similares a los del prototipo, de tal manera que el modelo predecirá el comportamiento del prototipo para todas las cargas, incluso hasta el instante de la falla. Por ejemplo, un modelo de resistencia de un elemento o estructura de concreto reforzado debe ser elaborado de concreto y de acero de refuerzo de manera tal que ambos materiales cumplan las condiciones de similitud del prototipo. Un modelo de resistencia debe ser, por definición, un modelo directo, y se debe recordar que ya no es válido el principio de superposición.

Modelos para efectos de viento: hay varias maneras de clasificar la modelación bajo efectos del viento. Se pueden utilizar modelos de forma, donde se pueden medir bien sea las fuerzas totales o las presiones sobre la estructura, y modelos aeroelásticos, donde se modelan tanto la forma como la rigidez del prototipo para medir los esfuerzos y las deformaciones

inducidas por el viento y la interacción dinámica de la estructura con el viento.

Modelos conceptuales, de investigación y de diseño: aunque el uso de cada uno de estos modelos es obvio, su grado de sofisticación puede ser marcadamente diferente. Los modelos conceptuales o de enseñanza deben ser tan sencillos como sea posible para demostrar conceptos, y permiten distorsiones de la similitud que no afecten significativamente el comportamiento estudiado. En modelos de investigación se pueden extraer teorías y hacer generalizaciones para el tipo de estructura estudiada, por lo que deben ser realizados con tanta precisión como sea posible. El uso de modelos como ayuda directa de diseño es una de las más poderosas aplicaciones de la modelación estructural; la precisión de los modelos de diseño varía entre la de los modelos conceptuales y los de investigación; dependiendo de los resultados deseados, algunos se utilizan solo como herramientas conceptuales para tener una mejor idea acerca de cómo una estructura se comporta bajo carga, y otros pueden ser usados para predecir posibles formas de inestabilidad o la verdadera capacidad de carga de la estructura. Otra aplicación importante de la modelación física en el diseño es como ayuda en la verificación del análisis de estructuras muy grandes y monumentales, donde las consecuencias de una falla serían extremadamente serias (tales como grandes pérdidas de vidas humanas, pérdidas importantes de inversión o fallas en la prestación de servicios básicos).

Modelos dinámicos: estos modelos, de resaltada importancia actualmente en la ingeniería, son usados para estudios de efectos de vibración o cargas dinámicas sobre estructuras; pueden ser probados sobre una mesa vibratoria, para el estudio de los efectos de cargas sísmicas, o en un túnel de viento, para el estudio de efectos aeroelásticos. También pueden ser usados para estudiar efectos de explosiones internas o externas o efectos de impacto sobre estructuras.

Otras clasificaciones: entre otros modelos se incluyen los *modelos térmicos*, para el estudio de los efectos del gradiente de temperatura; los *modelos*

fotomecánicos, que utilizan efectos ópticos y de interferencia utilizados en la teoría de la fotoelasticidad, y los *modelos de procesos constructivos*, que ayudan en la planeación de la construcción de estructuras muy complejas.

2.2 Selección de la Escala Geométrica

Cualquier modelo construido en el laboratorio tiene un factor óptimo de escala. Modelos muy pequeños requieren cargas ligeras, pero pueden presentar gran

dificultad de fabricación e instrumentación. Los modelos más grandes son más fáciles de construir, pero requieren un equipo de carga más pesado. La elección del factor de escala se ve influenciada por la disponibilidad de equipo, tanto de ensayo como de carga, por el tamaño del prototipo y por el alcance del proyecto. Otro de los factores fundamentales para esta elección en nuestro medio es el económico, que generalmente limita recursos para la construcción de modelos físicos. En la tabla 1 se muestran algunos de los factores de escala típicos para diferentes tipos de estructuras.

Tabla 1. Factores de escala geométricos típicos en la modelación de estructuras [2-5]

Tipo de estructura	Modelo elástico	Modelo de resistencia
Cubiertas en cascarones	1:200 a 1:50	1:30 a 1:10
Puentes	1:25	1:20 a 1:4
Revestimiento de reactores	1:100 a 1:30	1:20 a 1:4
Placas	1:25	1:10 a 1:4
Presas	1:400	1:75
Efectos del viento	1:300 a 1:50	No aplicable

2.3 Proceso de la modelación física

Un estudio de modelación exitoso es aquel que se caracteriza por la cuidadosa planeación de las diversas etapas en el proceso. El estudio experimental de una estructura es en sí mismo un pequeño proyecto de ingeniería y debe ser planeado como tal. La planeación detallada de un experimento es aun más importante que la planeación de un enfoque analítico, pues el refinamiento del modelo estructural a mitad de camino del proceso de modelación es generalmente imposible. El tiempo requerido para completar el estudio del modelo puede variar desde tal vez una semana o dos para un modelo elástico muy limitado, hasta seis meses para un modelo de resistencia completo. Durante este proceso se debe omitir el estudio y diseño excesivo de la estructura. Un estudio de modelación típico puede estar comprendido de los siguientes pasos:

- Definir el alcance del problema, decir qué se necesita del modelo y qué no se necesita.
- Definir el grado necesario de confiabilidad o precisión, teniendo en cuenta tiempo y dinero.

- Especificar los requisitos de similitud en lo concerniente a la geometría, materiales, cargas e interpretación de resultados. Teniendo en cuenta los que no se puedan cumplir.
- Seleccionar los materiales de los modelos prestando atención a los pasos anteriores.
- Planear la fase de fabricación consultando a los técnicos que construirán el modelo, y supervisar las actividades de fabricación cuidadosamente.
- Diseñar y preparar los equipos de carga, conociendo sistemas, alcances y calibrando componentes.
- Seleccionar los equipos de instrumentación y registro de deformaciones, desplazamientos, velocidades, aceleraciones, fuerzas, entre otras cantidades.
- Observar la respuesta del modelo durante la carga, tomar anotaciones completas del comportamiento (registrar manualmente datos de carga y deformación de puntos clave) y registros fotográficos o de video apropiados. Preparar con anterioridad este paso, estableciendo posibles comportamientos.

- i. Analizar datos y escribir el reporte tan pronto como sea posible. Además, se deben consignar sugerencias para mejorar los resultados del ensayo de modelación.

2.4 Ventajas y limitaciones de la modelación física

La principal ventaja de una modelación física sobre una modelación analítica es que se registra el comportamiento de la estructura hasta el mismo colapso. Aunque se hacen continuas mejoras en los procedimientos computacionales para el análisis de estructuras, no se puede aún predecir analíticamente la capacidad de falla de una estructura compleja con parámetros poco estudiados. Es el caso en el cual se estudian estructuras no convencionales en configuración estructural, tipo de material, tamaño, tipos de cargas, entre otros aspectos que pueden regir su comportamiento poco comprendido actualmente (ejemplo: estructuras masivas, estructuras laminares flexibles, estructuras en materiales no convencionales, estructuras sometidas a cargas dinámicas y aleatorias en el tiempo, estructuras de gran complejidad por su gran tamaño y estructuración no convencional).

La principal razón para realizar experimentos con modelos a escalas reducidas es la reducción de su costo. Refiriéndose a costos por tamaño de equipos y costos de fabricación.

La limitación importante al utilizar modelos estructurales son el tiempo y el costo. Al comparar los modelos físicos con los analíticos se observa que los últimos representan un costo mínimo y gran rapidez, por lo que la modelación física se encuentra limitada a las situaciones en las que el análisis matemático no sea factible o adecuado. Otra limitación es que los cambios al prototipo, sugeridos por los resultados del modelo, pueden requerir de un segundo modelo para verificar el diseño.

Los modelos estructurales son ampliamente empleados en programas de investigación en aplicaciones como:

- Desarrollo de datos experimentales para la verificación de la idoneidad de los métodos analíticos.

- Estudio del comportamiento básico de formas complejas.
- Estudios paramétricos del comportamiento de elementos estructurales.
- Comportamiento de sistemas estructurales completos, sujetos a complejas historias de carga.
- Desarrollo de nuevos sistemas estructurales.

2.5 La exactitud de la modelación física

La confiabilidad de los resultados del estudio de un modelo físico es tal vez el factor más importante en la modelación experimental. Para el investigador que utiliza la metodología de modelación es difícil dar definiciones adecuadas de confiabilidad y precisión. Una medida elemental es el grado con el cual un modelo puede reproducir la respuesta del prototipo. El problema encontrado en tales comparaciones es la variabilidad inherente al mismo prototipo, particularmente si es de un material desconocido o poco estudiado. Cuando se compara un modelo con uno solo de los prototipos es difícil llegar a conclusiones firmes acerca de la precisión obtenida, por tanto, son necesarios múltiples prototipos y modelos a fin de poder tratar los resultados de manera estadística, sin embargo, el costo de un solo modelo generalmente es alto, lo que limita este procedimiento.

Los factores que afectan la precisión del modelo incluyen las propiedades del material, la precisión en la fabricación, las técnicas de aplicación de las cargas, los métodos de medición y la interpretación de los resultados. Se pueden obtener modelos elásticos que aseguren una correlación extremadamente buena con los resultados obtenidos de análisis detallados por computador. Los modelos elásticos solo pueden predecir comportamientos elásticos, por lo que tendrán una gran precisión (errores menores del 5 al 10% [2]) para estructuras con agrietamientos mínimos. Modelos de resistencia de estructuras convencionales tienen errores del orden de 15% [2]. Una mejor perspectiva del grado de confiabilidad que se debe esperar en un programa de ensayo de modelos únicamente puede ser lograda mediante un cuidadoso estudio de un gran número de casos individuales.

3. Análisis dimensional y similitud

Los modelos estructurales deben ser diseñados, cargados e interpretados de acuerdo con una serie de *requerimientos de similitud* que relacionan al modelo con la estructura prototipo. Estos requerimientos son establecidos sobre la base de la teoría de modelación y pueden ser derivados de un análisis dimensional del fenómeno físico involucrado en el comportamiento de la estructura. La teoría de la modelación establece reglas para las cuales la geometría, propiedades del material, condiciones iniciales y otras condiciones del modelo y el prototipo pueden ser relacionadas. Las leyes de similitud para un comportamiento lineal elástico, basadas sobre los mejores principios del análisis dimensional, son dadas para el desarrollo de una completa serie de funciones de correlación denominadas *leyes de escala*, que define la relación modelo-prototipo. Una aplicación formal de la teoría dimensional para un problema estructural sin un entendimiento anticipado del comportamiento esperado puede acarrear un inadecuado e incorrecto programa de modelación. Es de importancia tener en cuenta que la similitud debe ser vista como uno del total de aspectos del problema de modelación.

El análisis dimensional es una poderosa herramienta que permite simplificar el estudio de cualquier fenómeno en el que estén involucradas muchas magnitudes físicas en forma de variables independientes. Su resultado fundamental, el teorema de Vaschy-Buckingham [6] (más conocido por teorema δ), permite cambiar el conjunto original de parámetros de entrada dimensionales de un problema físico por otro conjunto de parámetros de entrada adimensionales más reducido, conocidos como términos o números δ . Estos términos adimensionales se obtienen mediante combinaciones adecuadas de los parámetros dimensionales y no son únicos, aunque sí lo es el número mínimo necesario para estudiar cada sistema. Un procedimiento para el análisis dimensional de cualquier fenómeno físico puede ser resumido en los siguientes pasos, descritos a profundidad en [7-9]:

a. Con conocimiento del fenómeno físico por estudiar,

definir las n variables físicas involucradas, que deben ser independientes.

- b. Encontrar las r medidas fundamentales o dimensiones básicas que expresan todas las variables del problema: Longitud (L), Fuerza (F), Tiempo (T), Temperatura (T°), etc.
- c. Determinar el número mínimo de grupos adimensionales (términos π) mediante $n - r$.
- d. Hacer que cada término π dependa de $n - r$ variables fijas y que cada uno dependa además de una de las r variables restantes. Este proceso garantiza un grupo de términos π independientes.

Se dice que existe semejanza física cuando los términos adimensionales que se toman como variables independientes para la experimentación tienen el mismo valor en el modelo y en el prototipo (*requerimientos de similitud*). Existen problemas tecnológicos que pueden hacer imposible cumplir estrictamente esta condición, especialmente en modelos con propósito de reproducir la respuesta inelástica. La carencia de similitud (*similitud incompleta*), conocida o no, conduce a diferencias que son comúnmente denominadas “*efectos de tamaño*” [10]. Pueden ocurrir varios tipos de distorsiones que impedirían una similitud completa, incluyendo:

- a. Olvido accidental de una variable pertinente.
- b. Violación deliberada de un requerimiento de similitud considerado no crítico, tal como el uso de un material del modelo con una relación de Poisson diferente a la del material prototipo.
- c. Divergencias necesarias del modelo verdadero, tales como el uso de un sistema de cargas discretas para reemplazar una carga continua.
- d. Escalamiento erróneo de variables fundamentales en el fenómeno modelado.

4. Modelación dinámica de estructuras

El modelamiento dinámico de estructuras es importante en educación, investigación y diseño. En educación, los experimentos simples de laboratorio le demuestran los conceptos básicos de vibración a estudiantes universitarios y de posgrado. En el área de investigación estructural, los modelos dinámicos a pequeña escala han demostrado ser una fuerte

herramienta para extender el conocimiento y entendimiento sobre el comportamiento estructural en muchas situaciones complejas, donde las técnicas analíticas no son adecuadas. También un modelo cuidadosamente construido ayuda al diseño de muchas estructuras cargadas dinámicamente. En años recientes, la cantidad y la calidad de la información obtenida de las pruebas de modelos físicos dinámicos se han incrementado como resultado del mejoramiento de instrumentos y sistemas de procesamiento de datos. Las cargas dependientes del tiempo, de gran interés para los ingenieros estructurales, van desde las vibraciones elásticas inducidas por viento o tráfico hasta cargas de explosión e impacto, que pueden causar considerables daños estructurales. De especial interés es el problema de cargas de origen sísmico, las cuales, a causa de su natural dispersión y efectos naturales potencialmente devastadores, han asumido una mayor importancia en nuestra sociedad urbanizada.

La dinámica de una estructura es gobernada por el equilibrio balanceado de las fuerzas dependientes del tiempo que actúan sobre una estructura. Estas fuerzas están conformadas por: las fuerzas de inercia, que son producto de la masa local y la aceleración; las fuerzas resistentes, que están en función de la rigidez de la estructura en la dirección particular en la cual el movimiento está ocurriendo, y las fuerzas de amortiguamiento o disipación de la energía, ya sean relacionadas con el material o la construcción. En adición a estas fuerzas, que producen esfuerzos dinámicos y deformaciones en la estructura, hay ciertos tipos de estructuras masivas en las que los esfuerzos inducidos por la gravedad juegan un papel importante en las situaciones dinámicas y afectan la modelación.

4.1 Similitud dinámica

A manera de ejemplo representativo del uso de las leyes de similitud y escala, para un problema dinámico en particular, que involucre un sistema estructural, y por tanto variables físicas fundamentales de interés como fuerzas (Q), masas (M), longitudes (ℓ) y tiempo (t), cuyas dimensiones básicas comunes son F, L y T, puede aplicarse el modelo teórico general de la

similitud dimensional y determinar la relación básica que existe entre el modelo y el prototipo. Siguiendo el procedimiento descrito por Schuring [3], el término δ adimensional e independiente de interés que se puede tomar para el caso dinámico es:

$$\pi = \frac{Qt^2}{M\ell} \quad (1)$$

Si este único factor δ puede hacerse igual para el modelo (m) y el prototipo (p), la similitud dinámica completa podría ser obtenida de la siguiente relación:

$$\left(\frac{Qt^2}{M\ell}\right)_m = \left(\frac{Qt^2}{M\ell}\right)_p \quad (2)$$

Usando la definición de factor de escala,

$$\frac{Q_p}{Q_m} = S_Q \quad \frac{t_p}{t_m} = S_t \quad \frac{M_p}{M_m} = S_M \quad \frac{\ell_p}{\ell_m} = S_\ell \quad (3)$$

La relación modelo – prototipo está dada por:

$$S_Q = \frac{S_t S_M}{S_\ell^2} \quad (4)$$

Esta última ecuación puede ser tomada como una expresión analítica del principio de similitud dinámica, la cual es aplicable directamente a problemas dinámicos.

Caso de aplicación 1: si únicamente las fuerzas de gravedad son importantes para un problema dinámico en particular. En este caso es sencillo demostrar que $S_Q = S_M$, luego la relación entre el modelo y el prototipo queda como:

$$S_t = S_\ell^2 \quad (5)$$

Entonces, por ejemplo, un modelo con escala 1:9 vibra con 1/3 del periodo del prototipo y por tanto vibra tres veces más rápido que el prototipo.

Caso de aplicación 2: si solamente las fuerzas elásticas son de importancia en un problema dinámico en particular (caso usual de estructuras sometidas a vibraciones). Asumiendo que el modelo y el prototipo son del mismo material, se puede demostrar que $S_M = S_\ell^3$, luego la

relación dinámica entre el modelo y el prototipo queda como:

$$S_Q = \frac{S_t^4}{S_t^2} \quad (6)$$

Si el modelo y el prototipo son hechos del mismo material elástico, y dado que las deformaciones unitarias son adimensionales, $S_Q = S_t^2$, y la expresión obtenida se convierte en:

$$S_t = S_t \quad (7)$$

De este modo, un modelo a escala 1:4, tendría $\frac{1}{4}$ del periodo del prototipo. Este vibra 4 veces más rápido que el prototipo.

4.2 Requerimientos de similitud para respuesta sísmica

La carga sísmica es una consideración importante de diseño en muchas estructuras de ingeniería civil por su naturaleza potencialmente catastrófica. Tal razón sugiere en la práctica considerar el comportamiento inelástico como parte fundamental del diseño, a fin de garantizar seguridad y economía. Sin embargo, las consideraciones sísmicas imponen restricciones severas para las pruebas sobre modelos físicos, generalmente en lo que respecta a la elección de materiales, el sistema de carga y la medición, entre otras dadas por los requerimientos de similitud y la complejidad de este tipo de cargas.

Siguiendo un completo análisis dimensional y de similitud para modelación ante el fenómeno sísmico, de acuerdo con Krawinkler [5] se pueden considerar 15 cantidades físicas ($Q, q, a, g, v, t, l, \delta, \omega, E, \sigma, \varepsilon, \nu, \rho, EN$) y tres medidas fundamentales (F, L y T),

para obtener un total de 12 términos adimensionales que determinan la base para la obtención de los *requisitos de similitud para respuesta sísmica de estructuras*, los cuales están dados por las *leyes de escala* que se resumen en la tabla 2. La verdadera réplica de modelos (columna 4) satisface el total de requerimientos de escala, los cuales implican la réplica simultánea de las fuerzas inerciales, de gravedad y de restitución. Infortunadamente, tales modelos son prácticamente imposibles de construir y probar por las severas restricciones impuestas sobre las propiedades de los materiales del modelo, especialmente la densidad de masa. Simultáneamente, se presentan leyes de escala alternativas, que se muestran en las columnas 5 y 6 de la tabla 2, las cuales han mostrado que simulan el comportamiento de la estructura de manera adecuada. Se ha logrado éxito considerable en ensayos a escala reducida y componentes estructurales sobre mesas vibratorias [4], donde se ha agregado material adicional de naturaleza no estructural para simular la densidad a la escala requerida del modelo. Estas leyes de similitud con simulación de masa artificial son presentadas en la columna 5. Un tercer tipo de leyes de escala, mostradas en la columna 6, aplica al caso donde los esfuerzos generados por fuerzas de gravedad pueden ser no considerados en el comportamiento estructural y donde los materiales usados en el modelo y el prototipo sean los mismos. En este caso, resulta primordial trabajar el modelo con el material del prototipo con el fin de considerar la modelación verdaderamente útil para el caso inelástico, dado que omitir fuerzas de gravedad conduce a obtener resultados distorsionados (similitud no completa), por lo que lo valioso de esta modelación resulta de la observación directa del comportamiento, dejando como secundario las magnitudes de las mediciones.

Tabla 2. Resumen de factores de escala (S) para respuesta sísmica de estructuras

Variables Sísmicas Fundamentales		Dimensión (ingeniería) (3)	Tipo de Modelo		
Grupo (1)	Cantidad física (2)		Verdadera réplica (4)	Simulación artificial de masa (5)	Fuerzas de gravedad omitidas y material prototipo (6)
Cargas	Fuerza, Q	F	$S_E S_\ell^2$	$S_E S_\ell^2$	S_ℓ^2
	Presión, q	FL^{-2}	S_E	S_E	1.0
	Aceleración, a	LT^{-2}	1.0	1.0	S_ℓ^{-1}
	Aceleración gravitacional, g	LT^{-2}	1.0	1.0	Omitida
	Velocidad, v	LT^{-1}	$S_\ell^{1/2}$	$S_\ell^{1/2}$	1.0
	Tiempo, t	T	$S_\ell^{1/2}$	$S_\ell^{1/2}$	S_ℓ
Geometría	Longitud, ℓ	L	S_ℓ	S_ℓ	S_ℓ
	Desplazamiento, δ	L	S_ℓ	S_ℓ	S_ℓ
	Frecuencia, ω	T^{-1}	$S_\ell^{-1/2}$	$S_\ell^{-1/2}$	S_ℓ^{-1}
Propiedades del Material	Módulo de elasticidad, E	FL^{-2}	S_E	S_E	1.0
	Esfuerzo, σ	FL^{-2}	S_E	S_E	1.0
	Deformaciones, ϵ	-	1.0	1.0	1.0
	Relación de Poisson, ν	-	1.0	1.0	1.0
	Densidad de masa, ρ	$FL^{-4}T^2$	S_E/S_ℓ	*	1.0
	Energía, EN	FL	$S_E S_\ell^3$	$S_E S_\ell^3$	S_ℓ^3

$$* \left(\frac{g\rho\ell}{E} \right)_m = \left(\frac{g\rho\ell}{E} \right)_p$$

4.3 Simulación de carga gravitacional

Este numeral ilustra una divergencia de la similitud que puede ser anulada con la aplicación de simulación artificial de masa (leyes de escala, columna 5, tabla 2). De acuerdo con el hecho de que el número máximo de cantidades independientes dimensionalmente son iguales al número de dimensiones fundamentales involucradas, el ingeniero puede seleccionar solamente un número restringido de cantidades del modelo no consideradas para el prototipo. De esta forma, en problemas estáticos y dinámicos solo dos y tres cantidades del modelo, respectivamente, pueden ser arbitrariamente seleccionadas. Consideraciones prácticas determinan generalmente que la escala geométrica del modelo y ciertas propiedades de los materiales del modelo sean elegidas para ser compatibles con los materiales y el equipo disponible.

Si el peso muerto ejerce una importante influencia en el comportamiento estudiado, y seleccionando uno de los productos adimensionales (π) del problema que

lo involucre, como $\gamma\ell/E$, donde γ es el peso específico del material, E es el módulo de elasticidad del material (o alguna cantidad equivalente que represente las características de esfuerzo-deformación del material) y ℓ es la longitud representativa, en este caso, comúnmente solo dos cantidades del modelo pueden ser seleccionadas arbitrariamente, y dado que el producto adimensional precedente debe tener la misma magnitud en el modelo y el prototipo se obtiene:

$$\left(\frac{\gamma\ell}{E} \right)_m = \left(\frac{\gamma\ell}{E} \right)_p \quad \text{o} \quad \gamma_m = \gamma_p \frac{\ell_p E_m}{\ell_m E_p} \quad (8)$$

Como ejemplo, para el caso de una investigación, se tiene un prototipo de una estructura en tierra simulada con un modelo del mismo material a escala 1:5, donde $\gamma_m = \gamma_p = 19 \text{ kN/m}^3$. Pero el requerimiento de similitud de carga muerta dice que la densidad del material del modelo debería ser:

$$\gamma_m = \gamma_p \frac{\ell_p E_m}{\ell_m E_p} = 19 \text{ kN/m}^3 \frac{(5\text{m})(150 \text{ MPa})}{(1\text{m})(150 \text{ MPa})} = 95 \text{ kN/m}^3$$

Entonces el requerimiento no está satisfecho, ya que se presenta una divergencia de la similitud completa. Si la estructura es "esbelta", la diferencia entre el peso muerto dictado por las consideraciones de similitud y el proporcionado por el material del modelo puede ser adicionado a la superficie de la estructura. De otra parte, una estructura "masiva" puede requerir que la masa adicional sea dispersada a través del volumen de la estructura, como ocurre frecuentemente en estudios sobre modelos de grandes presas de concreto. Para el ejemplo, se necesitaría adicionar 5 veces el peso actual

del modelo. La aplicación de tales masas es complicada, ya que deben ser distribuidas a lo largo del modelo y a su vez no deben influenciar su rigidez. Se tiene que si originalmente el modelo pesa alrededor de 4 kN, agregando las pesas, quedaría pesando 20 kN. Esto indica un modelo muy robusto, difícilmente trabajable, posiblemente con afectaciones en la rigidez y que excedería las limitaciones del equipo de simulación. La figura 1 muestra cómo una masa adicional artificial fue adherida al modelo de vibración de un puente para simular los efectos de carga muerta.



Figura 1. Modelo de puente continuo para cargas dinámicas.

Fuente: www.ismes.org, Bergamo, Italia

Tres cantidades del modelo pueden ser arbitrariamente seleccionadas en problemas dinámicos. Este hecho podría conducir a no creer que el peso específico puede ser esa cantidad adicional. Sin embargo, los esfuerzos del peso muerto constituyen un fenómeno estático, y, en consecuencia, deben generalmente ser usados medios artificiales para proveer la simulación. Desde luego, si la respuesta estructural que es de interés no depende significativamente de la carga muerta, entonces el procedimiento más apropiado puede ser simplemente despreciar la discrepancia completamente. De esta forma, se tomarían los factores de similitud de la columna 6 de la tabla 2.

5. Caso de estudio - omisión de fuerzas de gravedad

Desde inicios del siglo pasado existen, a escala mundial, numerosos estudios de modelación estructural, los cuales muestran formas, variables y aplicaciones de

modelos. En este artículo, a fin de ilustrar el manejo y los beneficios de la modelación física a nivel regional, se muestra un modelo a escala 1:5 de una vivienda en adobe sometida a fuerzas de tipo sísmico simuladas mediante mesa vibratoria (figura 2). Dicho modelo hace parte de varios de los modelos producto de una investigación acerca de viviendas históricas en tierra en Colombia [11]. En este estudio de modelación se presenta el caso de la dificultad de adicionar masa adherida al modelo, debido a la magnitud considerable de la masa por adicionar, a la influencia de estas adiciones en el comportamiento de la estructura – especialmente en el rango inelástico– y a las afectaciones que la colocación de estas masas generen en la rigidez, principalmente en el proceso de falla. En consecuencia, se prefiere adoptar las leyes de similitud de la columna 6 de la tabla 2. Al utilizar las leyes de escala que omiten las fuerzas de gravedad se aceptan las limitaciones de obtención real de fuerzas internas, ya que no se ha considerado el efecto del peso propio,

que en este tipo de edificaciones resulta de fundamental importancia. Sin embargo, dado que se conservaron las propiedades del material del prototipo en el modelo,

el comportamiento del modelo es una adecuada representación del comportamiento del prototipo (fisuración, agrietamiento, mecanismos de falla, entre otros).



Figura 2. Modelación física para cargas sísmicas de vivienda en tierra a escala 1:5 [11]

En la figura 3 se muestra la señal de entrada al simulador dinámico, donde se ilustra el escalamiento de la solicitación sísmica normalizada a utilizar en

modelo con respecto a la solicitación definida de amenaza para el prototipo, de tal modo que sea coherente con las leyes de similitud adoptadas.

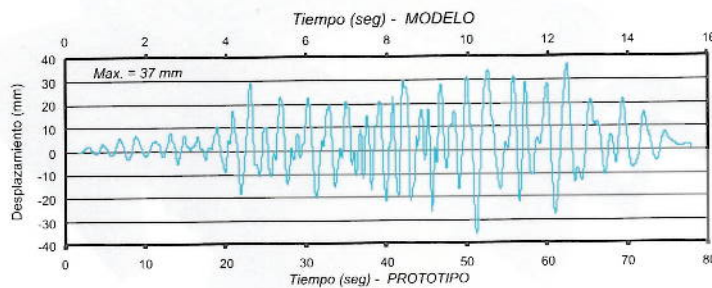


Figura 3. Solicitación sísmica con escalamiento en el tiempo para el modelo ($S_1 = 5$) [11].

En la actualidad, con la avanzada de los sistemas computacionales, la obtención de datos experimentales resulta de mayor utilidad para la verificación de la idoneidad de los métodos analíticos, a fin de que estos sean calibrados para ser aplicados a estructuras más complejas, que en definitiva son el motivo principal de

la investigación experimental. En la figura 4 se muestra el modelo de análisis obtenido mediante software especializado para el caso de estudio, sobre el cual se realizan todas las precisiones pertinentes en el rango elástico en comparación con el comportamiento real obtenido del modelo experimental.

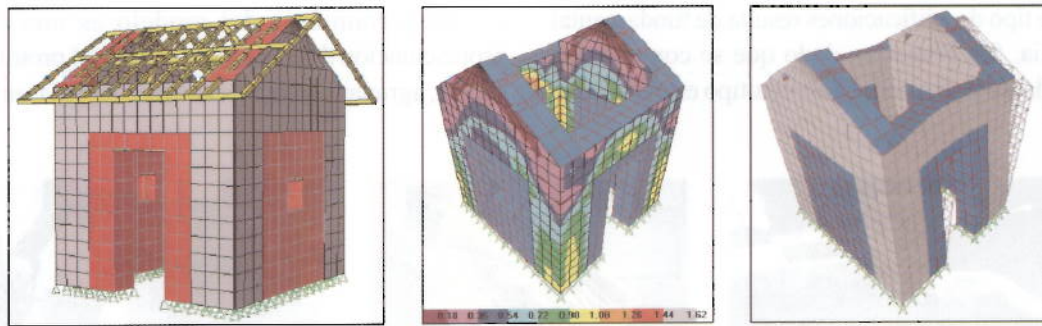


Figura 4. Modelo analítico para modelo experimental de vivienda en tierra [11].

Caracterizado y calibrado el modelo de análisis con base en el modelo experimental, es común definir los parámetros específicos del modelo computacional que deben asegurarse para el sistema estructural y el tipo de cargas analizadas, con el objeto de ser aplicado a

un modelo más complejo. En la figura 5 se muestra la aplicación de los resultados obtenidos del sistema modelado experimentalmente, en el análisis de comportamiento ante fuerzas sísmicas de una estructura compleja con sistema estructural semejante.

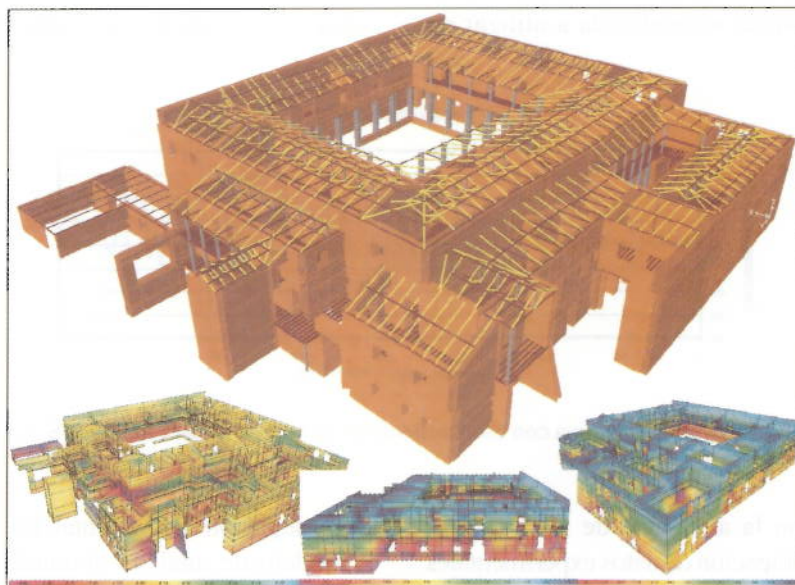


Figura 5. Modelo analítico de una estructura compleja en tierra [12].

6. Conclusiones

- Las pruebas sobre modelos físicos a escala de estructuras son ampliamente usadas en educación, en investigación, en diseño y en el desarrollo de productos y conceptos, y pueden considerarse como una de las más poderosas herramientas para el análisis de estructuras.
- Un estudio de modelación física o experimentación a escala requiere una cuidadosa planeación de las diversas etapas del proceso, ya que una desatención en alguno de los pasos ocasionaría resultados inciertos que pondrían en peligro la planeación y ejecución de la estructura real.
- La teoría de la modelación es una herramienta útil para la planeación, conducción e interpretación de un estudio experimental de comportamiento

estructural, la cual garantiza resultados valederos en el desarrollo de estructuras reales.

- La modelación a escala para cargas sísmicas resulta compleja, especialmente por los rigurosos requerimientos de similitud impuestos sobre las propiedades de los materiales del modelo, especialmente la densidad de masa. Sin embargo, utilizar leyes de escala alternas permite una modelación adecuada, pero con algunas restricciones en los resultados.
- La aplicabilidad de los modelos físicos en casos de diseño cambia continuamente como mejora de las posibilidades analíticas que permiten al ingeniero modelar matemáticamente estructuras cada vez más complejas. Sin embargo, el desarrollo de nuevas formas estructurales y materiales obligará a la experimentación a estar un paso adelante del análisis numérico.
- Ante acciones dinámicas, las técnicas analíticas manifiestan actualmente ser deficientes, por lo que se requiere forzosamente del resultado de pruebas experimentales.
- La investigación con base en procedimientos experimentales es la única manera de avanzar en el conocimiento del comportamiento de materiales y sistemas estructurales, por lo que muestra ser una insuperable forma en la ingeniería estructural de lograr investigación científica, dejando claro que la modelación computacional queda como complemento para la aplicación de conocimiento.

Referencias

- [1] J. Janney, J. Breen, H. Geymayer. *Use of models in structural engineering, in models for concrete structures*, ACI SP-24, American Concrete Institute. Detroit, 1970.
- [2] H. Harris, G. Sabnis. *Structural modeling and experimental techniques*, 2.ª edición, CRC Press. Florida - USA, 1999.
- [3] D. J. Schuring. *Scale models in engineering – Fundamentals and applications*, Pergamon Press. New York, 1977.
- [4] M. Mirza, H. Harris, G. Sabnis. *Structural models in earthquake engineering*. Proceedings of the Third Canadian Conference of Earthquake Engineering. Montreal, Quebec. Vol. 1, p. 551-549. June 1979.
- [5] H. Krawinkler, R. Mills, P. Moncarz. *Scale modeling and testing of structures for reproducing response to earthquake excitation*. The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil Engineering. Stanford University. Stanford, May 1978.
- [6] E. Buckingham. *On physically similar systems*, Phys, Rev. London, 1914.
- [7] IPSEN, D.C. *Units, dimensions, and dimensionless numbers*, McGraw-Hill. New York, 1960.
- [8] P. W. Bridgman. *Dimensional analysis*. Yale University Press, New Haven, CT. 1955.
- [9] N. Beaujoin. *Similitude and theory of models*. RILEM Bull. Paris, No. 7, June 1960.
- [10] G. Murphy. *Similitude in Engineering*. The Ronald Prees Company. New York, 1950.
- [11] A. E. Rodríguez, L. R. Fonseca. *Comportamiento sísmico y alternativas de rehabilitación de edificaciones en adobe y tapia pisada con base en modelos a escala reducida, ensayados en mesa vibratoria*. [Tesis de Maestría en Ingeniería Civil, Estructuras y Sísmica, Universidad de los Andes]. Bogotá, 2003.
- [12] A. Rodríguez, C. Calderón. *Estudio de vulnerabilidad y rehabilitación estructural del monumento Monasterio Santa Clara la Real*. [Proyecto de grado en Ingeniería Civil, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia]. Tunja, 2006.

Fecha de recepción: 20 de febrero de 2007
 Fecha de aprobación: 14 de agosto de 2007