

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA



**SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE
MUROS DE CONCRETO ENCAMISADOS CON PVC**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
DANIEL ESTEBAN CHÁVEZ

ASESOR: DR. JOSÉ ALBERTO ESCOBAR SÁNCHEZ

MÉXICO, D.F. CIUDAD UNIVERSITARIA, 2004



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



DEDICATORIAS

A mi madre Maria Elena Chávez Medina por ser la persona que dedico su vida a mí, eres lo más hermoso que me ha pasado en la vida.

A mi padre Juan Esteban Hernández por darme siempre su respaldo y haber estado siempre conmigo para así poder aprender de él.

A mi hermano Omar Esteban Chávez por ayudar a conformar mi familia.

A Miriam Villasana Ramirez por su compañía, apoyo y confianza.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

A todos los profesores incluyendo a mis sinodales que contribuyeron a mi formación académica.

A mi asesor de tesis Dr. José Alberto Escobar Sánchez.

A mi codirector de tesis M. Ricardo Andrés Trujillo Henao.

Gracias Señor por haberme permitido concluir mi carrera.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
FING/DCTG/SEAC/UTIT/092/04

Señor
DANIEL ESTEBAN CHÁVEZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. JOSÉ ALBERTO ESCOBAR SÁNCHEZ, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE MUROS DE CONCRETO
ENCAMISADOS CON PVC"**

- INTRODUCCIÓN
- I. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA
 - II. COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y TÉRMICO DEL PVC
 - III. COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO Y EL PVC
 - IV. ANÁLISIS NUMÉRICO
 - V. CALIBRACIÓN DEL MODELO DE ELEMENTOS FINITOS
 - VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 6 de Agosto de 2004.
EL DIRECTOR


M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/AJP/crc.



CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	3
ANTECEDENTES	5
1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	7
1.1 Elementos básicos.	7
1.2 Propiedades de los materiales.	9
1.2.1 Policloruro de vinilo (PVC).	9
1.2.2 Concreto.	11
1.2.3 Acero de refuerzo.	12
1.3 Método constructivo de los muros.	12
1.3.1 Consideraciones de ensamblado.	15
2. COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y TÉRMICO DEL PVC.	17
2.1 Deformación del PVC.	17
2.1.1 Deformación elástica.	18
2.1.2 Deformación plástica.	18
2.1.3 Deformación anelástica.	18
2.1.4 Deformación viscosa.	18
2.2 Flujo plástico o termofluencia.	18
2.3 Relajación de esfuerzo.	19
2.4 Influencia de la temperatura en el módulo de Young del PVC.	22
3. COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO Y EL PVC.	29
3.1 Efectos de la temperatura en el PVC y el concreto.	29
3.1.1 Tensiones térmicas.	35
3.2 Adherencia entre el PVC y el concreto.	36
3.3 Cambios volumétricos en el concreto.	39
4. ANÁLISIS NUMÉRICO.	42
4.1 Método del elemento finito.	42
4.2 Herramientas de cómputo.	43



4.3 Objetivo del análisis.43
4.4 Procedimiento de construcción del modelo.44
5. CALIBRACIÓN DEL MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.	49
5.1 Resultados obtenidos.	53
5.2 Aplicación del modelo calibrado.	58
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	65
APÉNDICE.	67
REFERENCIAS.86



INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el desarrollo tecnológico de diversos materiales ha evolucionado de tal forma que algunos de ellos han alcanzado resistencia y rigidez lo suficientemente altas para lograr sustituir estructuras metálicas por estructuras de polímeros, como es el ejemplo de los automóviles. Cada uno de los materiales compite por no perder presencia en el mercado, sin embargo, las propiedades específicas de cada material determinan el alcance de su uso.

En la industria de la construcción se han desarrollado distintos materiales y métodos constructivos. Para que cada uno de estos sistemas constructivos se pueda desarrollar y sea aceptado como un nuevo método, es necesario que previamente se realicen diversas pruebas y cálculos que determinen qué tanto se pueden adaptar y aportar soluciones a las necesidades requeridas.

Uno de los polímeros más usados en la industria de la construcción es el polivinilo de cloruro PVC, tanto rígido como flexible. En Canadá se ha desarrollado una técnica de construcción basada en muros de concreto encamisados con PVC. Para determinar las propiedades del sistema, se han realizado diversos ensayos. Debido a que las pruebas primordialmente se enfocan a los elementos básicos del sistema (muros), el alcance de los ensayos para realizar proyectos integrales se ve limitado. Por este motivo, se tiene la necesidad de buscar herramientas que permitan estudiar el comportamiento de estructuras sometidas a diferentes condiciones de carga.

Actualmente, las estructuras son analizadas con ayuda de programas de computadora que se basan en el Método del Elemento Finito. En su mayoría se encuentran enfocados a elementos estructurales tradicionales.

Desgraciadamente, no siempre se pueden reproducir adecuadamente todos los fenómenos físicos con los programas de computadora.

Debido a la geometría del sistema de muros de concreto encamisados con PVC, no es muy factible poder hacer modelos reales a escala que representen detalladamente los mecanismos de falla. Los ensayos están limitados tanto en el aspecto físico como en el económico. Una alternativa es el análisis estructural con la ayuda del Método del Elemento Finito, pero no existen programas orientados específicamente al sistema de muros de concreto encamisados con PVC, por lo que se deben de hacer consideraciones especiales para poderlos analizar.



Así, para poder efectuar una modelación es indispensable; realizar un análisis detallado de las propiedades de los elementos que integran el sistema, identificar la influencia de factores externos, establecer la forma en que trabajara el sistema y determinar el comportamiento durante su vida útil.

El presente trabajo tiene como objetivo modelar analíticamente los muros de concreto encamisados con PVC para estudiar su comportamiento. Así, en este trabajo se describe su procedimiento de construcción, sus restricciones, inconvenientes y ventajas.

Otro aspecto importante para poder desarrollar un modelo analítico confiable consiste en identificar las variables que influyen en el comportamiento estructural del sistema constructivo. Bajo esta idea, se detallarán las propiedades de los materiales que integran el sistema de muros encamisados, su comportamiento mecánico y su trabajo en conjunto.

Con este análisis se realizará un modelo analítico que incluya, en la medida de lo posible, las variables que influyen en el comportamiento del sistema. Para lograr esto, se compararán los resultados obtenidos con los registrados en ensayos de modelos reales.

Por último, se especifican las consideraciones pertinentes para tomar en cuenta factores que no puedan incluirse en el modelo.



ANTECEDENTES

El sistema de muros encamisados con PVC fue desarrollado en México por la compañía canadiense Royal Building Systems, RBS. Para este sistema, se elaboraron diferentes tipos de pruebas. Entre ellas se puede mencionar la de una casa prototipo. Considerando que los elementos del sistema tienen un mejor comportamiento en conjunto, en 1993 la firma TROW Consulting Engineering (TROW, 1994), elaboró un modelo a escala real de una casa de un solo nivel de 5X8 m en planta. Con la finalidad de evaluar el comportamiento de la casa ante las distintas posibles acciones como un conjunto integral, se efectuó una serie de ensayos. Uno de los objetivos importantes en estas pruebas fue poder evaluar el comportamiento de las conexiones que se utilizan en los muros y techos. Las evaluaciones que se hicieron son:

- Cargas gravitatorias en el techo.
- Ensayos de presurización y despresurización.
- Ensayos ante carga lateral.
- Ensayos de carga cíclica alternada a un muro previamente ensayado perteneciente a la casa prototipo.
- Ensayo de una ventana extruida para determinar si cumple con los requisitos de comportamiento.

También en Japón, la firma TROW Consulting Engineering (TROW, 1994), desarrolló un programa de ensayos y procedimientos de pruebas con la finalidad de evaluar la resistencia, rigidez y ductilidad de los muros. Las pruebas consistieron en muros de diferente altura y ancho sujetos a ciclos de carga en varios incrementos.

Otro de los trabajos que se han desarrollado, consiste en pruebas de flexión en vigas transversales de dos y tres metros de claro. El espécimen (viga) se rellena de diferentes materiales, espuma de uretano, concreto ligero, concreto normal y vacío (TROW, 1994). De acuerdo con los ensayos realizados, se llegó a la conclusión de que el comportamiento del PVC es función de la temperatura y la duración de la carga, además, sus efectos no son independientes de estos parámetros.

En México se han realizado diferentes tipos de pruebas experimentales, tales como carga axial, cortante, Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la UNAM (UNAM, 1998), Laboratorio del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC, 2001).



En 1996 la Facultad de Ingeniería de la UNAM (Hernández, 1996), efectuó pruebas de carga cíclica en muros RBS, simulando sismo, succión, presión, viento y peso propio, además, realizó ensayos de tensión diagonal en paneles de 10 cm de espesor rellenos de concreto elaborados en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería de la UNAM (UNAM, 1998).

El Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC, 2001) elaboró ensayos a compresión de paneles vacíos de 6.4 y 10.0 cm de espesor.

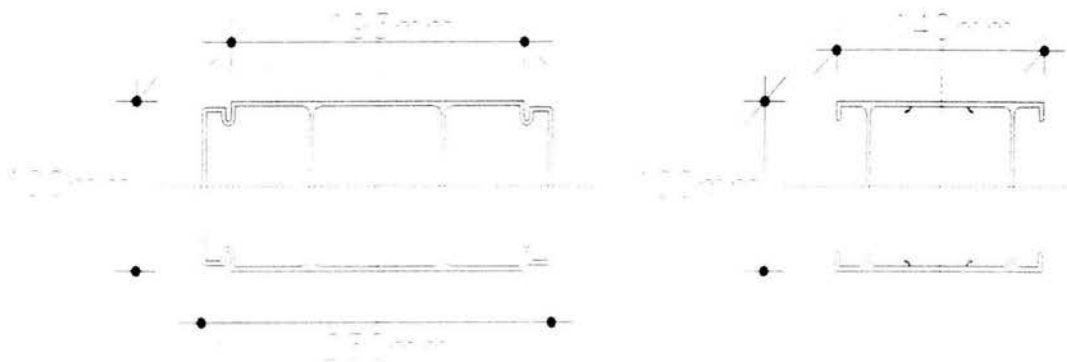
Todos estos ensayos han permitido conocer el comportamiento estructural del sistema RBS. Tomando en cuenta que se tienen resultados de los ensayos elaborados por la firma TROW, el IMCYC y la UNAM, se considera que los mencionados sirven de plataforma para desarrollar modelos analíticos.

1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

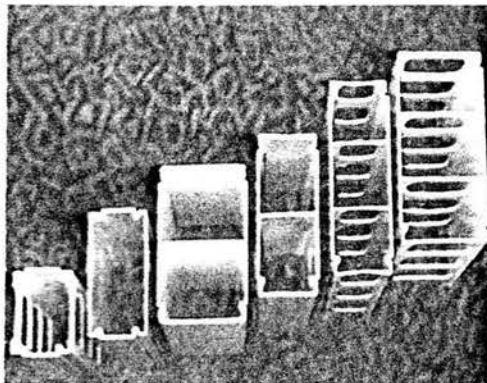
1.1 ELEMENTOS BÁSICOS

El sistema está constituido por piezas especiales de PVC rellenas de concreto y reforzadas con varillas de acero. Las piezas básicas son el panel y el conector.

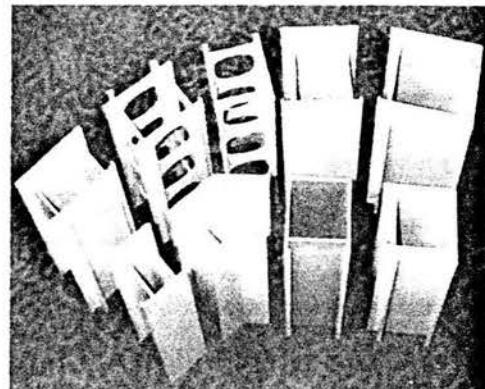
1. El **"Panel"**, es una sección rectangular de 232 mm X 100 mm (hembra) (Figura 1.1).
2. El **"Conector"** o caja conectora, es una sección de 140 mm X 100 mm, que se desliza por las canaletas integradas (macho) (Figura 1.1). Ambas piezas se fabrican a la longitud requerida del proyecto (con un máximo de 12 m).



a) Panel de tres celdas y conector



b) Paneles



c) Conectores

Figura 1.1. Tipos de paneles y conectores.

También existen distintos tipos de paneles, (Figura 1.1 b), y diferentes conectores que permiten realizar cambios de dirección como los mostrados en la Figura 1.1 c).

El módulo formado por la unión de un conector y un panel mide 333 X 100 mm. Los módulos pueden ser utilizados para formar muros o techos, pero no para entrepisos. El sistema también cuenta con piezas especiales como elementos de cambios de dirección, cerramientos, instalaciones, etc. (Figura 1.2).

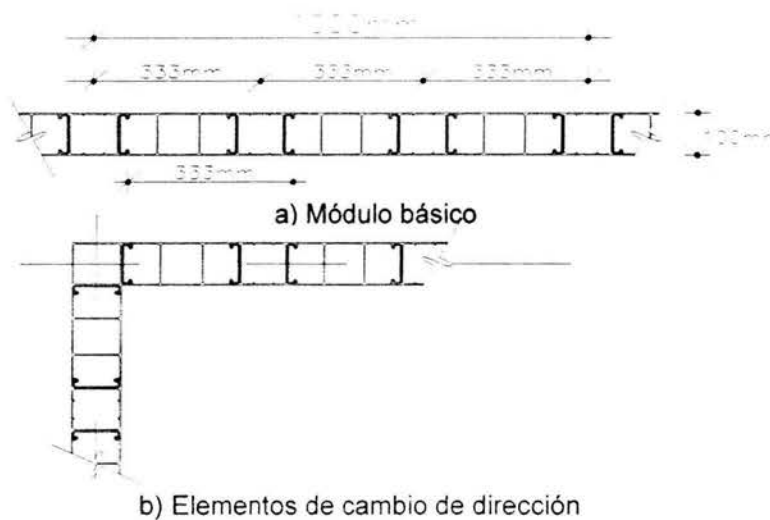


Figura 1.2. Módulo básico y elementos de cambio de dirección.

Según sus fabricantes, el sistema permite variaciones, como por ejemplo, el relleno de concreto puede ser sustituido por otro material o incluso omitirse, se puede tener o no refuerzo, tanto horizontal como vertical. Cada una de las combinaciones que se haga tendrá diferente capacidad de carga y deberá satisfacer los requerimientos que se tengan de acuerdo con el sistema estructural. La Figura 1.3 muestra un arreglo general del conjunto:

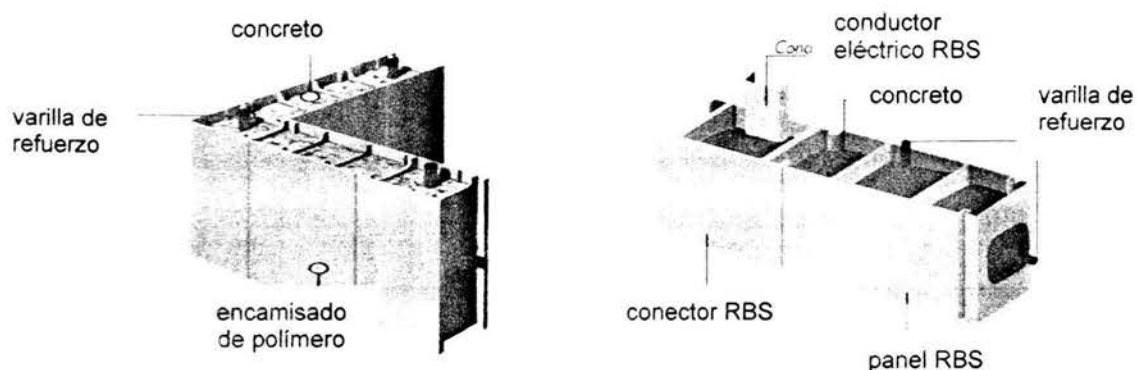


Figura 1.3. Piezas especiales de PVC rellenas de concreto.



1.2 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Considerando que el sistema, comercialmente conocido como Royal Building Systems (RBS), está constituido por PVC, concreto y varillas de acero de refuerzo y que estos tres elementos trabajan en conjunto. A continuación se mencionarán las propiedades más relevantes que intervienen en el comportamiento mecánico de estos tres materiales.

1.2.1 Policloruro de vinilo (PVC)

Es un polímero esencialmente amorfo y no cristalizable. Pertenece a la familia de los termoplásticos, que pueden volverse a formar de manera repetida aplicando calor y presión. A esto se debe su relativa sensibilidad a la temperatura. Las materias primas utilizadas para su producción son cloruro de sodio y actualmente petróleo o gases derivados.

Propiedades térmicas

Las propiedades térmicas más importantes que influyen en el comportamiento del PVC son la temperatura de transición vítrea y el coeficiente de expansión térmica.

La temperatura de transición vítrea es el punto por debajo del cual el polímero es muy resistente y rígido, pero frágil. Para el PVC la temperatura de transición vítrea, T_g , es aproximadamente de $80\text{ }^\circ\text{C}$ y varía con la temperatura de polimerización, (Rubin, 1999). El hecho de que el material sea amorfo significa que una vez alcanzada la temperatura de transición vítrea, las cadenas moleculares deslizan entre sí más fácilmente y su módulo de elasticidad disminuye rápidamente conforme aumenta la temperatura.

Los materiales se dilatan al aumentar su temperatura y se contraen cuando ésta se reduce. En un amplio intervalo la magnitud de las deformaciones es proporcional a la variación de la temperatura; el factor de proporcionalidad se denomina coeficiente de dilatación térmica. El valor del coeficiente de dilatación térmica del PVC es de $5.8 \times 10^{-5}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, (TROW, 1994).

Propiedades mecánicas

Al considerar que en el sistema RBS el PVC contribuye a resistir los esfuerzos de tensión en los muros, es decir, es equivalente al acero de refuerzo, el comportamiento mecánico del polímero debe ser comparado con el del acero.

Debido a que la temperatura de transición vítrea se alcanza a temperaturas relativamente bajas, el comportamiento mecánico de los plásticos obedece en gran medida a su temperatura.



El punto de fusión de los metales tiene la misma trascendencia que la temperatura de transición vítrea en los polímeros, pero la temperatura del punto de fusión es mucho más grande que la que pueden alcanzar los metales en el medio ambiente.

Algunas propiedades físicas del PVC se presentan en la Tabla 1.1, (TROW, 1994):

Tabla 1.1. Propiedades físicas del PVC.

Propiedad	Valor	Unidades
Resistencia al impacto	96.1	J/m
Coefficiente de expansión térmica	$<5.8 \times 10^{-5}$	cm/cm/°C
Temperatura de ablandamiento a 1.82 MPa, precalentada a 65°C	77.2	°C
Dureza(D)	79	
Contenido de ceniza	14	%
Contracción 1/2hr a 82°C	1.25	%
Gravedad específica	1.47	
Elongación a la ruptura	45	%
Elongación a la fluencia	2.7	%
Módulo de tensión	3095	MPa
Resistencia a tensión	37.9	MPa
Módulo de flexión	3136	MPa
Resistencia a la flexión	73.1	MPa
Dureza (Rockwell)	106	
Conductividad térmica	30.1	W/mK
Propagación de flama	Clase A	
Formación de humo	Clase A	
Velocidad de quemado	9	mm/10sec

Aditivos añadidos al PVC

El PVC se puede utilizar en muy pocas aplicaciones sin la adición de compuestos al material básico de forma que puede procesarse y convertirse en un producto acabado. Los aditivos del PVC se incluyen para resolver problemas de procesamiento o para lograr las propiedades deseadas en los productos finales. Las propiedades físicas del PVC dependen principalmente de su peso molecular. Cuanto mayor es este, mejores son las propiedades físicas del compuesto y de los productos pero habrá mayores dificultades en el procesamiento.



Los aditivos añadidos al PVC son:

Estabilizadores vinílicos. Las resinas del PVC son termo sensibles, es decir se degradan cuando se exponen a una fuente de energía como el calor y la luz. Para inhibir las reacciones de degradación durante el procesado, se añaden estabilizadores térmicos.

Los *lubricantes* ayudan a la fluidez del fundido de los compuestos del PVC durante el proceso. Las funciones de los lubricantes se pueden resumir en dos conceptos básicos:

- a) Reducen la fricción entre las moléculas del polímero fundido, controlan el calor de fricción y bajan la viscosidad del compuesto mejorando su flujo en el equipo de transformación. Clasificados como: *lubricantes internos*.
- b) Evitan la adhesión del compuesto a las superficies metálicas del equipo que lo procesa. Clasificados como: *lubricantes externos*.

Los *plastificantes* dan flexibilidad a los materiales poliméricos. El agregar o no plastificantes como aditivos es la distinción que se tiene para clasificar el PVC en rígidos y flexibles. Los elementos del sistema RBS están catalogados como rígidos. En general, los compuestos de PVC rígido contienen 90 % de resina, se adicionan compuestos al material básico de forma que pueda elaborarse.

Los *pigmentos* son utilizados para dar color, opacidad y resistencia a la intemperie.

Los *rellenos* se aplican para abaratar costos de los compuestos del PVC.

1.2.2 Concreto

Considerando que el concreto trabaja básicamente a la compresión, las especificaciones que se hacen respecto al concreto consisten principalmente en la resistencia a la compresión a los 28 días, el revenimiento y el tamaño de agregado.

Las acciones que se realizan para alcanzar las propiedades adecuadas del concreto son las comúnmente conocidas, se puede añadir aditivos superfluidificantes, reductores de agua, acelerantes, inclusores de aire, etc.

El revenimiento debe de ser el adecuado para que se tenga la seguridad de que no se crearán burbujas provocando que se formen huecos en el muro. Un valor adecuado oscila entre 100 y 125 mm.

El tamaño de agregado debe de ser pequeño con la misma finalidad que tiene el revenimiento, el tamaño máximo es de 10 mm (3/8").



El contenido de agua puede variar de acuerdo al contenido de humedad en los agregados.

Propiedades mecánicas

Según las recomendaciones de RBS, la resistencia del concreto a la compresión a los 28 días, para muros reforzados con varillas, debe ser superior a 150 kg/cm^2 , y para muros que no tengan refuerzo será al menos de 200 kg/cm^2 , (Hernández, 1996).

Propiedades térmicas

Para el concreto el coeficiente de dilatación térmica varía entre 8 y $14 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ dependiendo del tipo y de la cantidad de agregado grueso en la mezcla.

1.2.3 Acero de refuerzo

Propiedades mecánicas

Comúnmente las varillas de acero de refuerzo tiene una resistencia a la ruptura de $4\,000 \text{ kg/cm}^2$ y un módulo de elasticidad de $2\,000\,000 \text{ kg/cm}^2$.

Propiedades térmicas

Para las varillas de acero de refuerzo el coeficiente de dilatación térmica tiene un valor de $12 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, cercano al del concreto.

1.3 MÉTODO CONSTRUCTIVO DE LOS MUROS

Según RBS, la cimentación consiste ya sea de una losa de cimentación o una zapata corrida. El requisito fundamental para el desplante de los muros, es que se tengan anclajes de varillas de 15 mm de diámetro a cada 33.3 cm y anclados por lo menos 25 cm , sobresaliendo a 75 y 100 cm alternadamente sobre el nivel de la losa, tanto en cimentación como en entrepisos, (Figura 1.4).



a) Anclajes en losa de cimentación



b) Anclajes de entrepiso

Figura 1.4. Anclajes de varillas.



Para la colocación de los paneles de PVC se deben de colocar guías de madera al nivel de desplante con la finalidad de que los paneles estén alineados (Figura 1.5).

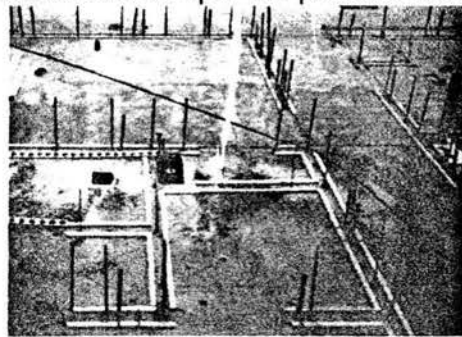


Figura 1.5. Guías de madera.

Antes de ensamblar las piezas de PVC se hace un registro físico sobre la losa de cimentación que deberá seguirse durante el ensamble de las piezas para asegurar que no existan alargamientos, holguras o descuadres, (Figura 1.6).

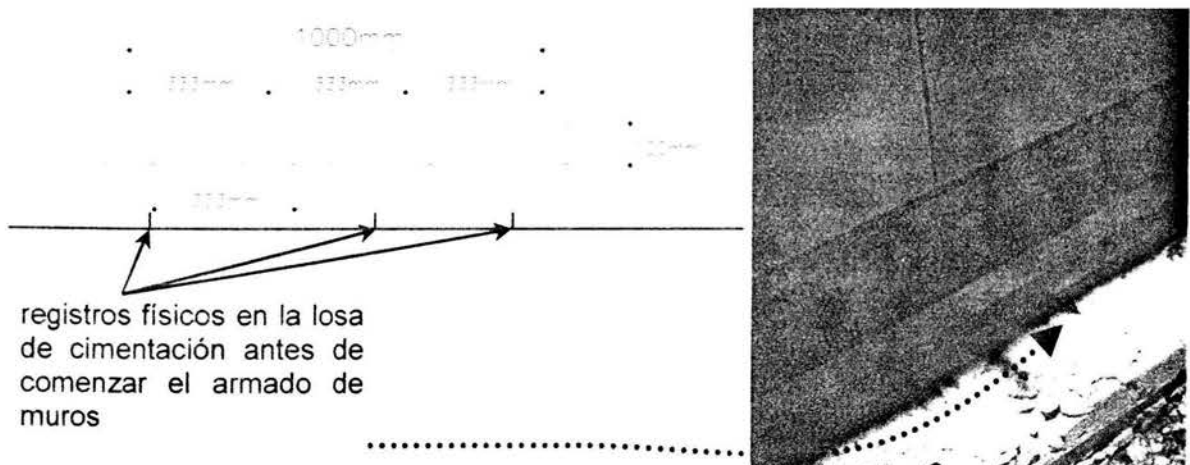


Figura 1.6. Registros en la losa de cimentación.

De la misma forma que se colocan las guías de madera en la parte inferior, se deben colocar elementos de madera en la parte superior que no permitan el movimiento de los muros, (Figura 1.7).

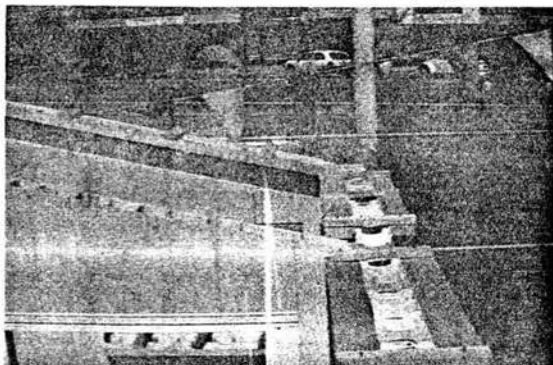


Figura 1.7. Elementos para fijar los paneles.



Para colar los muros, se ocupa una bomba pluma y de preferencia se usará una tolva para evitar que el concreto se derrame. Para prevenir que queden huecos en los muros se debe cuidar que el concreto tenga un revenimiento apropiado además de efectuar algún tipo de vibrado, (Figura 1.8).

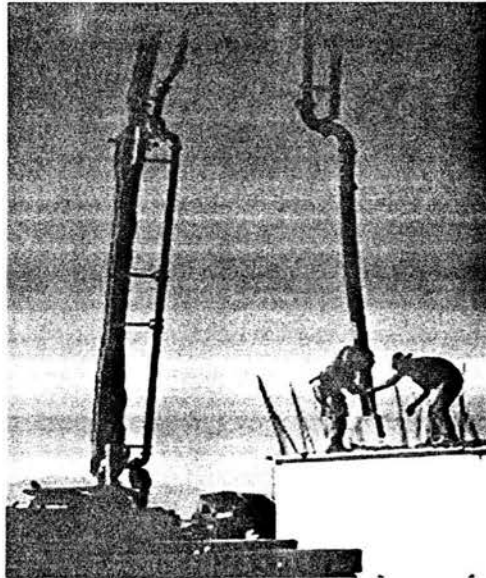


Figura 1.8. Vaciado del concreto en los paneles.

Para evitar que los muros se descuadren, el proveedor de los muros, recomienda que el personal que labora no maniobre sobre ellos, (Figura 1.9).

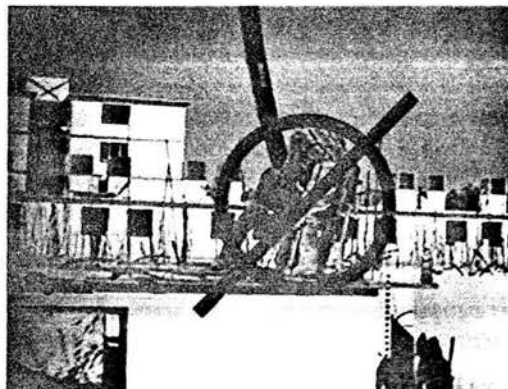


Figura 1.9. Maniobras inadecuadas en el método constructivo



Respecto al techo, solamente se pueden hacer cubiertas a dos aguas, con una pendiente constante, y descanso en muros cuyos bordes sean paralelos a la techumbre. El relleno que se aplica a los paneles debe de ser de un material ligero y aislante, además, los paneles se pueden reforzar internamente con elementos de acero. Para los entrepisos se permite utilizar un sistema de losa tradicional, de vigueta y bovedilla o losacero.

1.3.1 Consideraciones de ensamblado

Se entiende por ensamblado la colocación de los paneles y conectores para formar los muros, (Figura 1.10).

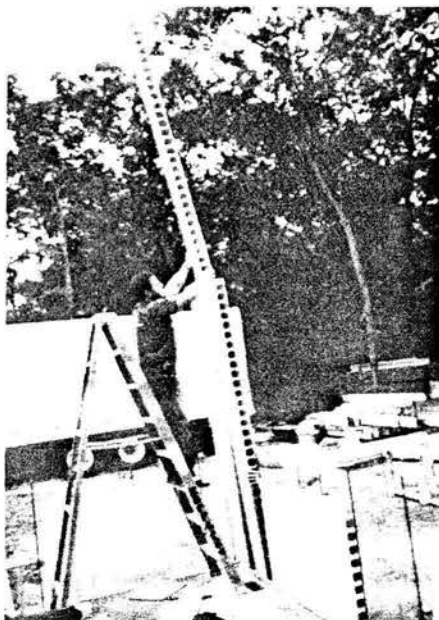


Figura 1.10. Ensamblado de muros.

Los componentes del sistema RBS son fabricados con una tolerancia de 0.38 mm. Sin embargo, debido al gran número de componentes que constituyen un muro, las longitudes reales durante la construcción varían con respecto a las dimensiones teóricas de proyecto. Además, la expansión térmica y las contracciones del polímetro afectan la longitud real del muro durante la construcción en el campo.

Bajo estas condiciones, se hacen las consideraciones pertinentes para tomar en cuenta las condiciones de campo en el proyecto. Para los componentes producidos después de agosto del 1 de 1999, (RBS 2, 2000), la experiencia de campo indica que las dimensiones del plan deben ser ajustadas como sigue:



Muros de 100 mm RBS4

- Con una temperatura de 5 °C aumentar las dimensiones del proyecto 0.0 % es decir 0.0 mm por 10 m.
- Para 20 °C aumentar las dimensiones del proyecto 0.10 % es decir 10 mm por 10 m.
- Para 35 °C aumentar las dimensiones del proyecto 20 % es decir 20 mm por 10 m.

También, los componentes del sistema RBS son fabricados para proveer empalmes flojos con una tolerancia de 0.25 mm, sin embargo, varios factores afectan la tolerancia final en el campo y la facilidad para resbalar de los componentes para la erección de los muros.

Para facilitar el ensamble de los muros se deben de hacer las consideraciones siguientes, (RBS 3, 2002):

- Almacenar adecuadamente los componentes para evitar dobleces en los surcos de conexión, (Figura 1.11).



Figura 1.11. Almacenamiento intercalado.

- En el momento del ensamblado de los muros la temperatura debe de ser de 10 a 30 °C.
- La temperatura de los elementos debe de ser uniforme para que no exista deformación discontinua en los elementos. Se debe de evitar que los elementos estén expuestos al sol de un solo lado.
- También se puede aplicar lubricantes para que los ensambles se realicen con mayor facilidad.



2. COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y TÉRMICO DEL PVC

2.1 DEFORMACIÓN DEL PVC

Las propiedades mecánicas de los polímeros se expresan con los mismos parámetros utilizados para los metales, módulo elástico, resistencia a la tracción, al impacto y a la fatiga.

A diferencia de los metales, en los polímeros termoplásticos la deformación es más complicada, ya que el proceso depende tanto del tiempo, la rapidez de aplicación de la carga y la temperatura. La mayoría de las características mecánicas de los polímeros son muy sensibles a la velocidad de deformación, a la temperatura y a la naturaleza química del medio.

La Figura 2.1 muestra los tres tipos de comportamiento que pueden tener los materiales poliméricos, (Callister, 1996). La curva de comportamiento elástico lineal corresponde al de un polímero frágil, se rompe cuando se deforma elásticamente. El comportamiento de la curva elástico-plástico es parecido al de los metales; después de la deformación elástica inicial el material fluye y luego se deforma plásticamente. El comportamiento de la curva elástico-no lineal es totalmente elástico.

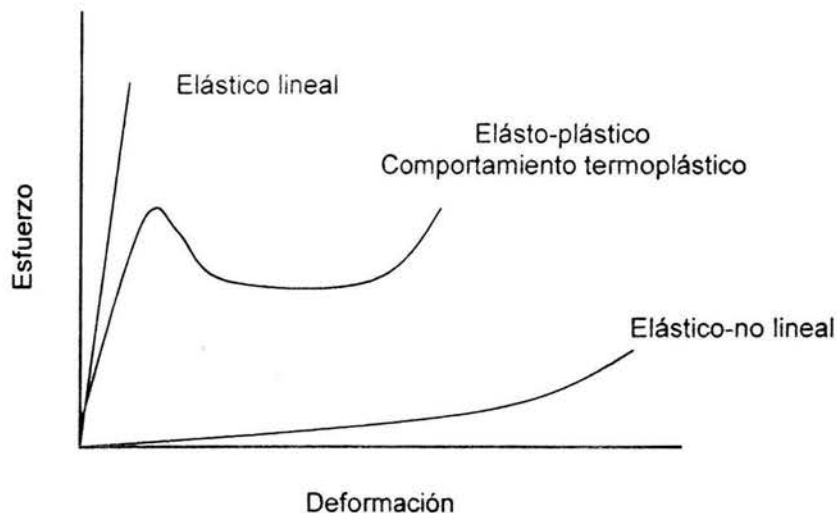


Figura 2.1. Curvas esfuerzo-deformación de los materiales poliméricos.

Los tipos de deformación que pueden sufrir los polímeros no dependen en su totalidad del esfuerzo que se les aplica, existen otros factores como, el tiempo de duración del esfuerzo aplicado y la temperatura, a continuación se describen los tipos de deformación de los polímeros:



2.1.1 Deformación elástica

Al aplicar un esfuerzo, la deformación elástica es instantánea y reversible, el esfuerzo es proporcional a la deformación. De aquí se puede obtener la deformación elástica aplicando la ley de Hooke:

$$\sigma = E \varepsilon \dots\dots\dots (2.1)$$

donde

E : constante propio de cada material (en el caso de los polímeros se ve afectado por la temperatura)

σ : esfuerzo aplicado

ε : deformación que sufre el material

2.1.2 Deformación plástica

En esta zona los esfuerzos no son proporcionales a las deformaciones. Un ligero aumento en el esfuerzo más allá del límite elástico resultara un colapso del material y causara que se deforme plásticamente. Este comportamiento se llama cedencia. El esfuerzo que causa la cedencia se llama esfuerzo de cedencia o punto de cedencia (Hibler, 1995).

2.1.3 Deformación anelástica

La deformación anelástica depende del tiempo, los movimientos intermoleculares del PVC son provocados por el esfuerzo (Anderson, 1998).

2.1.4 Deformación viscosa

La fluencia viscosa ocurre cuando la temperatura aumenta por encima de la temperatura de transición vítrea. Otro mecanismo es cuando se aplica un esfuerzo lentamente, el material se comporta como un líquido viscoso. La deformación depende del tiempo y no es totalmente reversible (Anderson, 1998).

2.2 FLUJO PLÁSTICO O TERMOFLUENCIA

El flujo plástico, consiste básicamente en la deformación continua bajo un esfuerzo constante empleando una temperatura constante, al aplicar un esfuerzo a un polímero amorfo, se presenta una deformación, que a diferencia de los metales, no llega a tener un valor constante, la deformación sigue. Estrictamente, la deformación ocurre para cualquier temperatura, pero entre más grandes sean, tanto la temperatura como el esfuerzo, mayor será la deformación, (Askeland, 1998).



Muchos materiales poliméricos experimentan una deformación al aplicar un esfuerzo constante, dicha deformación dependerá del tiempo. El ensaye de fluencia de los polímeros se realiza de la misma manera que para los metales. Normalmente se emplea un esfuerzo de tracción y se mantiene constante mientras se determina la deformación en función del tiempo. Además, el ensaye se realiza en condiciones isotérmicas. Los resultados de fluencia se representan como el *módulo de fluencia* $E_c(t)$, que depende del tiempo y se define como:

$$E_c(t) = \frac{\sigma_0}{\epsilon(t)} \dots\dots\dots (2.2)$$

donde

σ_0 : esfuerzo constante aplicado

$\epsilon(t)$: es la deformación que depende del tiempo.

El módulo de fluencia es sensible a la temperatura y disminuye al aumentar la temperatura.

2.3 RELAJACIÓN DE ESFUERZO

De otra forma, para mantener una deformación constante, el esfuerzo debe disminuir con el tiempo, a este fenómeno se le conoce como *relajación del esfuerzo*. La relación del tiempo y el esfuerzo se puede expresar como (Smith, 1998):

$$\sigma_t = \sigma_0 e^{-t/\lambda} \dots\dots\dots (2.3)$$

donde

σ_t : esfuerzo en el tiempo

σ_0 : esfuerzo inicial

t : tiempo

λ : tiempo de relajación, es una propiedad del material y se define como el tiempo necesario para que la tensión (σ) decrezca 0.37 (1/e) de la tensión inicial.

En una curva típica de fluencia-tiempo (Figura 2.2), se pueden distinguir cuatro etapas (Anderson, 1998):

- O-A deformación inicial instantánea de tipo elástico.
- A-B la fluencia disminuye continuamente y se denomina fluencia primaria.
- B-C la velocidad de fluencia se vuelve constante, fluencia secundaria o estado estacionario.
- C-D la fluencia se acelera y termina en una fractura, fluencia terciaria.

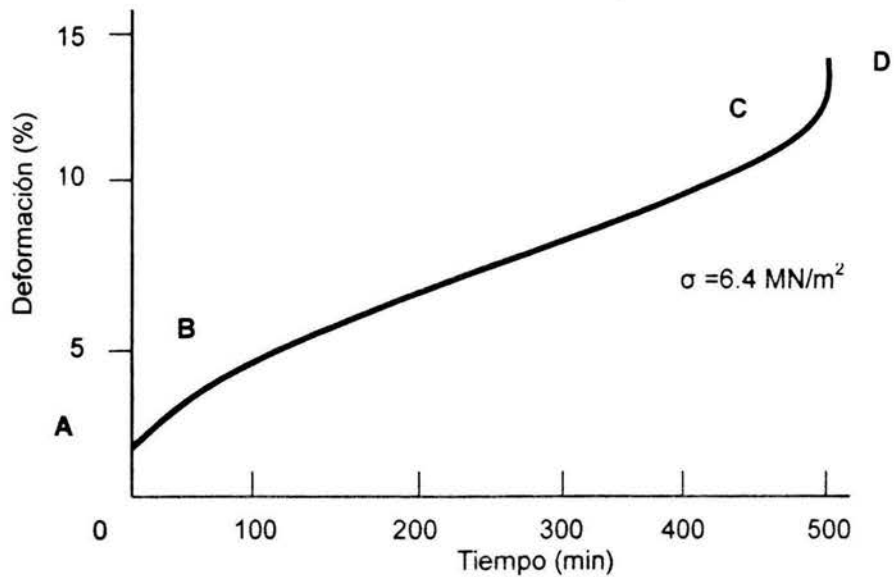


Figura 2.2. Curva de deformación por fluencia contra tiempo para el plomo a temperatura ambiente.

El efecto del esfuerzo y la temperatura se ilustran en la Figura 2.3. Si $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ entonces $T_1 > T_2 > T_3$ otra posibilidad es $T_1 = T_2 = T_3$ entonces $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

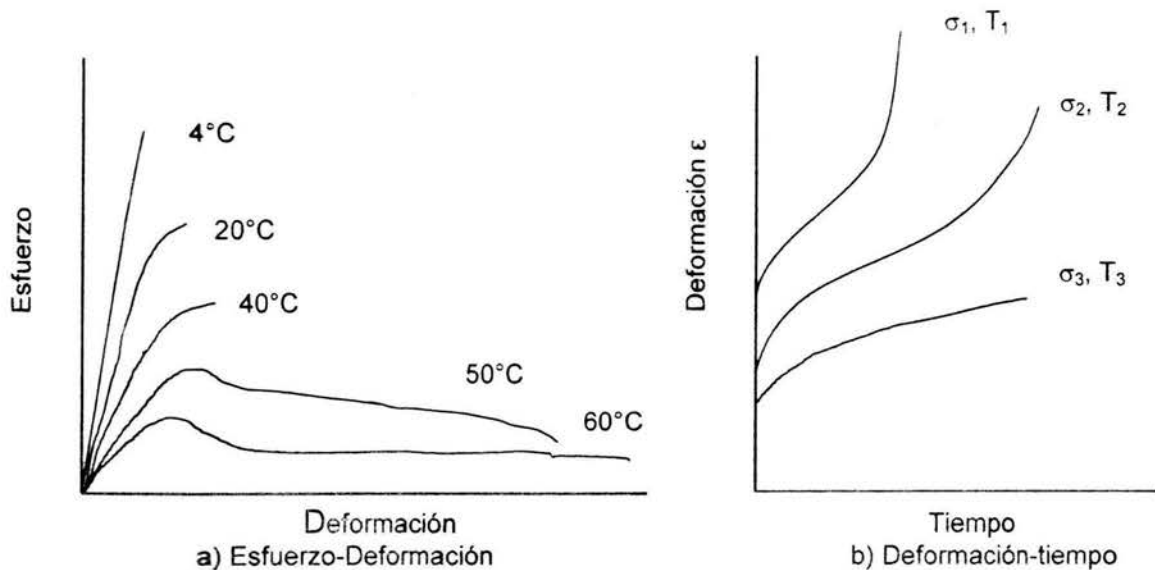


Figura 2.3. Efecto de la temperatura en los polímeros.

El comportamiento viscoelástico de los materiales depende del tiempo y la temperatura. Para medir y cuantificar este comportamiento se utilizan varias técnicas experimentales. Las medidas del esfuerzo de relajación representan una posibilidad. Este ensaye consiste en deformar rápida y levemente una probeta



hasta un nivel predeterminado. El esfuerzo necesario para mantener esta deformación a temperatura constante se mide en función del tiempo. El esfuerzo decrece con el tiempo debido al fenómeno de relajación molecular que ocurre dentro del polímero. Se puede definir un *módulo de relajación* $E_r(t)$, un módulo elástico en función del tiempo, (Callister, 1996)

$$E_r(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} \dots\dots\dots (2.4)$$

donde

$\sigma(t)$: esfuerzo medido que depende del tiempo

ε_0 : nivel de deformación, que permanece constante. También depende de la temperatura, disminuye al aumentar la temperatura.

La diferencia entre la ecuación (2.2) y la (2.4) es que en la primera, la deformación cambia conforme transcurre el tiempo y el esfuerzo se mantiene constante, en la segunda, el esfuerzo cambia en función del tiempo y la deformación se mantiene constante.

Por otra parte, es posible calcular el tiempo de ruptura por fluencia para cualquier combinación de esfuerzo y temperatura. Un criterio, que permite evaluar el tiempo de vida de un material, de acuerdo a la temperatura a la cual trabaja, es el criterio de Larson - Miller, (Anderson, 1998) el cual establece que:

$$LM = T(C + t_r) \dots\dots\dots (2.5)$$

donde

T : temperatura en °K

C : constante que depende de la velocidad de deformación del material

t_r : tiempo de ruptura.

El parámetro LM permanece constante para diferentes valores de T y t_r . Así, cuando se conoce el tiempo de vida que se espera que tenga un material y la temperatura normal de operación, es posible determinar la temperatura de sobrecalentamiento que pudo alcanzarse en el material de tal forma que se produzca en él una falla.

El cálculo del tiempo de ruptura por fluencia para cualquier combinación de esfuerzo y temperatura, se realiza a partir de una curva de esfuerzo contra el parámetro de Larsen-Miller, como la mostrada en la Figura 2.4, que corresponda a un determinado material.

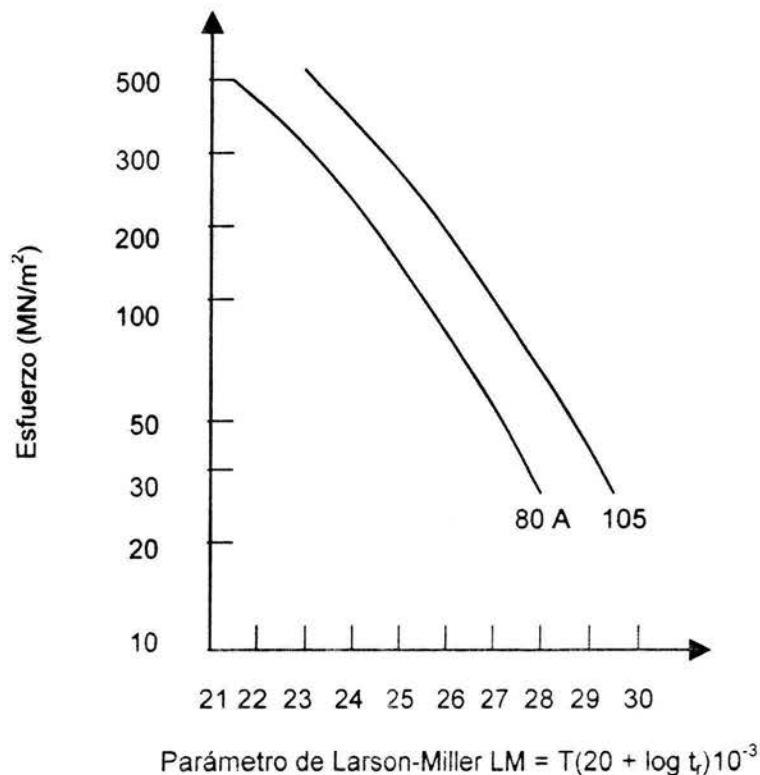


Figura 2.4. Curvas para dos aleaciones de níquel a alta temperatura.

2.4 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN EL MÓDULO DE YOUNG DEL PVC

El módulo de Young o módulo de elasticidad, se define como la relación entre el incremento o decremento de esfuerzo y el cambio correspondiente a la deformación unitaria, es una constante independiente del esfuerzo, siempre y cuando no exceda el valor máximo denominado límite elástico y es propio de cada material.

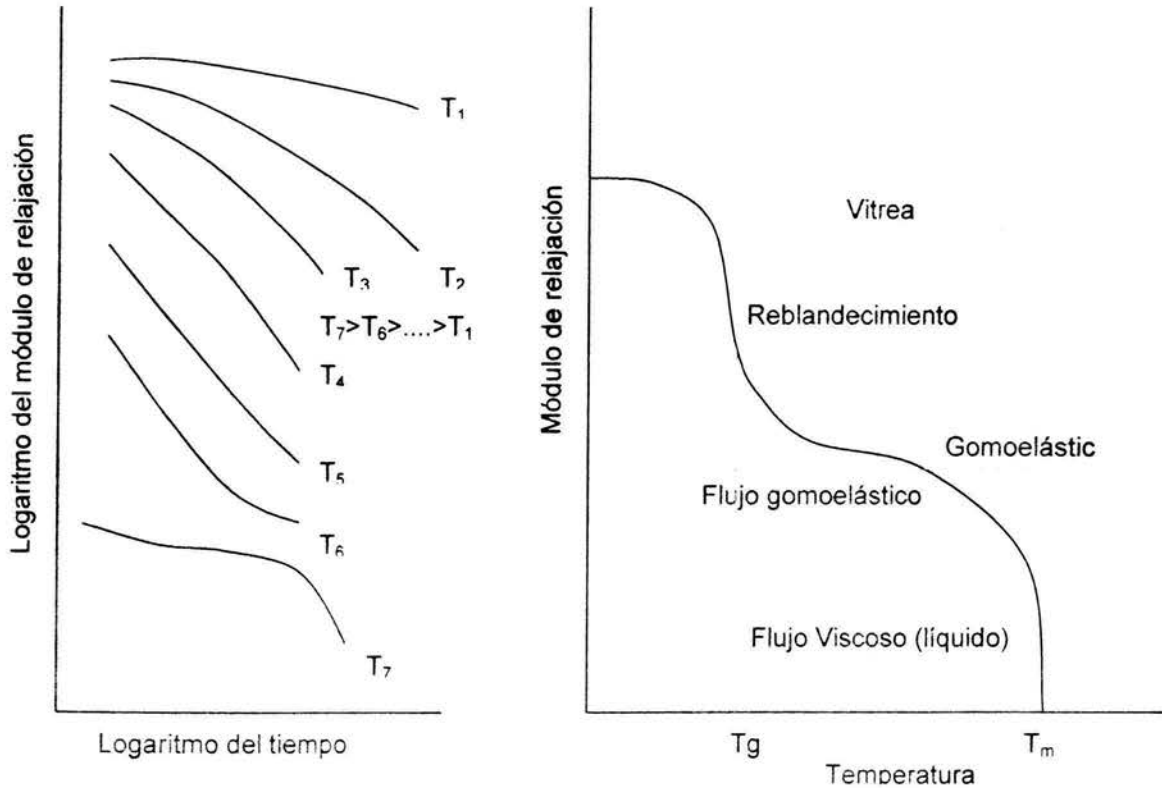
En el caso de los polímeros termoplásticos, al variar la temperatura el módulo de elasticidad no se mantiene constante.

Por encima de la temperatura de transición vítrea los termoplásticos se deforman más rápido y la relajación de esfuerzos se acelera, el modo de ruptura de los materiales regularmente será dúctil.

Por debajo de la temperatura de transición vítrea los efectos se ven minimizados y la ruptura generalmente es de forma frágil.



La Figura 2.5 a, (Callister, 1996) muestra el comportamiento del módulo de elasticidad en función del tiempo y la temperatura, y la Figura 2.5 b, muestra las cinco diferentes regiones del comportamiento viscoelástico de un polímero amorfo.



a) Variación del módulo de relajación de un polímero en función del tiempo

b) Variación del módulo de relajación de un polímero debido a la temperatura (T_g : temperatura de transición vítrea T_m : temperatura de fusión)

Figura 2.5. Variación del módulo de elasticidad de un polímero.

Con la finalidad de analizar el comportamiento del módulo de elasticidad del polímero en el sistema RBS, se hace referencia a los reportes de los ensayos aplicado a la casa prototipo proporcionados por la compañía TROW Consulting Engineers Ltd. (TROW, 1994). En él se menciona que el comportamiento del techo de la casa es función de la temperatura y de la duración de la carga. Con esto se confirma que, la temperatura y la duración de la carga no son independientes.

En los reportes (Stephenson, 1993), se presentan coeficientes de deformación por temperatura y duración de la carga, (Tabla 2.1). Dichos coeficientes se utilizan para calcular la deformación total de elementos de techo. La deformación total (D_T) se calcula multiplicando la deformación inicial (D_I) a 25°C por el coeficiente de deformación indicado en la Tabla 2.1.



Tabla 2.1. Coeficientes de deformación por temperatura y duración de carga.

Temperatura °C	Duración de la carga			
	Inmediata (10 minutos)	24 horas	2 meses	25 años
25	1.00	1.20	1.32	1.53
35	1.12	1.39	1.57	1.99
45	1.28	1.68	2.16	No disponible *
55	1.51	2.82	No disponible *	No disponible *

* Combinaciones de temperatura y combinaciones de carga poco probable.

Con los coeficientes de deformación (Stephenson, 1993), se elaboró una gráfica que muestra la variación del coeficiente de deformación para distintas temperaturas, (Figura 2.6), cada serie representa una duración de carga.

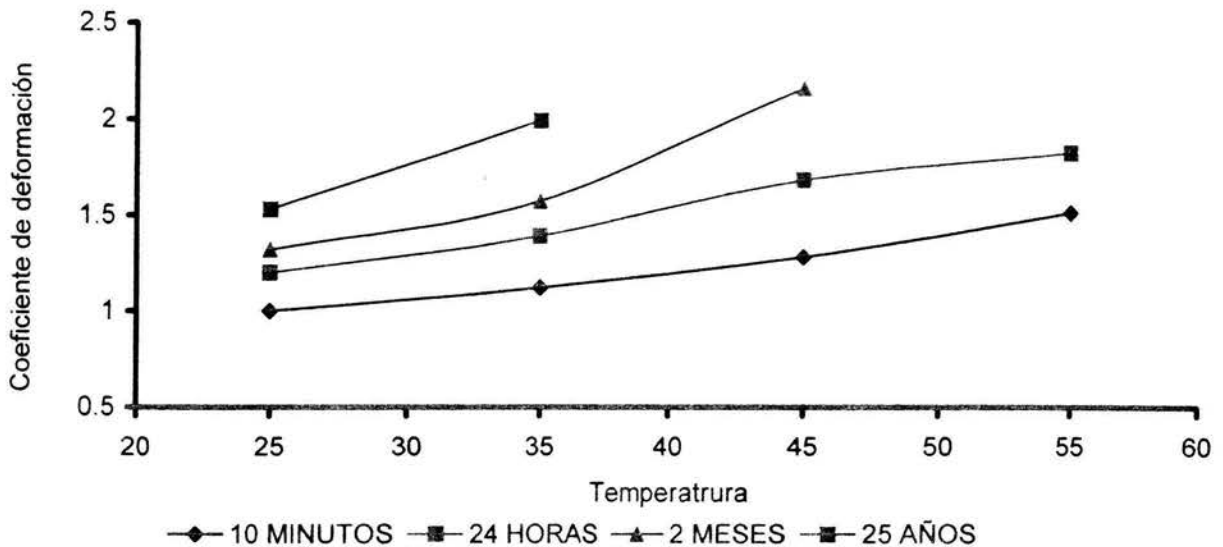


Figura 2.6. Variación del coeficiente de deformación debido a la temperatura del PVC.

En la Figura 2.7, se muestra el comportamiento del módulo de elasticidad de acuerdo con la variación de la temperatura. La gráfica se elaboró dividiendo el módulo de elasticidad entre su coeficiente correspondiente, cada serie representa



una duración de carga diferente. Se observa que el caso más desfavorable es una temperatura alta con una duración de carga grande.

Comparando la Figura 2.7 con la Figura 2.5 a, se puede observar que en la primera, cada serie se trata solamente de una parte de la segunda. Considerando que la temperatura de transición vítrea del PVC se encuentra alrededor de los 80 °C se puede ubicar la Figura 2.7 en la zona vítrea de la Figura 2.5 b, es decir, el comportamiento mostrado ocurre antes de alcanzar la temperatura de transición vítrea. Con esto se afirma que el módulo de elasticidad del PVC disminuirá drásticamente conforme aumente la temperatura.

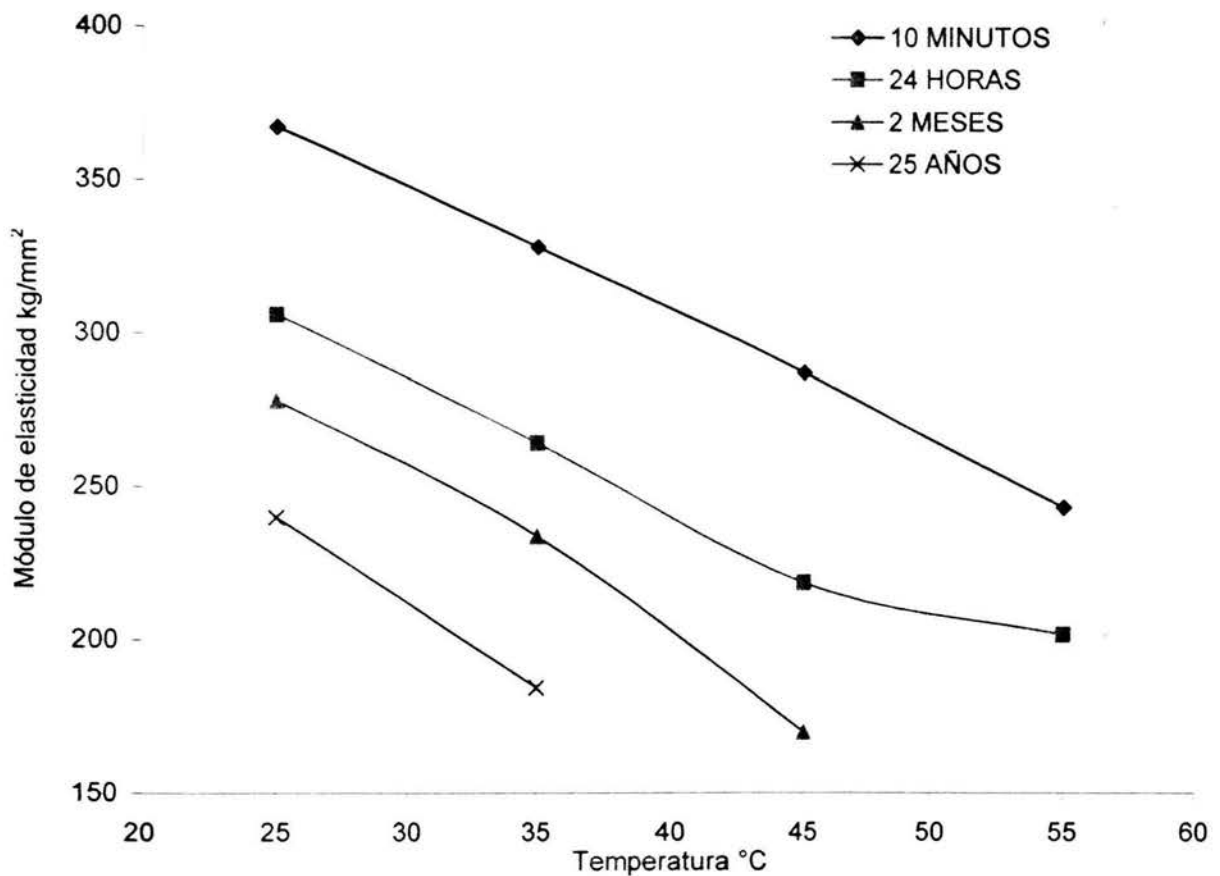


Figura 2.7. Variación del módulo de elasticidad en función de la temperatura del PVC.

Aplicando una regresión polinomial a los datos mostrados en la Figura 2.7, se obtienen ecuaciones que representen el valor del módulo de elasticidad en función de la temperatura T . Cada ecuación representa un tiempo de duración de carga, (Tabla 2.2). El coeficiente de correlación R , de cada una de las ecuaciones obtenidas es 1, lo que significa que la confiabilidad de las ecuaciones es buena.



Tabla 2.2. Ecuaciones que representen el valor del módulo de elasticidad para cualquier valor de la temperatura T.

Duración de carga	Módulo de elasticidad del PVC (kg/mm ²) en función de T (°C)	Coefficiente de correlación R ²
10 min.	$E_{10 \text{ min.}} = -0.0109 T^2 - 3.258 T + 455.2$	1
24 horas	$E_{24 \text{ horas}} = 0.0625 T^2 - 8.5814 T + 482.93$	0.992
2 meses	$E_{2 \text{ meses}} = -0.0979 T^2 + 1.4462 T + 303.06$	1
25 años	$E_{25 \text{ años}} = -5.5447 T + 378.49$	1

En la Figura 2.7 se puede observar que en el intervalo de temperatura que va de 25 a 35 °C, el comportamiento de todas las curvas es gráficamente lineal con pendientes muy parecidas entre sí. Las rectas en el intervalo mencionado para una duración de 10 min, 24 horas, 2 meses y 25 años están dadas por,

$$E_{10 \text{ min}} = -3.9321 T + 465.3 \dots\dots\dots (2.6)$$

$$E_{24 \text{ horas}} = -4.1805 T + 410.34 \dots\dots\dots (2.7)$$

$$E_{2 \text{ meses}} = -4.4272 T + 388.71 \dots\dots\dots (2.8)$$

$$E_{25 \text{ años}} = -5.5447 T + 378.49 \dots\dots\dots (2.9)$$

donde

E : módulo de elasticidad en kg/mm²

T : valor de la temperatura en °C

Para simplificar el cálculo del módulo de elasticidad, se puede emplear una hoja de cálculo, como la mostrada en la Figura 2.8, que permita hacer combinaciones del tiempo y duración de la carga.

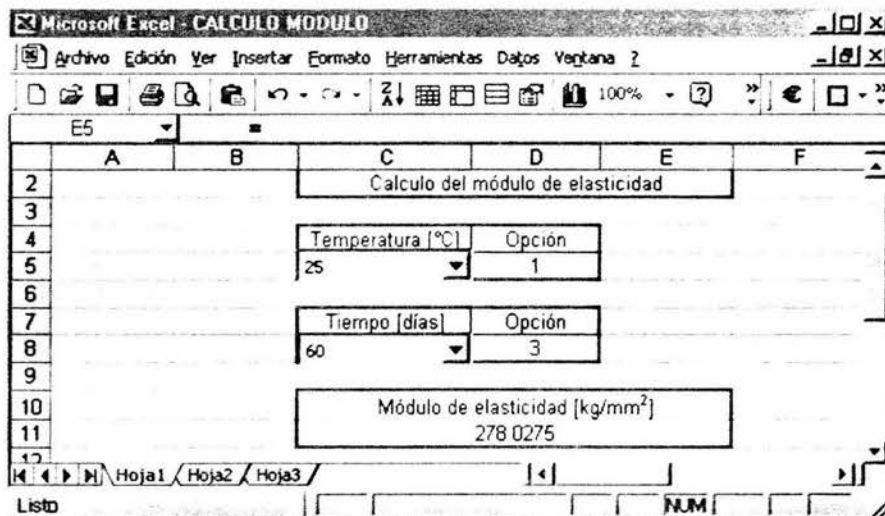


Figura 2.8 Hoja de cálculo que permite determinar el valor del módulo de elasticidad del PVC.



Para comparar la aproximación de los valores calculados del módulo de elasticidad y los obtenidos con el coeficiente de deformación, se calcula el porcentaje de error relativo entre estos, (Tabla 2.3).

Tabla 2.3. Porcentaje de error relativo entre los módulos de elasticidad calculados con las ecuaciones de la Tabla 2.2 y los medidos.

T (°C)	Duración de aplicación de la carga t(días)	Calculado E_c (kg/mm ²)	Medido E_m (kg/mm ²)	Error relativo (%) $\frac{E_c - E_m}{E_m} \times 100$
25	0.0069	366.9	367.0	-0.027
25	1	307.5	305.8	0.556
25	60	278	278.0	0.000
25	9131	239.9	239.9	0.000
35	0.0069	327.8	327.7	0.031
35	1	259.1	264.0	-1.856
35	60	233.7	233.8	-0.043
35	9131	184.4	184.4	0.000
45	0.0069	286.5	286.7	-0.070
45	1	223.3	218.5	2.197
45	60	169.9	169.9	0.000
45	9131	129.0	*	*
55	0.0069	243	243.0	0.000
55	1	200	201.6	-0.794
55	60	86.5	*	*
55	9131	73.5	*	*

En la Tabla 2.3 se muestra que el valor del error relativo es muy bajo, esto indica que el cálculo del módulo de elasticidad mediante ecuaciones es confiable.

Debido a que el comportamiento del módulo de elasticidad cambia drásticamente al alcanzar la temperatura de transición vítrea (80 °C), este método está restringido a temperaturas menores a 80 °C.

Es importante mencionar que debido a que los coeficientes de deformación de la Tabla 2.1 únicamente fueron obtenidos para los intervalos de temperatura que van de 25 a 55 °C, las ecuaciones de la Tabla 2.2 son aplicables solo para este intervalo. Además, ya que se tienen cuatro valores de duración de la carga, se pueden hacer interpolaciones.



Por otro lado, los coeficientes de deformación de la Tabla 2.1 fueron obtenidos de la referencia (Stephenson, 1993). En ésta no se especifica qué procedimiento se siguió para obtenerlos. Con esto, no se puede determinar qué confiabilidad se puede tener de los coeficientes de deformación. Al comparar la Figura 2.7 con la Figura 2.5 a, se puede observar que la forma de las curvas de la primera es concordante con las de la segunda, por este motivo, se tomaron como punto de partida para determinar el comportamiento del módulo de elasticidad del PVC.

Considerando lo anterior, es recomendable hacer ensayos encaminados a obtener coeficientes de deformación del PVC en un intervalo de temperatura más amplio. Se sugiere que el valor inferior del intervalo sea de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, esto por que la temperatura ambiente puede alcanzar estas magnitudes. Para el valor superior del intervalo, considerando que la temperatura de transición vítrea es de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, se propone que sea de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.



3. COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO Y EL PVC

3.1 EFECTOS DE LA TEMPERATURA EN EL PVC Y EL CONCRETO

Existen tres tipos de transferencia de calor: por *conducción*, por *convección* y por *radiación*, (Karlekar, 1986).

En el caso de la *conducción*, el calor se transmite por diferencia de temperaturas.

La *convección* ocurre cuando una superficie está en contacto con un fluido, en este caso el aire, que tiene temperatura diferente a la de la superficie en cuestión.

A diferencia de las anteriores, en la *radiación* los materiales no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separados por un vacío. Esto es así porque la radiación térmica es radiación electromagnética que se emite en una banda de longitud de onda entre 0.1 y 100 micrómetros.

Estos efectos pueden presentarse combinados. En el sistema RBS se presentan los tres tipos de transferencia de calor, *conducción*, *convección* y *radiación*, pero en ciertos momentos uno influye más que los otros.

Las etapas que experimenta un sistema construido basado en muros RBS durante un ciclo extremo (noche y día con temperaturas extremas) son las siguientes:

Durante la noche, la temperatura ambiente puede llegar a descender hasta alcanzar 2 °C, por ejemplo en Ciudad Juárez. El PVC y el flujo de aire experimentan convección natural, a su vez el PVC y el concreto sufren el fenómeno de conducción.

En la misma ciudad, en el transcurso del día, la temperatura ambiente podría aumentar hasta alcanzar 36°C. Tanto el aire como el PVC aumentan su temperatura por radiación, en este momento el PVC y el concreto aumentan su temperatura por conductividad. Nuevamente al llegar la noche se inicia el ciclo.

Es importante recalcar que durante los cambios climáticos, el aire, el PVC y el concreto tienen diferentes temperaturas. Es decir, simultáneamente el aire puede elevar su temperatura a 40°C, el PVC a 50°C y el concreto a 45°C. La principal causa de este fenómeno se debe a la diferencia en los valores de los coeficientes de *conducción*, *convección* y *radiación* de cada material.

Los coeficientes de conductividad térmica son diferentes en cada material.

El coeficiente convectivo de transferencia de calor por convección depende de una variedad de factores, tales como velocidad del aire, densidad, viscosidad, conductividad térmica, calor específico del aire, geometría de la superficie, etc.



En la radiación cada uno de los materiales absorben y emiten de forma diferente la energía radiante.

Además, se debe tener en cuenta que en un material también existe un gradiente debido a que la cara interior y exterior se encuentran expuestas a diferentes condiciones. El incremento del gradiente de temperatura será

$$\Delta G = \frac{\Delta T_E - \Delta T_I}{h} \dots\dots\dots (3.1)$$

donde

ΔT_E : incremento de la temperatura de la cara exterior

ΔT_I : incremento de la temperatura de la cara interior

h : peralte del elemento

Para el manejo de los gradientes térmicos, los reglamentos de distintos países admiten simplificaciones al proceso anterior. Algunos llegan a especificar directamente los incrementos y decrementos de las temperaturas que deben de considerarse para diseño estructural, (Tabla 3.1, Ghiocel, 1975).

Tabla 3.1. Diferencias de temperatura para diseño estructural según reglamentos de diferentes países, en °C.

País	Incrementos de temperatura para diseño estructural ΔT (°C)	Observaciones
Canadá	± 40	
Francia	± 20	
Holanda	$\pm 10, -20$	Reducción de 5°C para estructuras protegidas del efecto directo de los rayos solares y la temperatura exterior
Israel	± 20 -15	Estructuras comunes Estructuras protegidas del efecto directo de los rayos solares y la temperatura exterior
Rumania	+ 40, -30 + 30, -20	Estructuras de acero Estructuras de concreto y mampostería
Suecia	± 15	Reducción de 5°C para estructuras protegidas del efecto directo de los rayos solares y la temperatura exterior
E.U.A.	+ 17, -22 + 20, -25	Clima templado Clima extremoso
R.F. Alemana	+ 25, -10	Reducción de 5°C para estructuras protegidas del efecto directo de los rayos solares y la temperatura exterior



En el caso de México, los reglamentos de construcción no especifican directamente los incrementos y decrementos de la temperatura que debe de considerarse para el diseño, comúnmente se aplica un método más refinado que se encuentra en el manual de la CFE (CFE, 1981), en el que para elementos estructurales expuestos a la intemperie en todas sus caras, pero de manera que ninguna de ellas reciba directamente los rayos del sol, la diferencia de temperaturas para diseño estructural se tomará como:

$$\Delta T = \pm 1.2 (T_M - T_m), \text{ si } t \leq 10 \text{ cm} \dots\dots\dots (3.2)$$

$$\Delta T = \pm 0.36 (T_M - T_m), \text{ si } t \geq 50 \text{ cm} \dots\dots\dots (3.3)$$

además, en este caso,

$$\Delta G = 0$$

donde

t : espesor del elemento

T_M : temperatura máxima en el mes más caluroso

T_m : temperatura mínima en el mes más frío

ΔG : incremento del gradiente de temperatura

Si al menos una de las caras de la estructura se encuentra expuesta directamente a los rayos del sol, los valores de ΔT se multiplican por 1.25; en este caso,

$$\Delta G = \pm (T_M - T_m)/h, \text{ si } t \leq 10 \text{ cm} \dots\dots\dots (3.4)$$

$$\Delta G = \pm (T_M - T_m)/h, \text{ si } t \geq 50 \text{ cm} \dots\dots\dots (3.5)$$

Cabe señalar que este método no detalla si es para un material en específico.

Por otro lado, se puede considerar que la magnitud de las deformaciones es proporcional a la variación de la temperatura, el factor de proporcionalidad se denomina coeficiente de dilatación térmica α y está dado por;

$$\alpha = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta T} \dots\dots\dots (3.6)$$

donde

$\Delta \epsilon$: incremento de la deformación unitaria

ΔT : incremento de temperatura

El coeficiente de dilatación térmica α del PVC es igual a $58 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, mientras que, el del concreto varía entre $8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ y $14 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ dependiendo del tipo y de la cantidad de agregado grueso en la mezcla, (Meli, 2002), esta diferencia entre los valores de los coeficientes del PVC y el concreto no favorece al trabajo en conjunto

que en un determinado momento pueden tener los dos materiales, el concreto y el PVC sufren deformaciones diferentes, por lo tanto, existe la tendencia al deslizamiento del PVC con respecto al concreto provocando esfuerzos entre los dos materiales.

Como ejemplo se consideran dos barras con apoyos libres, una de PVC y otra de concreto, (Figura 3.1).

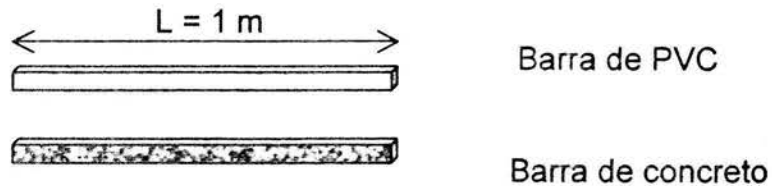


Figura 3.1. Barras de concreto y PVC con las mismas características geométricas.

Debido al incremento de temperatura, las barras sufrirán un alargamiento unitario igual a

$$\Delta \epsilon = \alpha \Delta T \dots \dots \dots (3.7)$$

Considerando un coeficiente de dilatación lineal para el PVC y el concreto de

$$\alpha_{\text{PVC}} = 58 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\alpha_{\text{Concreto}} = 10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Suponiendo que $\Delta T = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ se tiene que, el incremento de deformación para la barra de PVC será :

$$\Delta \epsilon_{\text{PVC}} = 58 \times 10^{-6} \times 20 = 1160 \times 10^{-6} \text{ cm}$$

El incremento de deformación para el concreto será:

$$\Delta \epsilon_{\text{Concreto}} = 10 \times 10^{-6} \times 20 = 200 \times 10^{-6} \text{ cm}$$

El incremento en la longitud de ambos materiales será (Meli, 2002):

$$\Delta L = \Delta \epsilon L \dots \dots \dots (3.8)$$

Entonces, para la barra de PVC, el incremento en la longitud será:

$$\Delta L_{\text{PVC}} = 100 \times 1160 \times 10^{-6} = 0.116 \text{ cm}$$

El incremento en la longitud para la barra de concreto será:

$$\Delta L_{\text{Concreto}} = 100 \times 200 \times 10^{-6} = 0.020 \text{ cm}$$



Se puede apreciar que el incremento de longitud en la barra de PVC es diferente a la del concreto. Si las dos barras se encuentran adheridas se producirán esfuerzos en la interfaz que deberán ser considerados en el diseño.

Para una barra de acero con las mismas características geométricas que las barras anteriormente descritas y con un coeficiente de expansión térmica de $11.7 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, se obtiene un desplazamiento de 0.0234 cm. Este es un valor muy parecido al de la barra de concreto. Es por esta razón que el concreto reforzado trabaja adecuadamente en las estructuras bajo cambios de temperatura.

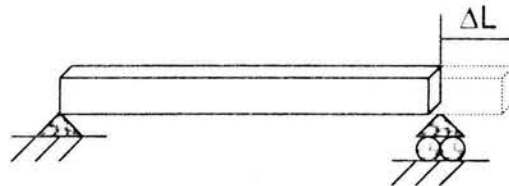
Los efectos de la temperatura se pueden visualizar de otra manera. Si los extremos de la viga se restringen, tanto en desplazamientos como en giros, los incrementos de longitud no pueden ocurrir. Sin embargo, producen el mismo efecto que las fuerzas que habría que aplicar para deformar la barra de tal manera que las deformaciones por cambios volumétricos se anulen (Figura 2.2). Estas fuerzas corresponden a una carga axial, P, que produce una deformación unitaria $\Delta\varepsilon$, dada por:

$$\frac{P}{AE} = \Delta\varepsilon \dots\dots\dots (3.9)$$

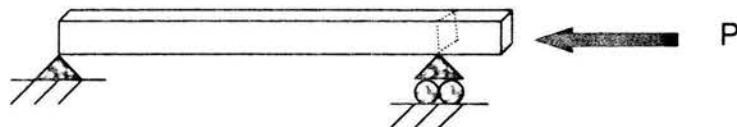
donde

A : Área transversal del elemento

E : Módulo de elasticidad



a) Deformación ΔL cuando no hay restricción



b) Fuerza necesaria para anular la deformación

Figura 3.2. Efecto de un incremento uniforme de temperatura en una barra.

Para el caso en que existe un gradiente de temperatura en la barra, es decir las caras de la estructura están expuestas a temperaturas distintas (Figura 3.3 a), el elemento sufre un incremento de curvatura dado por:

$$\Delta\Psi = \alpha\Delta G \dots\dots\dots (3.10)$$

donde

ΔG : incremento de gradiente de temperatura

para regresar la barra a su posición original se requiere un momento flexionante, M (Figura 3.3 b), el cual se determina como (Meli, 2002):

$$M = EI\Delta\Psi \dots\dots\dots (3.11)$$

donde

E : módulo de elasticidad del material

I : momento de inercia de la sección

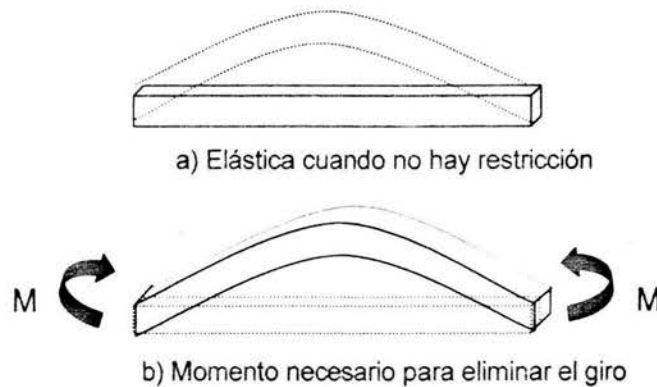


Figura 3.3. Efecto de un gradiente uniforme de temperatura en una barra recta.

Sustituyendo la ecuación (3.7) y (3.10) en las ecuaciones (3.9) y (3.11) respectivamente, se obtiene:

$$P = AE\alpha\Delta T \dots\dots\dots (3.12)$$

$$M = EI\alpha\Delta G \dots\dots\dots (3.13)$$

donde

P : carga axial que se requiere para volver la barra a su posición original después de haber sufrido un desplazamiento longitudinal por un incremento de temperatura

En un sistema constituido por materiales diferentes que trabajan en conjunto, habrá diferencias en el coeficiente de dilatación térmico de cada material, lo que provocará que al aumentar o disminuir la temperatura, se tengan diferencias en los desplazamientos longitudinales y curvatura.



En el sistema RBS, además de los esfuerzos que provocan los cambios de temperatura en los polímeros, la mecánica de los materiales es afectada por otras fuentes. Por ejemplo, al aumentar la temperatura, el módulo de elasticidad del PVC se ve disminuido y al reducirse la temperatura este se puede llegar a comportar de forma frágil. Como se puede observar, es necesario considerar la variación del valor del módulo de elasticidad de los materiales, principalmente del PVC, así como los esfuerzos que se pueden llegar a producir debido a los efectos de la temperatura.

3.1.1 Tensiones térmicas

Considérese una barra de material homogéneo e isótropo con restricciones para su desplazamiento longitudinal. El valor del esfuerzo provocado por un cambio de temperatura se puede obtener como:

$$\sigma = \frac{P}{A} = E\alpha\Delta T \dots\dots\dots (3.14)$$

Por otro lado, la distribución de la temperatura en un material depende de sus dimensiones, forma de la conductividad térmica y de la velocidad del cambio de temperatura, entre otras cosas.

En el calentamiento o enfriamiento del material, la temperatura externa cambia más rápidamente que la interna, se producen tensiones térmicas, los cambios diferenciales de sus dimensiones restringen la dilatación o contracción libre del elemento.

En el caso de un plástico adherido a otro material, el esfuerzo térmico entre ellos está dado por (Mongonon, 2001):

$$\sigma_p = E_p (\alpha_p - \alpha_2) (\Delta T) \dots\dots\dots (3.15)$$

donde

σ_p : esfuerzo en el plástico

E_p : módulo de elasticidad del plástico

α_p : coeficiente de expansión térmica del plástico

α_2 : coeficiente de expansión térmica del otro material

Los diferentes valores de los coeficientes de dilatación térmica de un sistema compuesto por dos materiales originan esfuerzos térmicos capaces de provocar agrietamientos en los componentes frágiles y la pérdida de adhesión en la superficie de contacto.

En el caso del sistema RBS, además de que el plástico se encuentra más expuesto a los cambios de temperatura del medio ambiente, el coeficiente de expansión térmica del concreto es alrededor de seis veces menor que el del PVC,



esto origina esfuerzos térmicos que provocan un mal comportamiento de los materiales como un sistema que trabaja en conjunto.

3.2 ADHERENCIA DEL PVC AL CONCRETO

El comportamiento del acero de refuerzo y el concreto, ha sido estudiado con gran detalle. En el presente capítulo se analiza el mecanismo de adherencia que existe entre el concreto y las varillas de acero para poder hacer una comparación con el sistema RBS en estudio.

La adherencia entre el concreto y las varillas de acero es consecuencia de la contribución de tres mecanismos: adhesión química, fricción, e interacción mecánica del concreto con las corrugaciones de las varillas.

Los dos primeros mecanismos dependen básicamente de las propiedades superficiales de la varilla. El tercero depende, además de las corrugaciones (para las cuales existen requisitos mínimos), del grado de confinamiento que se le proporcione al concreto mediante el acero de refuerzo transversal.

En la Figura 3.4, (CFE, 1994), se muestra la evolución del deslizamiento de una varilla de acero ahogada en concreto con respecto al esfuerzo de adherencia. Al empezar a trabajar la varilla a tensión, el concreto y el acero sufren las mismas deformaciones. La adherencia es suministrada por los dos primeros mecanismos hasta alcanzar un cierto grado de esfuerzo τ_0 (entre 5 y 15 kg/cm², aproximadamente). Posteriormente, estos mecanismos dejan de operar y entran en funcionamiento las corrugaciones llegando a un nivel de esfuerzo τ_1 . Debido al esfuerzo de tensión del concreto, se provoca la formación de grietas internas, el esfuerzo τ_1 tiene un valor aproximado de entre 50 y 80 por ciento de la resistencia a tensión del concreto.

Si el esfuerzo continúa aumentando, las grietas se propagan transversalmente formando pequeños bloques de concreto. Cuando el confinamiento no es el correcto se llega a un esfuerzo τ_2 que determina la falla de adherencia por colapso. En el caso contrario, si el confinamiento es el adecuado, los pequeños bloques continúan trabajando hasta alcanzar un esfuerzo τ_3 , (del orden de un tercio de la resistencia a compresión del concreto), (CFE, 1994).

También existen factores constructivos que influyen en la adherencia entre el acero y el concreto como son: la dirección del refuerzo con respecto a la colocación del concreto, la profundidad relativa de las varillas en el concreto, el revenimiento y compactación de la mezcla, la resistencia mecánica del concreto y las condiciones superficiales de las varillas.

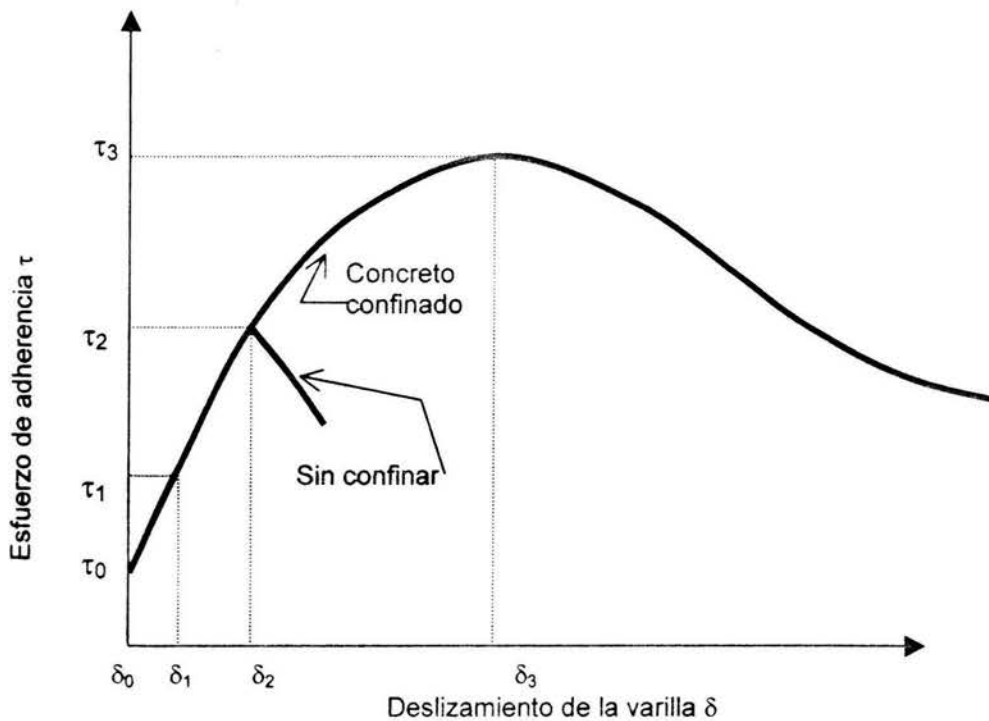


Figura 3.4. Evolución del deslizamiento de una varilla corrugada, ahogada en concreto, durante el proceso de extracción por tensión.

La Figura 3.5 ilustra el efecto del refuerzo horizontal, que propicia la formación de huecos o de concreto débil en su parte inferior como consecuencia de la acumulación de agua de sangrado y aire atrapado. Este fenómeno puede llegar a acentuarse en los asentamientos diferenciales del concreto con respecto al acero de refuerzo. Cabe mencionar que esta consecuencia se acentúa conforme las varillas colocadas horizontalmente poseen mayor diámetro.

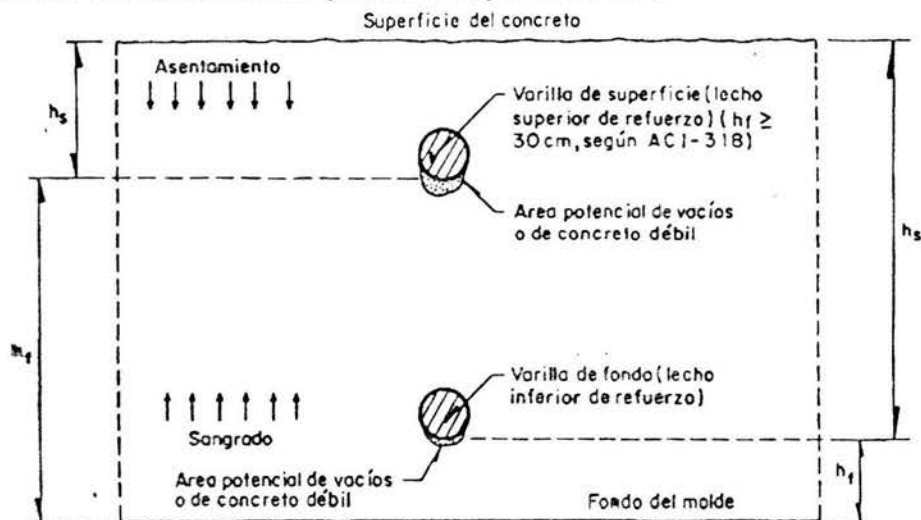


Figura 3.5. Formación de vacíos o de concreto débil bajo las varillas coladas en posición horizontal a diferente profundidad.

Para el sistema RBS existen mecanismos de adhesión química y fricción que debido a esfuerzos térmicos pueden llegar a ser excedidos.

Debido a la geometría del PVC, la interacción mecánica con el concreto se presenta de diferente forma. Al encamisar el concreto con el polímero existe un confinamiento que provoca una cierta resistencia a la tensión aun cuando el concreto se haya fracturado. Para poder comprender este mecanismo, considérese un costal vacío y arena suelta. En un principio, el costal no puede sostenerse verticalmente por sí solo y las partículas de arena se encuentran extendidas. Si se llena el costal con la arena, se podrá tener una cierta resistencia que permitirá formar una columna que puede llegar a soportar un peso encima. La magnitud de este dependerá del grado de resistencia a tensión de la tela del costal, (Figura 3.6).

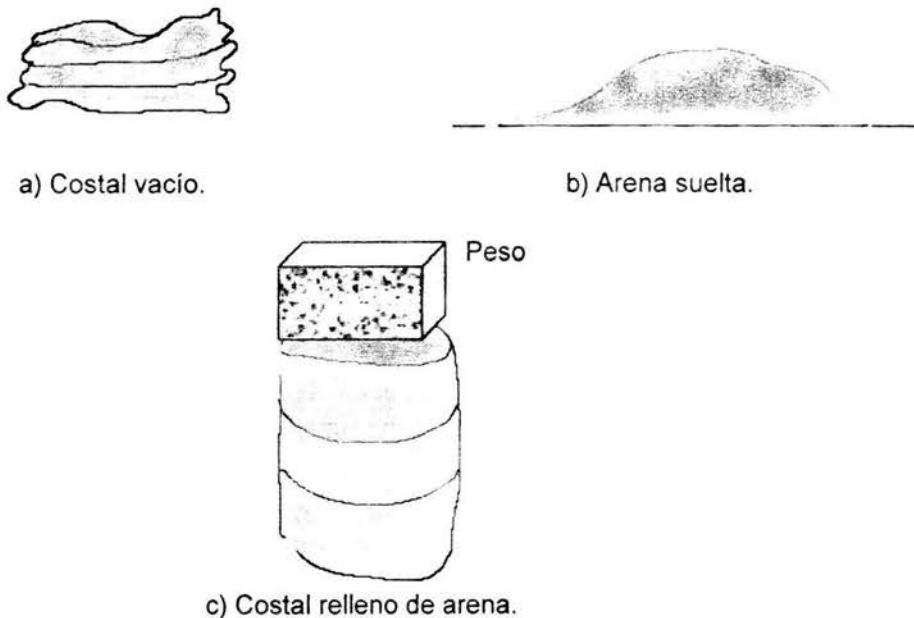


Figura 3.6. Mecanismo de adherencia dependiente de la interacción mecánica de las partículas.

El mecanismo de adhesión del sistema RBS es parecido al que se provoca con el confinamiento que da el acero transversal al concreto en los sistemas constructivos tradicionales, sin embargo, en este caso no existen corrugaciones dentro del elemento de PVC que contribuyen a que no se provoque el deslizamiento.

Sin embargo, las piezas de PVC cuentan con paredes transversales ranuradas que intervienen en el mecanismo de adhesión, (Figura 1.1). Estas ranuras tienen un funcionamiento similar al de las corrugaciones en una varilla de acero de refuerzo.



Por otro lado, como consecuencia de la acumulación de agua de sangrado, aire atrapado y asentamientos diferenciales del concreto, las ranuras pueden propiciar la formación de espacios vacíos o concreto débil, similar al mecanismo de la Figura 3.5, que contribuyen a una mala capacidad de adherencia. Cabe mencionar que este fenómeno se reduce a medida que la profundidad de las ranuras en el concreto es mayor (Figura 3.5).

Para evitar la formación de espacios vacíos o concreto débil se debe tener precaución en el diseño de la mezcla y que el grado de compactación del concreto colocado sea el adecuado.

3.3 CAMBIOS VOLUMÉTRICOS EN EL CONCRETO

Al igual que otros materiales, el concreto experimenta cambios de volumen por causas físicas y químicas. Los de origen químico generalmente se producen por reacciones que se generan interna y/o externamente. Los efectos se manifiestan normalmente en forma de expansiones locales que tienden a agrietar el concreto. Por este motivo, no se considera como parte del comportamiento natural del concreto.

Los cambios volumétricos de origen físico se pueden clasificar en dos grupos; tipo mecánico, específicamente cargas y sollicitaciones, y el de tipo agentes fenomenológicos, destacando la humedad y la temperatura. Las consecuencias de las cargas y sollicitaciones se identifican como deformaciones, éstas son controladas mediante el diseño de la estructura.

Las variaciones volumétricas pueden ser expansiones o contracciones. El concreto de la estructura en el sistema RBS se encuentra restringido para expandirse o contraerse libremente. En este caso, una expansión representa un esfuerzo a compresión y una contracción produce esfuerzos a tensión. Como el concreto tiene una capacidad reducida para resistir esfuerzos a tensión, las contracciones son los cambios volumétricos más importantes porque generan agrietamientos.

En el curso de la vida útil del concreto se presentan cambios volumétricos de acuerdo a las condiciones de exposición a que se halle sometido.

Para el comportamiento del concreto antes y durante el fraguado se puede decir que en el momento en que se realiza la mezcla del cemento y el agua, se inicia la hidratación del cemento produciéndose un desprendimiento de calor. Como consecuencia, en los minutos iniciales puede ocurrir una ligera expansión en la pasta recién mezclada, después puede ocurrir una importante contracción.



En la Figura 3.7 se muestran tres etapas del cambio volumétrico en el lapso anterior y durante el fraguado, las etapas a partir del momento en que se mezcla el cemento y el agua son las siguientes:

- Etapa (1) Durante los primeros minutos el volumen de la mezcla se mantiene prácticamente estable debido a que normalmente ocurre un afloramiento del agua interna que excede a la que se pierde por factores externos. Algunas veces se manifiesta una ligera expansión.
- Etapa (2) A continuación, entre una y cinco horas, a temperatura normal se tiene una pérdida de agua que excede a la escurrida por la pasta, produciendo una notable contracción sensiblemente proporcional al tiempo que transcurre, y que corresponde a la denominada contracción plástica.
- Etapa (3) En el inicio del fraguado, la pasta desarrolla una rigidez que gradualmente se opone a la contracción.

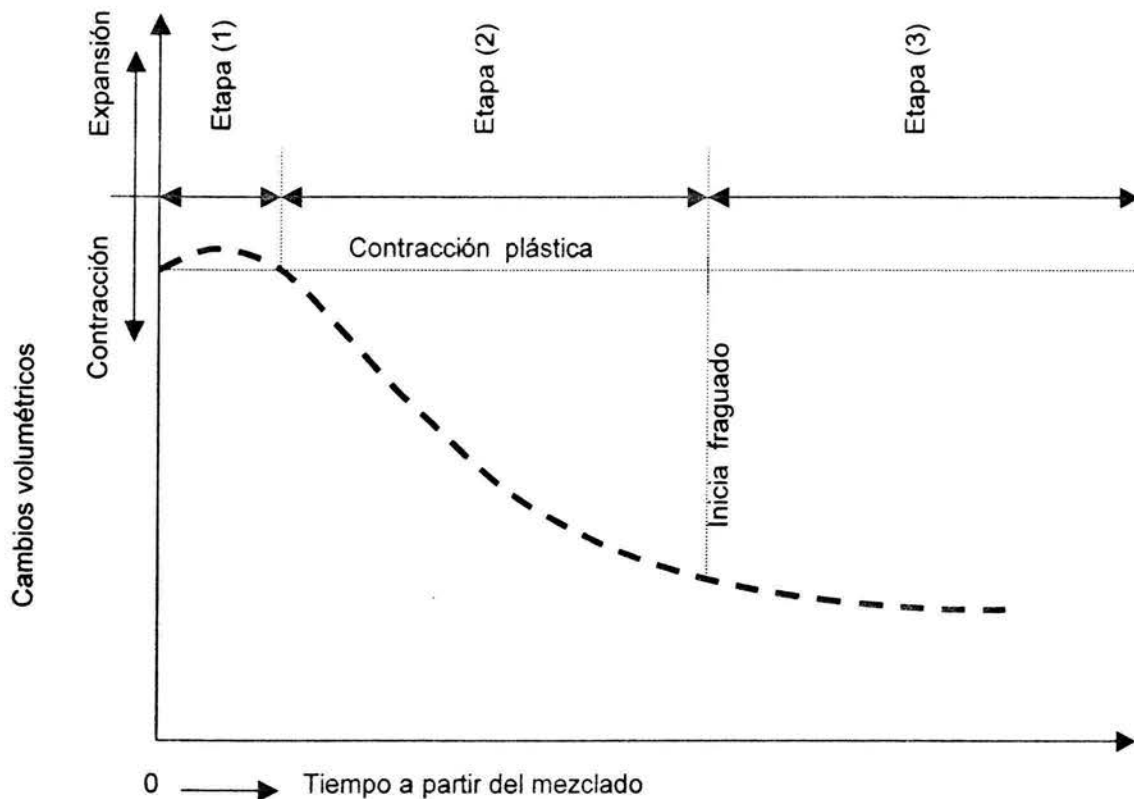


Figura 3.7. Cambios volumétricos de la pasta de cemento en el lapso anterior al fraguado.



Durante el fraguado, se pueden producir asentamientos, sangrado y pérdida inicial de agua, lo que provocará contracciones.

Después del fraguado (concreto en curso de endurecimiento y ya endurecido), continua la pérdida de agua, se genera calor interno por la hidratación del cemento y se presentan variaciones externas de temperatura (medio ambiente y otras causas).

En el sistema de muros de concreto encamisados con PVC, el concreto se encuentra restringido para experimentar cambios de volumen, esto hace que se provoquen esfuerzos y agrietamientos, también este es un factor más para la pérdida de adhesión entre el plástico y el concreto.

Sin embargo, el hecho de que el concreto se encuentre encamisado con el PVC provoca que no exista gran pérdida de agua, por consecuencia las contracciones volumétricas del concreto se reducen. Este puede ser un factor benéfico en el sistema RBS.



4. ANÁLISIS NUMÉRICO

4.1 MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO

Anteriormente, la solución de problemas de ingeniería requería de una serie de simulaciones bajo prototipos que cada vez se refinaban más hasta alcanzar los resultados esperados, esta situación requería tiempo y dinero.

El método de los elementos finitos, (MEF), permite realizar un modelo matemático que describe el comportamiento real del sistema, más económico y más fácil de modificar que un prototipo. Sin embargo, debido a las hipótesis básicas del método, no deja de ser una técnica aproximada de cálculo. Los prototipos, por lo tanto, siguen siendo necesarios, pero en menor número.

La base del MEF consiste en dividir un medio continuo en pequeños elementos conectados por una serie de puntos llamados nodos, es decir pasar de un medio continuo (con infinitos grados de libertad) a un medio finito (con un finito número de grados de libertad). Con esto se consigue pasar de un sistema que es regido por una ecuación diferencial, o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un medio cuyo comportamiento se modela con un sistema de ecuaciones, lineales o no.

Para emplear el MEF, se hacen las consideraciones siguientes; un medio continuo, los materiales tienen un comportamiento elástico lineal y se emplea el principio de que la energía interna de deformación es igual al trabajo externo entregado al sistema, es decir se desprecian las pérdidas de energía.

Para cualquier sistema se puede distinguir:

Dominio: espacio geométrico donde se va a analizar el sistema.

Condiciones de frontera: variables conocidas que condicionan el comportamiento del sistema (fuerzas actuantes, temperatura, etc.).

Incógnitas: variables que se desea conocer después que las condiciones de frontera han actuado sobre el sistema.

Los grados de libertad de un nodo son las variables que determinan el estado y/o posición del nodo (desplazamientos y giros en X, Y, Z respectivamente, temperatura)

Elementos : el dominio discretizado en subdominios se denominan elementos. El dominio se divide mediante puntos (en el caso lineal), mediante líneas (en el caso bidimensional) o superficies (en el tridimensional) imaginarias, de forma que el dominio total en estudio se aproxime mediante el conjunto de porciones (elementos) en que se subdivide.



4.2 HERRAMIENTAS DE CÓMPUTO

Para la aplicación del MEF se utilizará el SAP 2000, (SAP 2000, 2000). Este es un programa para análisis y diseño estructural que trabaja mediante el MEF. Fue desarrollado bajo la hipótesis de que la estructura, (dominio) está formada por elementos barra de eje recto, elementos placa y/o sólidos. Además, SAP 200 cuenta con una interfaz gráfica que permite dibujar la geometría del modelo y también las propiedades de los materiales, condiciones de apoyo, estados de carga, análisis o resultados de diseño, etc.

El programa de cómputo tiene la ventaja de poder elaborar la geometría de diferentes formas;

- Se puede utilizar directamente la interfaz gráfica; en ella se generan todos los elementos y propiedades de los mismos, a excepción de los elementos sólidos.
- El método textual, consiste en generar un archivo de importación de extensión .s2k que contenga toda la información sobre los elementos y el material de los mismos. Con este método se puede generar cualquier tipo de elemento.
- Interacción Autocad-SAP. El programa SAP al interactuar con el programa Auto Cad reconoce los nudos, vigas, columnas, placas y sólidos. Las propiedades de los sólidos se deben especificar con el método contextual; para los demás elementos se pueden especificar en la interfaz grafica.
- Interacción Excel-SAP. A partir de la plantilla de Excel sólo puede generarse la geometría estructural y no las características físicas de los elementos. Los elementos que pueden generarse son nudos, vigas y placas.

4.3 OBJETIVO DEL ANÁLISIS

Considerando las ventajas que se tienen al modelar problemas físicos con el MEF, se representarán en un programa de cómputo ensayos de muros encamisados con PVC, de esta forma se hace evidente la versatilidad y gran aproximación que tiene el método. Los modelos se elaboran de acuerdo con las características de prototipos, de los cuales se tienen los resultados de ensayos realizados por el IMCYC y la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Los ensayos del IMCYC consisten en paneles RBS vacíos a los que se les aplicó una carga excéntrica.

Para los ensayos de la UNAM, se utilizaron paneles RBS rellenos de concreto y ensayados a tensión diagonal.

Otro modelo consistió de un panel RBS colocado como una viga de 2.0 m de claro y se le aplicó carga en sus extremos del tercio medio de su claro. Este ensayo fue elaborado por la firma TROW Consulting Engineering, (TROW, 1994), (Figura 4.1).

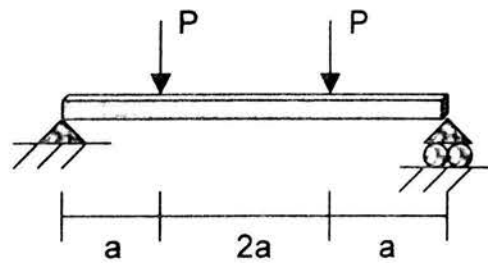


Figura 4.1. Viga.

Mediante el análisis se determinarán desplazamientos y esfuerzos. Con la finalidad de calibrar el modelo, los resultados serán comparados con los ensayos obtenidos en los prototipos.

4.4 PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

Espacio geométrico o dominio

Tomando en cuenta que el MEF consiste básicamente en la discretización de los elementos para realizar una aproximación al dominio del problema. La geometría de los elementos se representará mediante una malla lo más fina posible. Las figuras 4.2 a), 4.2 b) y 4.2 c) muestran la vista en planta, elevación e isométrico, respectivamente, de la malla utilizada en los muros.

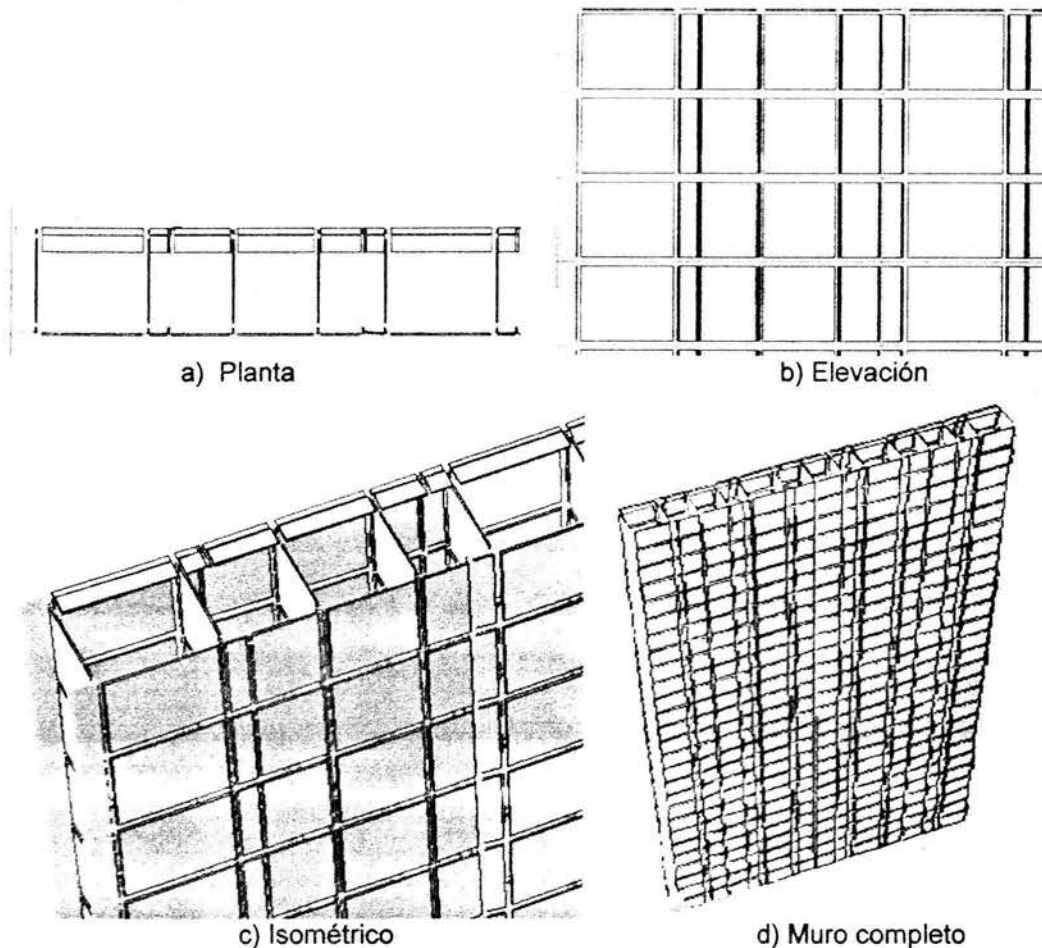


Figura 4.2. Malla del elemento finito utilizada en los muros.

Para el muro mostrado en la Figura 4.2, la geometría se elaboró a partir de una planilla de Excel. Las propiedades físicas de los materiales se definieron directamente con la ayuda de la interfaz gráfica del SAP 2000.

Para los ensayos del IMCYC se elaboraron dos modelos con las dimensiones de los especímenes ensayados, (Figura 4.3). Los especímenes se distinguirán como 122/5, el 122 se refiere a los paneles con 64 mm de espesor y el 5 al número de espécimen. El espécimen 123/1 denota los especímenes de 100 mm de espesor, cabe mencionar que tres de los paneles se armaron con las costuras verticales, y dos con las costuras horizontales, (IMCYC, 2001).

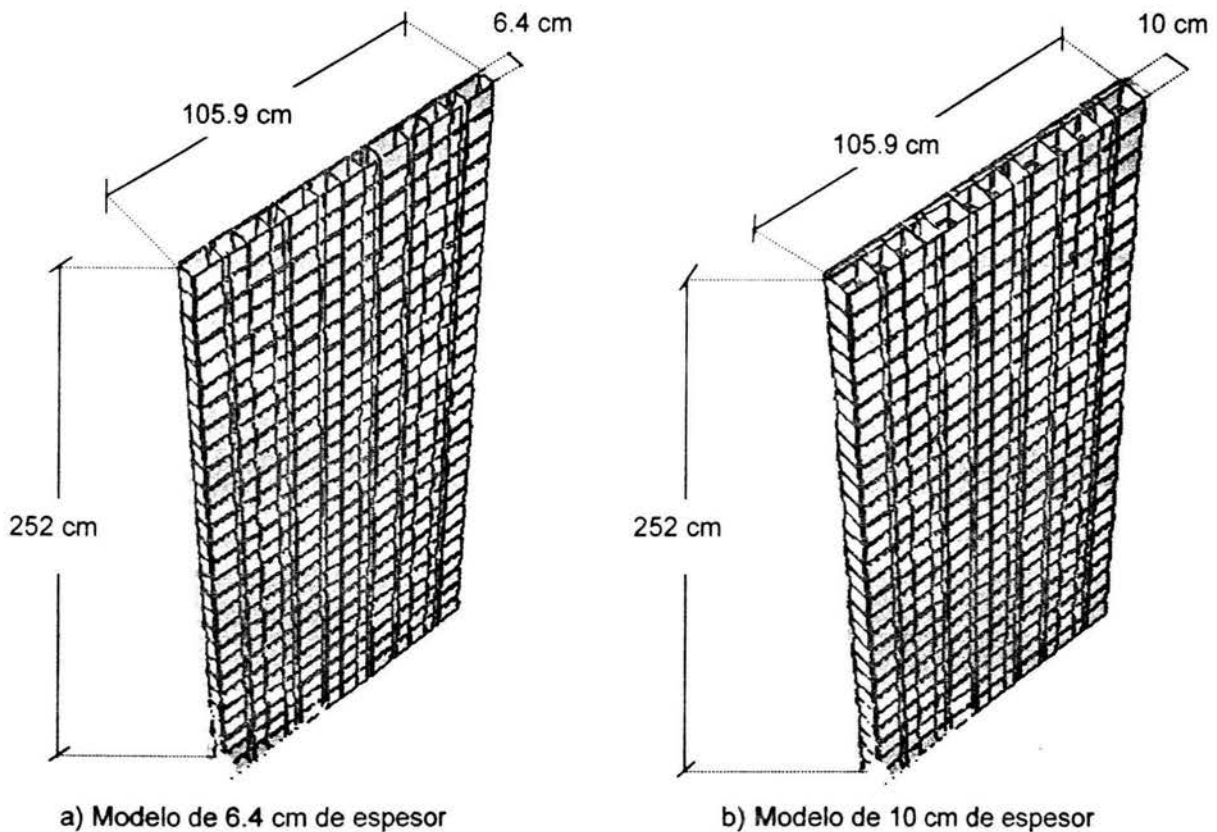


Figura 4.3. Modelos con las dimensiones de los especímenes ensayados por el IMCYC.

Para los ensayos de la UNAM, considerando que los especímenes ensayados tienen aproximadamente la misma geometría, se elaboró un sólo modelo. Debido a la precisión del SAP 2000, la geometría del modelo no es exactamente la misma a la del espécimen, pero la diferencia es mínima. (Figura 4.4).

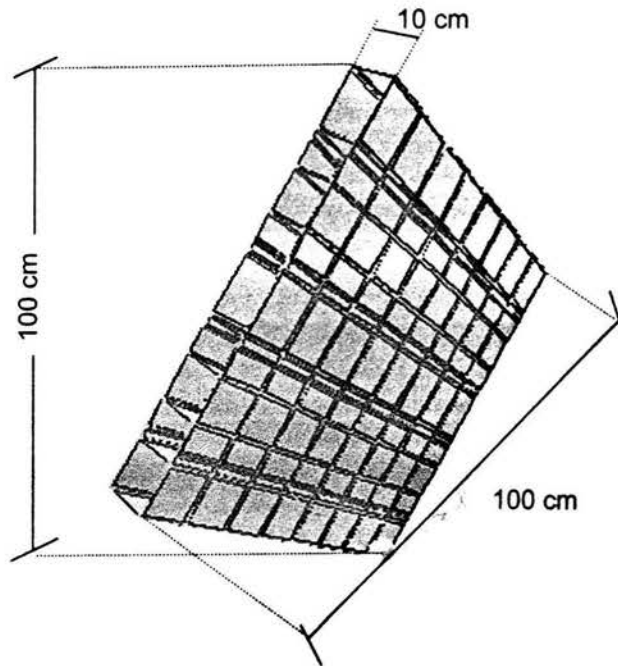
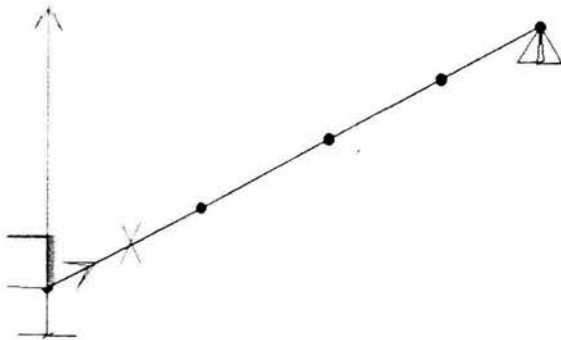
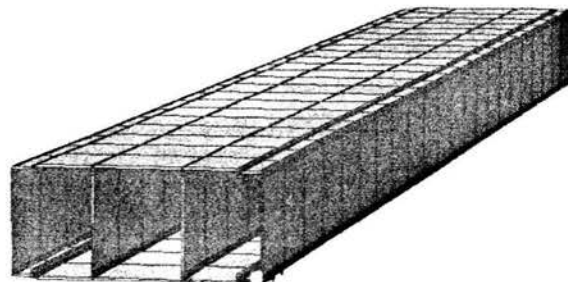


Figura 4.4. Configuración geométrica del modelo para los ensayos de la UNAM.

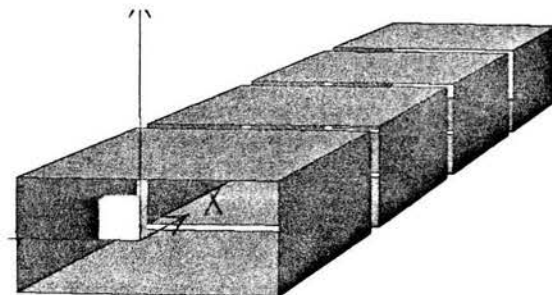
Para el ensayo de la viga, elaborado por la firma TROW Consulting Engineering, el modelo analítico se elaboró con elementos barra, (Figura 4.5 a)), elementos sólidos, (Figura 4.5 b)) y con elementos sólidos cubiertos de elementos placa, (Figura 4.5 c)).



a) Modelo con elementos barra



b) Modelo con elementos sólidos



c) Modelo con elementos sólido y elementos placa

Figura 4.5. Modelos de elementos finitos para una barra de 2 m de claro.



Los valores medios de las propiedades nominales de los materiales de que está compuesto el sistema ensayado RBS PVC y concreto, se presentan en la Tabla 4.1:

Tabla 4.1. Propiedades del PVC y el concreto.

PROPIEDAD	CONCRETO	PVC	UNIDAD
Masa por unidad de volumen	244.648	142.71	kg/m ³
Peso por unidad de volumen	2 400	1 400	kg/m ³
Módulo de elasticidad	97 979 ¹	36700 ²	kg/cm ²
Relación de Poisson	0.2	0.2	
Coefficiente de dilatación térmica	10	58	°C ⁻¹ X 10 ⁻⁶

1. $f'_c = 150 \text{ kg/cm}^2$, $E = 8000 \sqrt{150} \text{ kg/cm}^2$.

2. El valor considerado es para una temperatura ambiente, de 25 °C, con un tiempo de duración de carga de 10 minutos.

Condiciones de frontera

También, con la ayuda de la interfaz gráfica del SAP 2000, se aplican las solicitaciones de carga, además, si se requiere se pueden aplicar gradientes de temperatura.

Debido a que en los ensayos elaborados por el IMCYC (IMCYC, 2001), la UNAM (UNAM, 1998), y la firma TROW no se consideró el efecto de la temperatura y únicamente se designaron cargas, éstas serán las únicas acciones que se aplicarán a los modelos. Sin embargo, se debe mencionar que la temperatura también es una condición que influye en el comportamiento del sistema.

Para los ensayos del IMCYC, en cada modelo se aplicó la carga empleada en los ensayos y con la excentricidad indicada en ellos.

Para los ensayos de la UNAM, se varió la carga aplicada de acuerdo con lo especificado para cada espécimen.

En el caso del ensayo de la firma TROW, de acuerdo a los registros de los ensayos, se aplicó un momento de 28552.05 kg-cm.

Grados de libertad

En lo que respecta a los grados de libertad para los apoyos de los modelos, se puede decir que es un aspecto que también influye en el comportamiento de los modelos.

Con la finalidad de reproducir lo más aproximadamente posible los ensayos de los especímenes del IMCYC la UNAM y la firma TROW, se consideró que los modelos



deben de estar simplemente apoyados, además debe de considerarse que el SAP 2000 efectúa los análisis de forma tridimensional, (Figura 4.6).

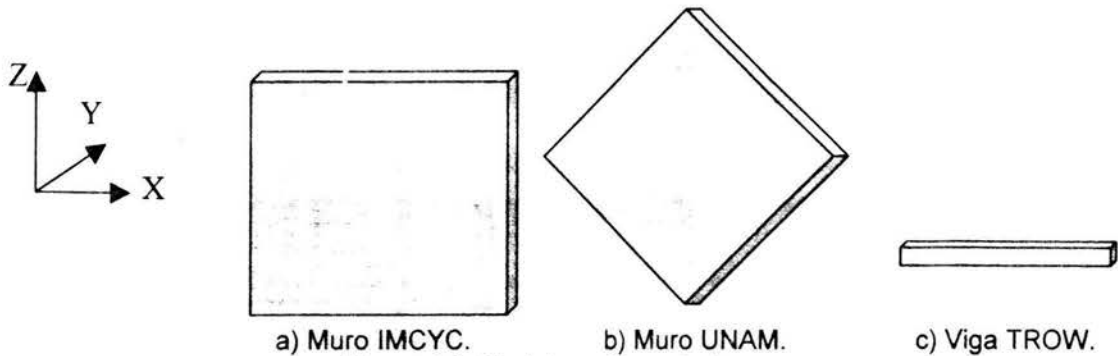


Figura 4.6. Modelos referenciados.

Por este motivo los grados de libertad para los nodos de apoyo se establecieron de la siguiente forma;

Para los modelos del IMCYC y la UNAM, en los apoyos superiores se restringió, el movimiento en la dirección X y Y, y los giros respecto al eje Y y Z. Para los apoyos inferiores se restringió el movimiento en la dirección X, Y y Z, y los giros respecto al eje Z.

En el caso del modelo de la firma TROW, en un extremo de la viga se restringieron los desplazamientos en la dirección X, Y y Z, mientras que en el extremo opuesto se restringieron los desplazamientos en Y y Z, y los giros con respecto al eje X y Z.



5. CALIBRACIÓN DEL MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Para calibrar el modelo del MEF es necesario recordar cómo influye la temperatura en los materiales que integran el sistema.

Para el concreto y el acero, las variaciones relevantes al aumentar la temperatura únicamente son los cambios volumétricos, ya sea, expansiones o contracciones. En estos materiales, a temperatura ambiente, el calor se transmite muy lentamente, de manera que pueden ser necesarias semanas o meses para que la temperatura ambiente se transmita uniformemente al interior del elemento. Con esto se dice que las propiedades interiores del material no se ven afectadas por las temperaturas extremas del medio ambiente.

Respecto al PVC, las variaciones en la temperatura ambiente causan cambios volumétricos, alteran el comportamiento interno del material, y además, el fenómeno de relajación de esfuerzos es más evidente. Para tomar en cuenta dichos efectos, se considera que el módulo de elasticidad tiene variaciones de acuerdo a la temperatura y duración de la carga.

El programa de cómputo SAP 2000 puede representar los cambios volumétricos debido a gradientes de temperatura, para el concreto, acero y PVC. Sin embargo, los cambios intermoleculares no son representados por el SAP 2000, ya que los materiales para los cuales fue diseñado (comúnmente concreto y acero), no cambian su comportamiento molecular a temperatura ambiente, es decir para que el acero tenga cambios relevantes en su módulo de elasticidad, es necesario aplicarle temperaturas elevadas del orden de cientos de grados centígrados.

Los cambios intermoleculares que experimenta el PVC debido a incrementos de temperatura y duración de la carga, son reflejados en el valor del módulo de elasticidad. El programa de cómputo SAP 2000 no toma en cuenta en su análisis, la duración de la carga. Por este motivo es necesario saber cómo considera el programa de cómputo los incrementos de temperatura.

El módulo de elasticidad es una propiedad directamente relacionada con el esfuerzo y la deformación, de la ecuación (2.1) se tiene:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \dots \dots \dots (5.1)$$

siempre que se tenga un comportamiento lineal. Ésta es la propiedad que determinará el comportamiento mecánico de los modelos.

La forma en que el SAP 2000 involucra la temperatura en el cálculo de las deformaciones se ilustra en la ecuación (5.2), (Deméneghi, 2000) (Manual SAP 2000, 2000). Como se puede observar, en esta ecuación, el incremento de

temperatura no altera el módulo de elasticidad, pero sí provoca un desplazamiento, este es debido al cambio volumétrico del material.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E} & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & \frac{1}{E} & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \alpha \\ \alpha \\ \alpha \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \Delta T \dots (5.2)$$

donde

ε_{ij} = deformación unitaria normal

ε_{ij} = deformación unitaria cortante

E = módulo de elasticidad

ν = relación de Poisson

σ_{ii} = esfuerzo normal

σ_{ij} = esfuerzo cortante

α = coeficiente de expansión térmica

ΔT = gradiente de temperatura

Para ilustrar de qué forma considera el SAP 2000 los incrementos y gradientes de temperatura, se modeló una viga de PVC de un metro de claro con una sección transversal de 10 x 10 cm. Se aplicó un módulo de elasticidad correspondiente a una temperatura de 25 °C y una duración de carga de 10 minutos, $E=36700 \text{ kg/cm}^2$. El gradiente térmico considerado es igual a 20 °C/cm.

Se definen tres casos;

Caso I Viga simplemente apoyada (Figura 5.2). Se le asigna un incremento de temperatura de 20 °C.

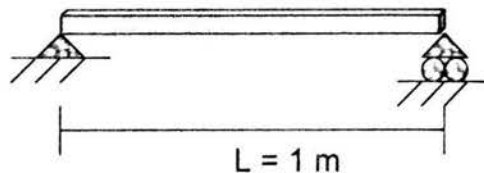
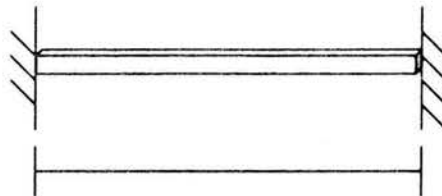


Figura 5.1. Características de la viga para los casos I y II.



Caso II Viga simplemente apoyada con un incremento de temperatura de 20°C , un gradiente de temperatura de $20^{\circ}\text{C}/\text{cm}$.

Caso III Se restringe la viga tanto en desplazamientos lineales como angulares, (Figura 5.2). Se establece un incremento de temperatura de 20°C y un gradiente de temperatura de $20^{\circ}\text{C}/\text{cm}$.



$$L = 1 \text{ m}$$

Figura 5.2. Viga restringida.

Para el caso I, al aplicar el gradiente de temperatura de acuerdo con el SAP 2000, la barra incrementa su longitud 0.116 cm.

Para el caso II, Aquí además de incrementar su longitud, la viga sufre una deformación curva. En este caso, el cálculo de los desplazamientos es más elaborado que en el caso I, Figura 5.3.

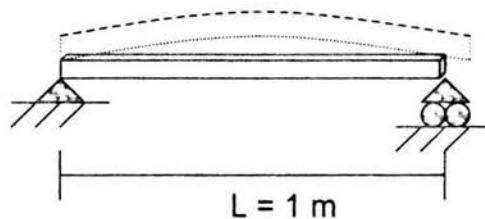


Figura 5.3. Viga deformada.

En el caso III, no se genera deformación. En su lugar se producen momentos y fuerza axial, (Figura 5.4.).

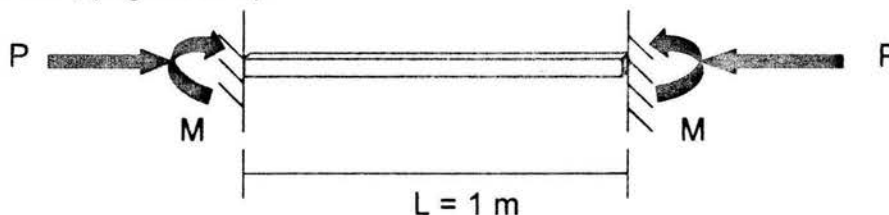


Figura 5.4. Momento y carga axial necesarios para eliminar el giro y el incremento de longitud.



El momento y carga axial calculados con el SAP 2000 son:

$$P = 4257.2 \quad \text{kg}$$
$$M = 35476.67 \quad \text{kg-cm}$$

Por otro lado, los valores obtenidos con las ecuaciones (3.4) y (3.5), son:

$$P = 4260 \quad \text{kg}$$
$$M = 35500 \quad \text{kg-cm}$$

Para este cálculo se consideraron los siguientes valores:

$$A = 100 \text{ cm}^2; \Delta T = 20 \text{ }^\circ\text{C}; \Delta G = 20 \text{ }^\circ\text{C/cm}; \alpha = 5.8 \times 10^{-5} \text{ } 1/^\circ\text{C}; E = 36700 \text{ kg/cm}^2$$

De acuerdo con la Tabla 5.4 el módulo de elasticidad del PVC para una temperatura de 45°C, con una duración de carga de un día, es $E = 21\,845 \text{ kg/cm}^2$. Al considerar este valor, los resultados de las ecuaciones (3.4) y (3.5) son:

$$P = 2534.02 \quad \text{kg}$$
$$M = 21116.83 \quad \text{kg-cm}$$

De esta forma, en el modelo analítico se estarán considerando los cambios volumétricos por temperatura y los intermoleculares de la barra.

Considerando lo anterior, la calibración del modelo consiste básicamente en encontrar el valor del módulo de elasticidad del PVC en función de la temperatura y el tiempo de duración de carga. Además, se confirma que el programa de cómputo solo calcula los desplazamientos debido a cambios volumétricos al aplicar un gradiente de temperatura.

Después de haber elaborado la geometría de los modelos y definir las condiciones de frontera, el valor del módulo de elasticidad del PVC se varió hasta obtener deformaciones aproximadamente igual a las registradas en los ensayos elaborados por el IMCYC, (IMCYC, 2001). Por este motivo el valor del módulo de elasticidad del PVC obtenido para cada espécimen modelado es diferente, mientras que para el concreto, el módulo de elasticidad calculado según las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (NTC, 2001), para concreto clase 2 con $f'_c = 150 \text{ kg/cm}^2$, $E = 8000 \cdot 150 \text{ kg/cm}^2$.



5.1 RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados de los ensayos de paneles vacíos de 64 y 100 mm obtenidos por el IMCYC y el programa de cómputo se presentan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Porcentaje de error entre los valores registrados por el IMCYC y el SAP 2000.
* Especímenes no modelados.

Especímen	Dimensiones (cm)		Excentricidad de la carga aplicada (cm)		Módulo de elasticidad E (kg/cm ²)		Desplazamiento transversal máx. (mm)		Carga aplicada (Kg)	Error relativo (%)
	(espesor en mm)	IMCYC	MEF	IMCYC	MEF	IMCYC	MEF	IMCYC		
122/5(64)	251 x 120.5	252 x 105.9	2.5	2.8	*	*	*	*	999	*
122/6(64)	250 x 105	252 x 107.9	2.5	2.8	36700	25478	21.59	21.59	3440	0.00
122/7(64)	250 x 105	252 x 107.9	2.5	2.8	36700	16159	34.04	34.04	3440	0.00
122/8(64)	250 x 105	252 x 107.9	2.5	2.8	36700	22796	24.13	24.13	3440	0.00
123/1(100)	250 X 102	243 x 103.9	2.5	2.5	36700	47962	9.22	9.22	6045	0.00
123/2(100)	250 X 102	243 x 103.9	2.5	2.5	36700	32044	13.8	13.8	6696	0.00
123/3(100)	250 X 102	243 x 103.9	2.5	2.5	36700	26964	16.4	16.4	6696	0.00
123/4(100)	250 X 102	243 x 103.9	2.5	2.5	*	*	*	*	1818	*

En el Apéndice se muestra, la tabla original del informe del IMCYC, (IMCYC, 2001), fotografías de los prototipos antes y después de ensayarlos, lecturas de deformación lateral y graficas de carga vertical contra deformación lateral.



Los especímenes 122/5 y 123/4 no fueron modelados debido a que no se tiene un valor de comparación en la deformación. Las dimensiones de los modelos ensayados por el IMCYC son diferentes a los del MEIF debido a la forma en que se elaboró la malla.

Para los muros simulados con el programa de cómputo, una característica que hay que destacar es que, a diferencia de los resultados experimentales reportados por el IMCYC, (IMCYC, 2001), los resultados numéricos del programa de cómputo son más uniformes, (Tabla 5.1).

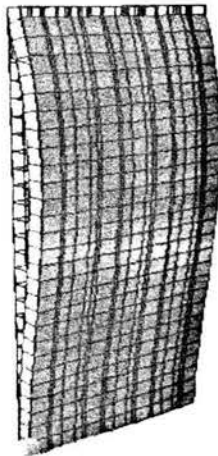
En lo que respecta a los resultados que reporta el IMCYC para los especímenes 123/2 y 123/3, se puede observar, Tabla 5.1, que donde se aplicó la misma carga, 6696 kg, se registraron diferentes deformaciones.

Teóricamente, si los especímenes se encuentran bajo las mismas condiciones, se debería obtener que, con la misma carga, las deformaciones son iguales, pero en los resultados reportados por el IMCYC no es así. Con esto se hace evidente que los ensayos no fueron realizados bajo las mismas condiciones o los especímenes no tenían las mismas propiedades. Hay que recordar que el valor del módulo de elasticidad del PVC que se indica en el informe (RBS 1, 2000) es un valor nominal.

La razón de estos resultados puede ser la manera en que esté restringido el espécimen, la forma de aplicación de la carga, defectos en el proceso de fabricación del PVC, entre otros. Para poder cubrir la influencia de estos factores en el modelo matemático se disminuyó el módulo de elasticidad del modelo. Si se consideran los resultados de la Tabla 5.1 y se toma el valor del módulo de elasticidad que se aplicó en el modelo espécimen 122/7, que es el que presenta el valor más desfavorable, $E=16159 \text{ kg/cm}^2$, se puede decir que el módulo de elasticidad para una temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y una duración de carga de 10 minutos, se deberá de reducir a $E=16159 \text{ kg/cm}^2$, es decir un 55%.

Así, el valor del módulo de elasticidad del PVC que se aplicará a los modelos deberá ser disminuido por tres motivos: por los efectos que provocan los incrementos de temperatura, por el tiempo de duración de carga y por defectos de fabricación del PVC.

Una ventaja más que presenta el modelo es que muestra la forma idealizada de la deformación de los muros. En la Figura 5.5 a) se presenta una fotografía del espécimen real deformado y en la Figura 5.5 b) el modelo deformado de manera idealizada.



a) Modelo del SAP 2000



b) Fotografía del espécimen

Figura 5.5. Muro deformado.

Por otro lado, las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (NTC, 2001), sugieren tres procedimientos para calcular la resistencia de diseño a compresión de la mampostería, uno de los cuales consiste en muretes sometidos a una carga de compresión monotónica en dirección diagonal. Originalmente éste es el motivo por el cual se efectuaron los ensayos de la UNAM.

Para los ensayos de la UNAM, también, en el Apéndice se muestra la Tabla original del informe del Instituto de Ingeniería de la UNAM y algunas gráficas de carga-deformación, (UNAM, 1998).

En la Tabla 5.2 se muestra el porcentaje de error entre los ensayos de tensión diagonal de los paneles rellenos de concreto elaborados por la UNAM y el modelo construido con el programa de cómputo en el presente trabajo.

Tabla 5.2. Porcentaje de error entre los valores registrados por la FI de la UNAM y el SAP 2000.

Muestra	Carga máxima (kg)	Modelo UNAM		Modelo SAP 2000		Error relativo (%)
		Área (cm ²)	Esfuerzo Cortante Máximo (kg/cm ²)	Área (cm ²)	Esfuerzo Cortante Máximo (kg/cm ²)	$\frac{d_{SAP} - d_{UNAM}}{d_{UNAM}} \times 100$
1	17160	950	18.06	1023	16.74	-7.30
2	17840	1020	17.49	1023	17.41	-0.45
3	18610	1015	18.33	1023	18.16	-0.92
4	14790	943	15.68	1023	14.44	-7.90



En los ensayos elaborados por la UNAM, el esfuerzo cortante medio calculado se determinó dividiendo la carga máxima aplicada al modelo entre el área del murete medida diagonalmente.

Para poder realizar el cálculo del esfuerzo medio, es necesario plantear algunas hipótesis con respecto a la descripción del material y la aplicación específica de la carga. El material debe de ser homogéneo, e isótropo, y la carga se aplica a lo largo del eje centroidal de la sección transversal del murete.

Para los muros de mampostería, estas hipótesis son más aproximadas que para los muros de concreto encamisados con PVC. Esta es una de las causas más importantes por las cuales los valores del esfuerzo cortante máximo calculados en la UNAM. Además, en los especímenes 1 y 4, el área de la diagonal es menor que el área de la diagonal del modelo, por este motivo, el valor del error relativo entre el esfuerzo cortante máximos del espécimen y el modelo es mayor al de los otros especímenes, (Tabla 5.2).

El programa de cómputo calcula los esfuerzos con la ecuación (5.2). En ésta se puede ver que se afecta el módulo de elasticidad. Para poder obtener los valores del esfuerzo cortante máximo de los modelos, registrados en la Tabla 5.2, se aplicó un módulo de elasticidad para el PVC de $E = 11\,000 \text{ kg/cm}^2$, y para el concreto $E = 113\,137 \text{ kg/cm}^2$, para este último equivale a un concreto con $f_c = 200 \text{ kg/cm}^2$.

También, en los reportes de los ensayos elaborados por la UNAM se hace la observación que los muretes fallaron por deslizamiento. Es decir, antes que se formara una grieta por tensión, el espécimen falla por deslizamiento en sus juntas, como en el caso de los muros de mampostería. Con esto se hace evidente que los muretes de concreto encamisados con PVC no tienen un comportamiento monolítico.

Por lo tanto, la resistencia por cortante de los muros de concreto encamisados con PVC, queda en función de la capacidad de soportar esfuerzos en sus juntas. Por este motivo, se recomienda hacer un análisis del funcionamiento que presentan las juntas. Para este análisis se debe considerar que el esfuerzo tangencial excede a la resistencia al deslizamiento de las juntas. Dicha resistencia es proporcionada por la adherencia entre las piezas de PVC y el concreto, y la fricción entre los dos materiales. Un análisis para muros de mampostería en donde se determina la resistencia al cortante en las juntas se puede consultar en Meli, (1968). Ahí también se puede observar la influencia del acero de refuerzo en los muros de mampostería y la contribución que hacen los marcos confinantes en los muros de mampostería.



En la Tabla 5.3, se presentan los resultados de los modelos para los ensayos de la viga de 2 m de claro. En ella se muestran los valores calculados de los desplazamientos en la dirección de aplicación de las cargas al centro del claro, para los tres modelos analíticos y para el modelo real. Como se puede apreciar, los valores son muy parecidos entre sí y también con el valor real.

Tabla 5.3. Desplazamientos de una viga de 2 m de un claro.

Desplazamientos de una viga con un claro de 2 m	
Tipo de Elemento	Desplazamiento de la viga (cm)
Barra	-13.3
Sólidos	-12.3
Sólidos cubiertos con placas	-13.3
Elemento real	-13.3

La barra elaborada con elementos sólidos cubiertos con elementos placa, además de tener una buena aproximación, permite realizar con facilidad modelos que describan el comportamiento de un muro o un conjunto de ellos.

A partir de los resultados obtenidos, se elaboró un modelo con el SAP 2000 a base de elementos sólido cubiertos de elementos placa con las mismas características de los presentados por el IMCYC, (IMCYC, 2001).

Los resultados del ensayo aplicado al espécimen 123/3(100), muestra que, entre los tres especímenes con las mismas características, este es el que presentó mayor deformación con la misma carga. Por ello es uno de los ensayos que se consideran más confiables y será al espécimen que se referirán las comparaciones. El desplazamiento máximo registrado para este modelo es de 16.94 cm con un error relativo de 3.292 %.

Con base en los resultados obtenidos, se puede decir que la forma más eficiente de modelar analíticamente los muros de concreto encamisados con PVC es utilizando elementos finitos sólidos. Se deberán considerar las propiedades del concreto o el relleno que se desee simular, y placas con las propiedades del PVC bajo las condiciones de temperatura y duración de carga.



5.2 APLICACIÓN DEL MODELO CALIBRADO

Debido a la importancia que tienen los cambios de temperatura en el comportamiento del sistema RBS, es necesario tomar en cuenta los registros meteorológicos para distintas localidades de la República Mexicana.

La diferencia básica de las temperaturas ambientales se obtiene a partir de la temperatura máxima promedio en el mes más caliente, T_M , y de la temperatura mínima promedio en el mes más frío, T_m .

Como incremento o decremento de temperatura básico en el entorno se toma la diferencia entre T_M y T_m . Se considera el promedio de las temperaturas de un mes por considerar que es necesario un lapso considerable para que la temperatura exterior se refleje en un cambio en la temperatura global de la estructura.

La Tabla 5.4 muestra la variación que puede tener el módulo de elasticidad del PVC de acuerdo a la temperatura y la duración de la carga. Los valores se determinaron dividiendo el módulo de elasticidad entre el coeficiente de deformación proporcionado por la compañía John Stephenson Ltd. (Stephenson, 1993).

Tabla 5.4. Variación del módulo de elasticidad (kg/cm^2) de acuerdo a la temperatura y duración de carga

Temperatura °C	Duración de la carga			
	Inmediata (10 minutos)	24 horas	2 meses	25 años
25	36 700	30 583	27 803	23 986
35	32 767	26 402	23 375	18 442
45	28 671	21 845	16 990	No disponible
55	24 304	13 014	No disponible	No disponible

La Tabla 5.5 (Meli, 2002), presenta los valores de T_M y T_m para distintas ciudades, así como datos sobre la oscilación máxima de temperatura en un día.

Para el análisis de una estructura construida con el sistema RBS, los desplazamientos obtenidos aplicando los registros de la Tabla 5.5 corresponden a las variaciones estacionales de la temperatura. Por lo tanto, los cambios volumétricos pueden tener efecto en forma gradual en un periodo del orden de varios meses.

En el modelo analítico se pueden ajustar las condiciones en que trabajará la estructura y sobre todo, considerar cambios de temperatura en estructuras mas elaboradas, como por ejemplo un edificio.



Tabla 5.5. Datos meteorológicos en distintas localidades de la República Mexicana.

Ciudad	T _M	T _m	O _D	Ciudad	T _M	T _m	O _D
Acapulco	34	22	10	Mexicali	38	5	22
Aguascalientes	32	4	22	México, D. F.	30	6	23
Campeche	32	16	10	Monterrey	35	6	17
Ciudad Juárez	36	2	23	Morelia	28	8	16
Ciudad Victoria	37	10	18	Oaxaca	36	12	23
Colima	32	12	20	Orizaba	32	12	13
Cuernavaca	26	7	14	Pachuca	28	2	16
Culiacán	40	12	21	Puebla	26	4	17
Chetumal	32	18	10	Guerrero	30	4	21
Chihuahua	36	2	23	Saltillo	30	4	17
Chilpancingo	32	12	20	San Luis Potosí	30	4	20
Durango	30	2	22	Tampico	34	16	9
Guadalajara	32	6	22	Tepic	34	10	23
Guanajuato	32	6	17	Tijuana	28	6	17
Hermosillo	40	8	23	Tlaxcala	20	4	18
Jalapa	28	10	12	Toluca	22	2	17
La Paz	34	12	16	Tuxtla Gtz.	35	16	16
León	32	6	21	Veracruz	34	17	8
Mazatlán	30	16	6	Villa Hermosa	34	18	15
Mérida	35	18	13	Zacatecas	28	4	11

T_M Temperatura máxima en el mes más caluroso (media en el mes), en °C

T_m Temperatura mínima en el mes más frío (media en el mes), en °C

O_D Oscilación diaria de temperatura máxima, en °C

Con la finalidad de ilustrar la aplicación del modelo a estructuras más elaboradas, se analizan cuatro edificios de 5 niveles, (Figura 5.8).

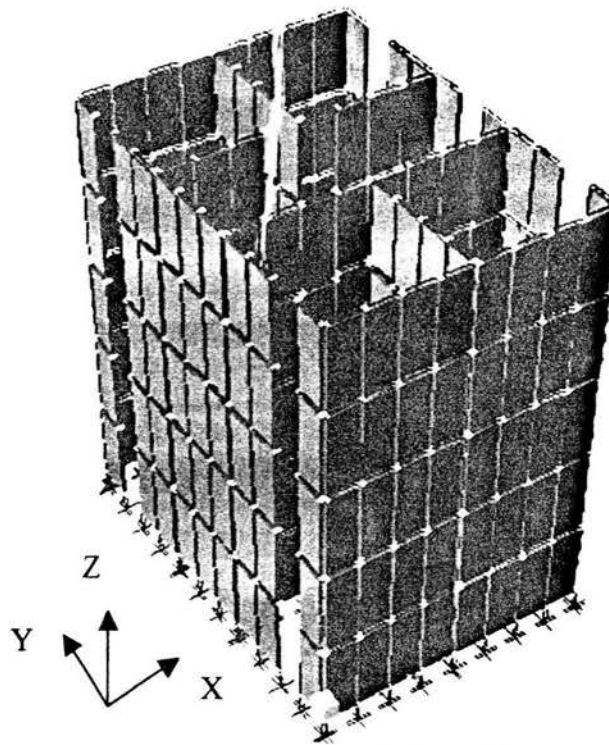


Figura 5.8. Edificio modelado con sólidos cubiertos con placas.

Para determinar la influencia de la temperatura, tiempo de duración de aplicación de la carga y defectos de fabricación del PVC en el comportamiento de los edificios, se construyeron tres modelos con diferente módulo de elasticidad del PVC y uno sin PVC.

Para el modelo 1, se consideraron las condiciones más favorables, temperatura de 10 °C con una duración de carga de 10 minutos y sin defectos de fabricación en el PVC. Con estas condiciones se utilizó un módulo de elasticidad del PVC de $E_{PVC1} = 36\,700 \text{ kg/cm}^2$. En la Tabla 5.6 se presentan las propiedades de los materiales del modelo.

Tabla 5.6. Propiedades del PVC y el concreto para las condiciones más favorables

PROPIEDAD	CONCRETO	PVC	UNIDAD
Masa por unidad de volumen	244.648	142.71	kg/m^3
Peso por unidad de volumen	2 400	1 400	kg/m^3
Módulo de elasticidad	113 100 ¹	36 700	kg/cm^2
Relación de Poisson	0.2	0.2	
Coefficiente de dilatación térmica	10	58	$^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^{-6}$

¹ $f_c' = 200 \text{ kg/cm}^2$, $E = 8000 \cdot 200 \text{ kg/cm}^2$.



En el modelo 2, se incluyeron los datos meteorológicos registrados en la Tabla 5.5 correspondientes a México D.F. Esto es, temperatura máxima de 30°C, una duración de carga¹ de 25 años. Para estas condiciones el módulo de elasticidad del PVC es 21214 kg/cm². El valor del módulo de elasticidad por defectos de fabricación, será igual a $E_{PVC2} = 9546$ kg/cm². En la Tabla 5.7 se presentan las propiedades de los materiales de este modelo.

Tabla 5.7. Propiedades del PVC y el concreto para México D.F.

PROPIEDAD	CONCRETO	PVC	UNIDAD
Masa por unidad de volumen	244.648	142.71	kg/m ³
Peso por unidad de volumen	2 400	1 400	kg/m ³
Módulo de elasticidad	113 100 ¹	9 546	kg/cm ²
Relación de Poisson	0.2	0.2	
Coefficiente de dilatación térmica	10	58	°C ⁻¹ X 10 ⁻⁶

¹ $f'_c = 200$ kg/cm², $E = 8000 \cdot 200$ kg/cm².

Para el modelo 3 se consideraron las mismas propiedades de los materiales del modelo 2, a excepción del módulo de elasticidad del PVC que se consideró igual a 300 kg/cm². Se eligió este valor para ver el comportamiento de la estructura con un valor del módulo de elasticidad del PVC pequeño, prácticamente "sin PVC".

Los tres primeros modelos se elaboraron con elementos sólidos para simular el concreto, cubiertos con placas que simulan el PVC. Cada sólido recubierto mide 100 x 250 x 10 cm. Para los apoyos de la estructura, se restringieron los desplazamientos en la dirección X, Y y Z, y los momentos con respecto a X, Y y Z. Para el cuarto modelo no se modeló el PVC, es decir los sólidos no se recubrieron con placas.

A los cuatro modelos se aplicó un espectro de diseño sísmico correspondiente a la Zona IIIb de México D.F., (Figura 5.9).

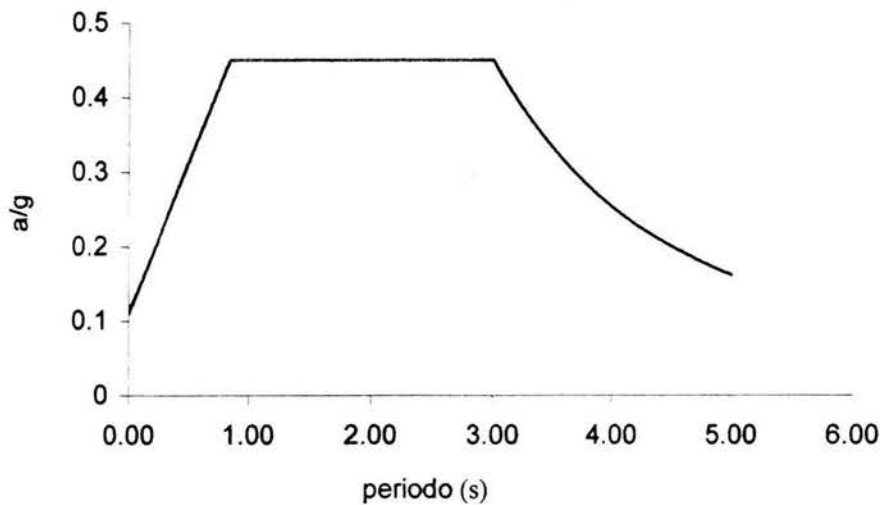


Figura 5.9. Espectro para diseño sísmico Zona IIIb México D.F.

A cada modelo se le aplicó una combinación de acciones, consistentes en una carga muerta de 1 t/m^2 en cada nivel y sismo 100% en la dirección X y 30% en la dirección Y.

Los periodos de vibración calculados, para los cuatro modelos, se presentan en la Tabla 5.8. El porcentaje de error relativo, Tabla 5.9, se calculó considerando los valores del modelo 4 como referencia. Se puede observar que los periodos de vibración del modelo 1 tienen un pequeño aumento al disminuir el módulo de elasticidad. En general, el valor de los periodos de vibración está dentro del intervalo de 0 a 0.85 s de la rama ascendente del espectro de diseño sísmico, Figura 5.9, esto implica que al aumentar el periodo, también aumenta la aceleración espectral.

Con la ecuación (5.3) se puede predecir que el valor del cortante basal aumentará al incrementar el valor de los periodos de vibración.

Tabla 5.8. Periodos de vibración T , en s, de los modelos de 5 pisos.

Modo	Modelo 1 $E_{PVC1} = 36\,700 \text{ kg/cm}^2$	Modelo 2 $E_{PVC2} = 9\,546 \text{ kg/cm}^2$	Modelo 3 E_{PVC3} "sin PVC"	Modelo 4 sólo concreto
	Periodo T_1 (s)	Periodo T_2 (s)	Periodo T_3 (s)	Periodo T_4 (s)
1	0.127	0.129	0.129	0.126
2	0.089	0.090	0.091	0.088
3	0.075	0.076	0.076	0.074
4	0.033	0.033	0.033	0.032
5	0.026	0.026	0.026	0.026



Los porcentajes de error relativo de los modelos 2 y 3 que se presentan en la Tabla 5.9, son prácticamente iguales entre sí, es decir, desde el punto de vista del periodo, el PVC no trabaja.

Tabla 5.9 Error relativo de los periodos de vibración de los modelos.

Modo	Error relativo Modelo 1	Error relativo Modelo 2	Error relativo Modelo 3
	$\frac{d_{\text{modelo1}} - d_{\text{modelo4}}}{d_{\text{modelo4}}} \times 100$	$\frac{d_{\text{modelo2}} - d_{\text{modelo4}}}{d_{\text{modelo4}}} \times 100$	$\frac{d_{\text{modelo3}} - d_{\text{modelo4}}}{d_{\text{modelo4}}} \times 100$
1	0.8	2.4	2.4
2	1.1	2.3	3.4
3	1.4	2.7	2.7
4	3.1	3.1	3.1
5	0.0	0.0	0.0

$$V_b = WC_s \dots \dots \dots (5.3)$$

donde:

V_b : cortante basal

W: peso total

C_s : coeficiente sísmico

En la Tabla 5.10 se presenta el valor de las fuerzas cortantes basales de cada modelo. En el modelo 2 y 3, se observa que efectivamente, la fuerza cortante de entrepiso aumenta ligeramente al disminuir el valor del módulo de elasticidad del PVC, esto se debe a que la rigidez de la estructura disminuye. En el caso del modelo 4, debido a que la estructura está compuesta únicamente por concreto, la rigidez aumenta, por consiguiente los periodos disminuyen y la fuerza cortante basal disminuye.

Tabla 5.10 Fuerza cortante basal en kg debido a sismo.

Modelo	Módulo de elasticidad del PVC	Dirección X	Dirección Y	Error relativo dirección X	Error relativo dirección Y
				$\frac{d_{\text{modelo n}} - d_{\text{modelo 4}}}{d_{\text{modelo 4}}} \times 100$	$\frac{d_{\text{modelo n}} - d_{\text{modelo 4}}}{d_{\text{modelo 4}}} \times 100$
1	E_{PVC1}	153026	47912	5.0	5.1
2	E_{PVC2}	153333	48073	5.2	5.5
3	E_{PVC3} "sin PVC"	153443	48154	5.3	5.7
4	Sólo concreto	145724	45577	-	-



También, en la Tabla 5.10, se puede observar que al variar el módulo de elasticidad del PVC debido al efecto de la temperatura, la estructura cambia su rigidez, lo que se traduce en una variación de las fuerzas cortantes basales y desplazamientos.

En la Tabla 5.10, se puede observar que el porcentaje de error relativo de las fuerzas cortantes basales muestra que, desde el punto de vista de la rigidez de la estructura, el PVC afecta en menos del 6%.

Para los cuatro modelos, en la Tabla 5.11, se presentan los desplazamientos de un nodo ubicado en una esquina de la parte superior de la estructura.

Tabla 5.11. Desplazamientos (cm) en la parte superior de la estructura modelada.

Modelo	X	Y	Error relativo	Error relativo
			$\frac{d_{\text{modelo } n} - d_{\text{modelo } 4}}{d_{\text{modelo } 4}} \times 100$	$\frac{d_{\text{modelo } n} - d_{\text{modelo } 4}}{d_{\text{modelo } 4}} \times 100$
1	0.481	0.325	2.6	3.2
2	0.490	0.331	4.5	5.1
3	0.493	0.333	5.1	5.7
4	0.469	0.315	-	-

Desde el punto de vista de los desplazamientos, el PVC afecta hasta 5.7% la respuesta de la estructura.

A partir de los datos mostrados en la tabla 5.9 a 5.11 se puede observar que desde el punto de vista del periodo el PVC contribuye a la rigidez de la estructura. Sin embargo, debido a que el aumento de la temperatura disminuye el módulo de elasticidad del PVC se puede llegar a tener incrementos de hasta el 5.7 % en los cortantes basales y en los desplazamientos. Este aspecto debe de ser estudiado con mayor detalle, ya que al utilizar valores nominales del módulo de elasticidad se deberán afectar por factores de resistencia que tomen en cuenta la disminución debido a los efectos de la temperatura y defectos de fabricación.

Después de haber determinando la magnitud de las fuerzas cortantes basales, con la finalidad de diseñar la estructura, se pueden hacer variaciones en el modelo. Tales variantes pueden ser: la redistribución de los muros en cada nivel, incluir acero de refuerzo en los muros, o combinar el sistema RBS con el sistema constructivo tradicional.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El módulo de elasticidad del PVC es afectado por la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga. Disminuye, tanto al aumentar la temperatura, como al transcurrir el tiempo bajo un esfuerzo constante. Esto puede tener efectos desfavorables.

Debido a que el coeficiente de dilatación térmica del PVC es del orden de seis veces más grande que el del concreto, al existir cambios en la temperatura se pierde la adherencia química entre estos dos materiales. Esto produce esfuerzos térmicos que generan agrietamientos en el concreto. Los agrietamientos no se pueden ver por el encamisado, esto impide detectar fallas en la estructura y aplicar un adecuado mantenimiento.

Para los muros sin refuerzo horizontal el comportamiento no es monolítico, evidencia de esto se presenta en los ensayos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, en las observaciones se comenta que la falla se presentó por deslizamiento en todos los especímenes.

La temperatura máxima en cada región del país es distinta, lo que hace necesario tener una regionalización del país para poder aplicar en los diseños un valor adecuado en el módulo de elasticidad.

Considerando que actualmente no existen estudios respecto al comportamiento del concreto y el PVC, el comportamiento del sistema puede ser visto con cierta incertidumbre.

Al utilizar un valor del módulo de elasticidad del PVC y reducirlo en función de la temperatura duración de la carga y defectos de fabricación, el MEF es una alternativa muy eficaz para predecir el comportamiento de los sistemas RBS.

Recomendaciones

La temperatura y la duración de la carga afectan directamente al módulo de elasticidad del PVC, por este motivo se recomienda diseñar con un módulo de elasticidad que tome en cuenta la combinación más desfavorable entre la temperatura y la duración de la carga. También, el módulo de elasticidad debe ser afectado por un factor de reducción que permita cubrir defectos de fabricación del PVC.

De acuerdo a la guía de la ingeniería, (RBS 4, 2002), el módulo de elasticidad del polímero debe ser afectado por un factor de 0.8 para considerar los efectos de la temperatura menores de 70 °C, y un factor de 0.5 para asegurar que el polímero trabaje con un comportamiento elástico lineal en condiciones de servicio. Es decir, se disminuye un 60 por ciento el valor del módulo de elasticidad. Pero no cubre todas las combinaciones que se pueden tener de temperatura y duración de



carga. Se recomienda consultar la Tabla 5.4 que presenta más combinaciones o auxiliarse con las ecuaciones (2.10) a la (2.13) con las cuales se puede hacer una extrapolación para cualquier duración de carga y dentro del intervalo de temperatura indicado.

Para los muros encamisados con PVC se recomienda que el polímero no exceda la temperatura de 50 °C. De no ser así se deben de tomar las consideraciones pertinentes, como por ejemplo, diseñar los muros RBS con un módulo de elasticidad adecuado para el polímero, elaborar los muros con acero de refuerzo, efectuar un diseño arquitectónico adecuado que permita que los muros no sean muy largos. Una alternativa para disminuir los efectos de la temperatura, sobre todo para las caras expuestas al sol, radica en el aislamiento térmico por medio de tableros de aislamiento.

No se recomienda el uso de los muros RBS para paredes con carga permanente tal como sótanos o muros de retención, puesto que el efecto del flujo plástico a largo plazo puede ser significativo.

Es conveniente realizar más ensayos de variaciones de la temperatura en el PVC. Estos estudios deben estar encaminados a obtener a qué temperatura se encuentra el PVC de acuerdo con el medio ambiente, qué temperatura alcanza el polímero cuando se encuentra expuesto a la radiación solar y cuando no está. Además, se ampliará el intervalo de valores de la temperatura y de esta forma el valor del módulo de elasticidad será más extenso.

También se recomienda obtener datos del módulo de elasticidad para un mayor tiempo de duración de la carga, puesto que para los datos registrados solo cubre una duración de 25 años.



APÉNDICE

**INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C.**Constitución No. 50 Colonia Escaridón Delegación Miguel Hidalgo México, D.F. C.P. 11800
Teléfonos 5 272-8042, 5 272-8101, 5 272-8204 Fax. 5 272-8689 imcyc@mail.imcyc.com

México, D.F. a 15 de Junio del 2001

ROYAL BUILDING SYSTEM DE MEXICO, S.A. DE C.V.Alamo Plateado No. 1 Piso 6
Fracc. Los Álamos
53230 Naucalpan, Edo. de México
Tel: 26-25-15-00
Fax: 53-43-43-23

At'n: Ing. David Malagón M.

A continuación le presento los resultados de la segunda etapa del ensaye a compresión del sistema "Royal-Panel". Las pruebas se realizaron en piezas al vacío en piezas identificadas como panel 64 de 6.4 cm de espesor; la carga se aplicó en forma excéntrica.

Los especímenes 122/6 a 122/8 los paneles se armaron con las costuras verticales y el espécimen 122/5 el panel se armó con las costuras horizontales.

Especimen No.	Dimensiones (cm)	Excentricidad (cm)	Def. Transv. Máx. Medida (mm)	Carga máxima (Kgf)
122/5(64)	251 x 120.5	2.5	*	999
122/6(64)	250 x 105	2.5	21.59	4092
122/7(64)	250 x 105	2.5	34.04	4293
122/8 (64)*	250 x 105	2.5	24.13	4417

* La deformación horizontal del espécimen 122/5 no fue posible medirla debido a que el pandeo lateral fue muy grande.

Sin otro particular y seguros que la presente información les será de gran utilidad quedamos a sus órdenes para cualquier aclaración.

Atentamente,

Ing. Mario Alberto Hernández H.
Laboratorio de Concreto.

**INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C.**Constitución No. 50 Colonia Escandón Delegación Miguel Hidaigo México, D.F. C.P. 11800
Teléfonos 5 272-8042, 5 272-8101, 5 272-8204 Fax. 5 272-8689 imcyc@mail.imcyc.com

IMCYC

ENSAYE DE PANELES A COMPRESION SIMPLE				
Orden de Trabajo No.	198	Informe Técnico No.	78	Hoja No. 1 de 3
Ciente:	ROYAL BUILDING SYSTEMS DE MÉXICO, S.A. DE C.V.			
Identificación:	PANEL 64			
Lectura No.	Deformación en mm.	Carga kg.		
0	0.00	0		
1	0.74	850		
2	1.78	1173		
3	2.79	1497		
4	4.70	2145		
5	8.13	2794		
6	21.59	3440		
/	/	/		
DATOS COMPLEMENTARIOS Y RESULTADOS				
Muestra No.	122	Fecha de elaboración	-	
Espécimen No.	6	Fecha de ensaye	14-jun-01	
Resistencia mínima especificada, kg/cm ²	-	Longitud del panel, cm.	250.0	
Aproximación de los micrómetros, pulg.	0.001	Espesor, cm.	6.5	
Longitud de medición cm.	2.5	Ancho, cm.	105.0	
		Area, cm ²	683	
		Carga máxima, kg	4092	
			Esfuerzo máximo 6.00 kg/cm ²	
			Deformación lateral Máxima 21.59 mm	
Observaciones				
1.- Sistema Royal - Panel, ensayado al vacío.				
2.- El muestreo y procedencia del espécimen no fue responsabilidad del IMCYC.				
Referencias Norma Mexicana NMX C-405-1997-ONNCCCE				
Realizó	C.R.V.	Revisó	José Mario A. Hernández H.	Fecha 14-jun-01

Prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin la autorización del IMCYC.
Los resultados del presente informe corresponden únicamente a la muestra ensayada.
FIG-050 25xFIG-GTLC0-050
Versión 01

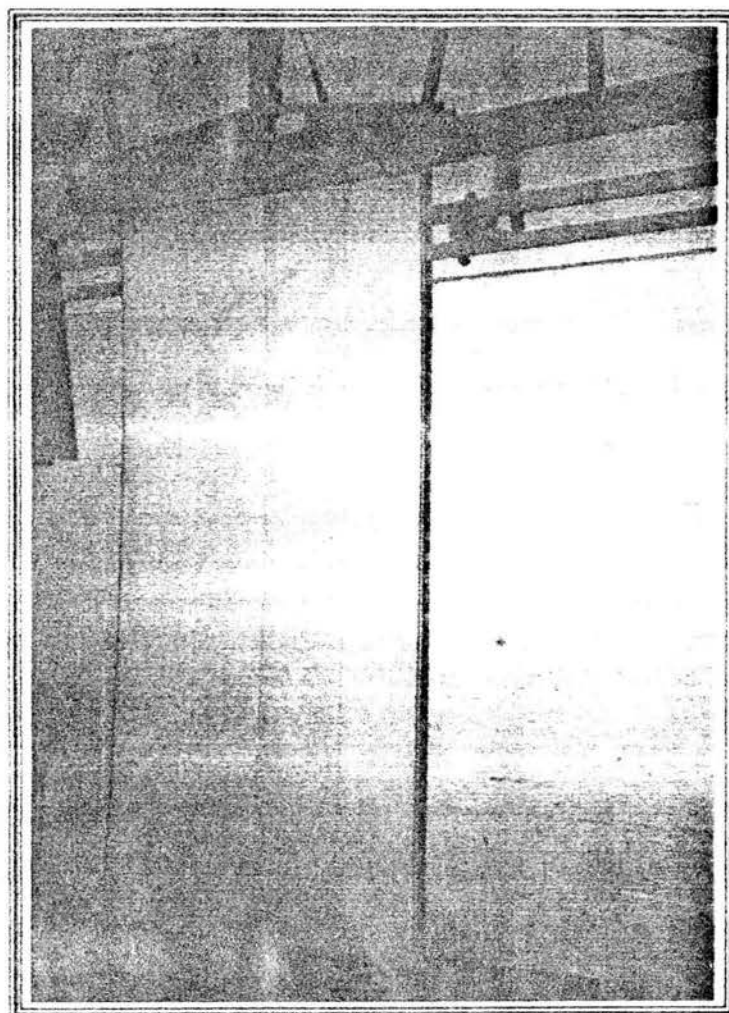


INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C.

Constitución No. 50 Colonia Escandón Delegación Miguel Hidalgo México, D.F. C.P. 11800
Teléfonos 5 272-8042, 5 272-8101, 5 272-8204 Fax. 5 272-8689 imcyc@mail.imcyc.com

ROYAL BUILDING SYSTEMS DE MÉXICO

PANEL 64



ENSAYE A COMPRESIÓN ESPÉCIMEN 122/6

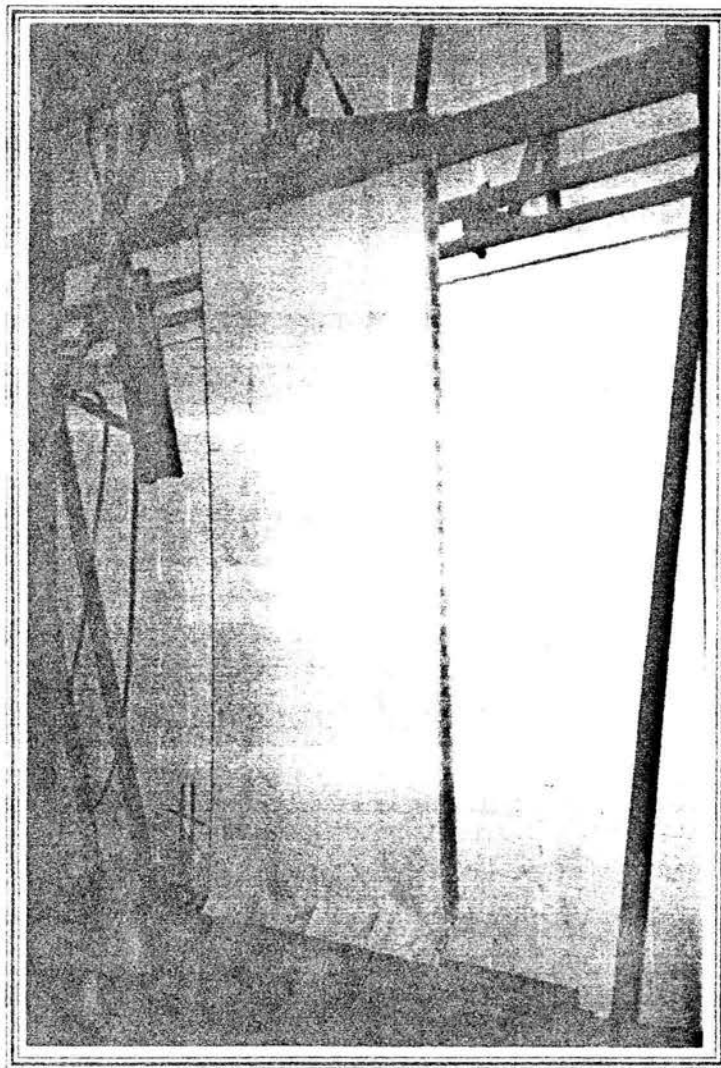


INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C.

Constitución No. 50 Colonia Escandón Delegación Miguel Hidalgo México, D.F. C.P. 11800
Teléfonos 5 272-8042, 5 272-8101, 5 272-8204 Fax. 5 272-8689 imcyc@mail.imcyc.com

ROYAL BUILDING SYSTEMS DE MÉXICO

PANEL 64



ENSAYE A COMPRESIÓN ESPÉCIMEN 122/7

**INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C.**Constitución No. 50 Colonia Escandón Delegación Miguel Hidalgo México, D.F. C.P. 11800
Teléfonos 5 272-8042, 5 272-8101, 5 272-1204 Fax. 5 272-8689 imcyc@mail.imcyc.com

IMCYC

ENSAYE DE PANELES A COMPRESION SIMPLE			
Orden de Trabajo No.	198	Informe Técnico No.	78
			Hoja No. 3 de 3
Cliente: ROYAL BUILDING SYSTEMS DE MÉXICO, S.A. DE C.V.			
Identificación: PANEL 64			
Lectura No.	Deformación en mm.	Carga kg.	
0	0.00	0	
1	1.02	850	
2	2.41	1173	
3	3.81	1497	
4	5.46	1818	
5	9.65	2145	
6	11.94	2469	
7	15.24	2794	
8	18.54	3118	
9	24.13	3440	
/	/	/	
DATOS COMPLEMENTARIOS Y RESULTADOS			
Muestra No.	128	Fecha de elaboración	-
Especimen No.	8	Fecha de ensaye	13-jun-01
Resistencia mínima especificada, kg/cm ²	-		
Aproximación de los micrómetros, pulg.	0.001	Longitud del panel, cm.	250.0
Longitud de medición cm.	2.5	Espesor, cm.	6.5
		Ancho, cm.	105.0
		Area, cm ²	683
		Carga máxima, kg	4417
			Esfuerzo máximo <u>6.47 kg/cm²</u>
			Deformación lateral Máxima <u>24.13 mm</u>
Observaciones			
1.- Sistema Royal - Panel, ensayado al vacío.			
2.- El muestreo y procedencia del espécimen no fue responsabilidad del IMCYC.			
Referencias Norma Mexicana NMX C-405-1997-ONNCCCE			
Realizó	C.R.V.	Revisó	Ing. Mario Hernández H. Fecha 13-jun-01

Prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin la autorización del IMCYC.
Los resultados del presente informe corresponden únicamente a la muestra ensayada.
FIG-050.022FIG-GTLC0-050
Versión 01

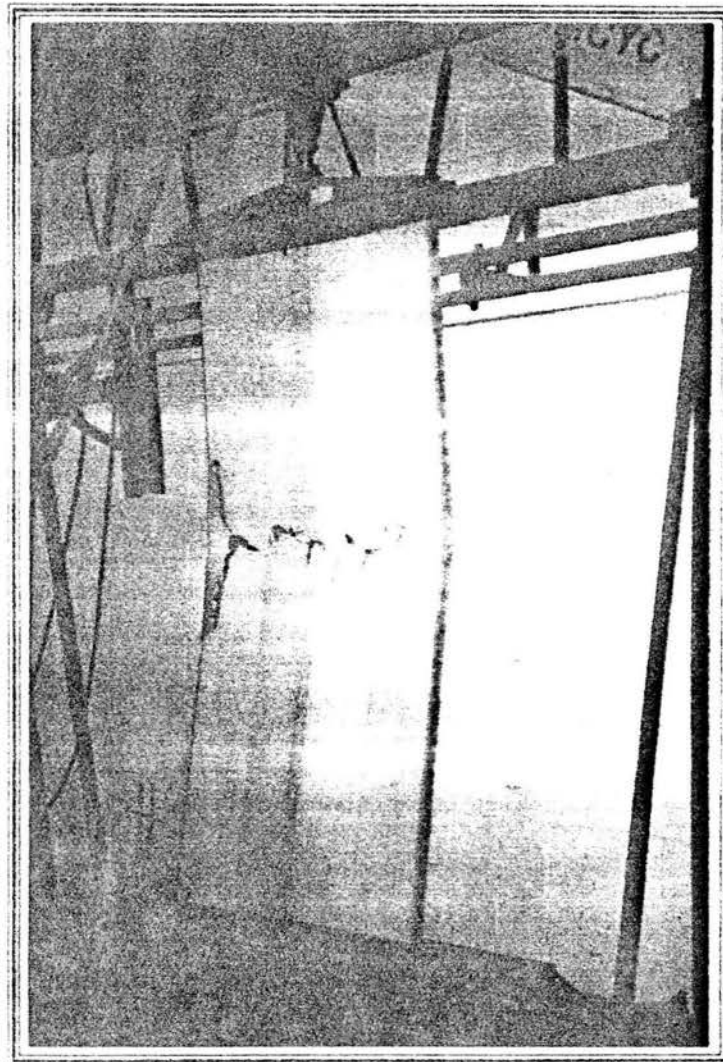


INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C.

Constitución No. 50 Colonia Escandon Delegación Miguel Hidaigo México, D.F. C.P. 11800
Teléfonos : 272-8042, 5 272-8101 5 272-8204 Fax. 5 272-8688 imcyc@mail.imcyc.com

ROYAL BUILDING SYSTEMS DE MÉXICO

PANEL 64



ENSAYE A COMPRESIÓN ESPÉCIMEN 122/8

**INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C.**Constitución No. 50 Colonia Escandón Delegación Miguel Hidalgo México, D.F. C.P. 11800
Teléfonos 5 272-8042, 5 272-8101, 5 272-8204 Fax. 5 272-8689 imcyc@mail.imcyc.com

México, D.F. a 31 de Mayo del 2001

ROYAL BUILDING SYSTEM DE MEXICO, S.A. DE C.V.Alamo Plateado No. 1 Piso 6
Fracc. Los Álamos
53230 Naucalpan, Edo. de México
Tel: 26-25-15-00
Fax: 53-43-43-23**At'n: Ing. David Malagón M.**

A continuación le presento los resultados del ensaye a compresión del sistema "Royal-Panel". Las pruebas se realizaron en piezas al vacío en piezas identificadas como panel 100 de 10 cm de espesor; la carga se aplicó en forma excéntrica.

Los especímenes 123/1 a 123/3 los paneles se armaron con las costuras verticales y el espécimen 123/4 el panel se armó con las costuras horizontales.

Especímen No.	Dimensiones (cm)	Excentricidad (cm)	Def. Transv. Máx. Medida (mm)	Carga máxima (Kgf)
123/1(100)	250 x 102	2.5	9.22	8657
123/2(100)	250 x 102	2.5	13.8	8331
123/3(100)	250 x 102	2.5	16.4	8003
123/4(100)*	247.5 x 121	2.5	*	1818

* La deformación horizontal del espécimen 123/4 no fue posible medirla debido a que el pandeo lateral fue muy grande.

Sin otro particular y seguros que la presente información les será de gran utilidad quedamos a sus ordenes para cualquier aclaración.

Atentamente,


Ing. Mtro. Alberto Hernández H.
Laboratorio de Concreto.



INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C.

Constitución No. 50 Colonia Escandón Delegación Miguel Hidalgo México, D.F. C.P. 11800
Teléfonos 5 272-8042, 5 272-8101, 5 272-8204 Fax. 5 272-8689 imcyc@mall.imcyc.com

ROYAL BUILDING SYSTEMS DE MEXICO

PANEL 100



ENSAYE A COMPRESIÓN ESPÉCIMEN 123/1



INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C.

Constitución No. 50 Colonia Escandon Delegación Miguel Hidaigo México, D.F. C.P. 11800
Telefonos 5 27 1-8042, 5 272-8101, 5 272-8204 Fax. 5 272-8689 imcyc@mail.imcyc.com

ROYAL BUILDING SYSTEMS DE MEXICO

PANEL 100



INICIO DE LA FALLA DEL ESPÉCIMEN 123/2

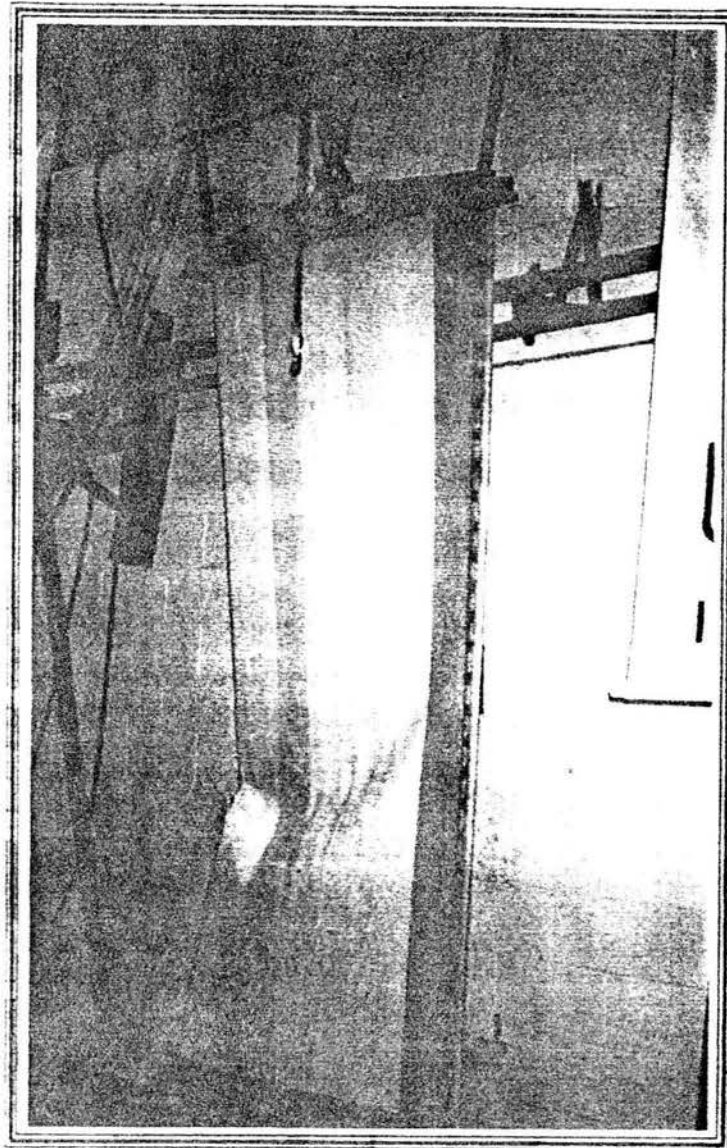


INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C.

Constitución No. 50 Colonia Escandón Delegación Miguel Hidalgo México, D.F. C.P. 11800
Teléfonos 5 272-8042, 5 272-8101, 5 272-8204 Fax. 5 272-8689 imcyc@mail.imcyc.com

ROYAL BUILDING SYSTEMS DE MEXICO

PANEL 100



FALLA DEL ESPÉCIMEN 123/3

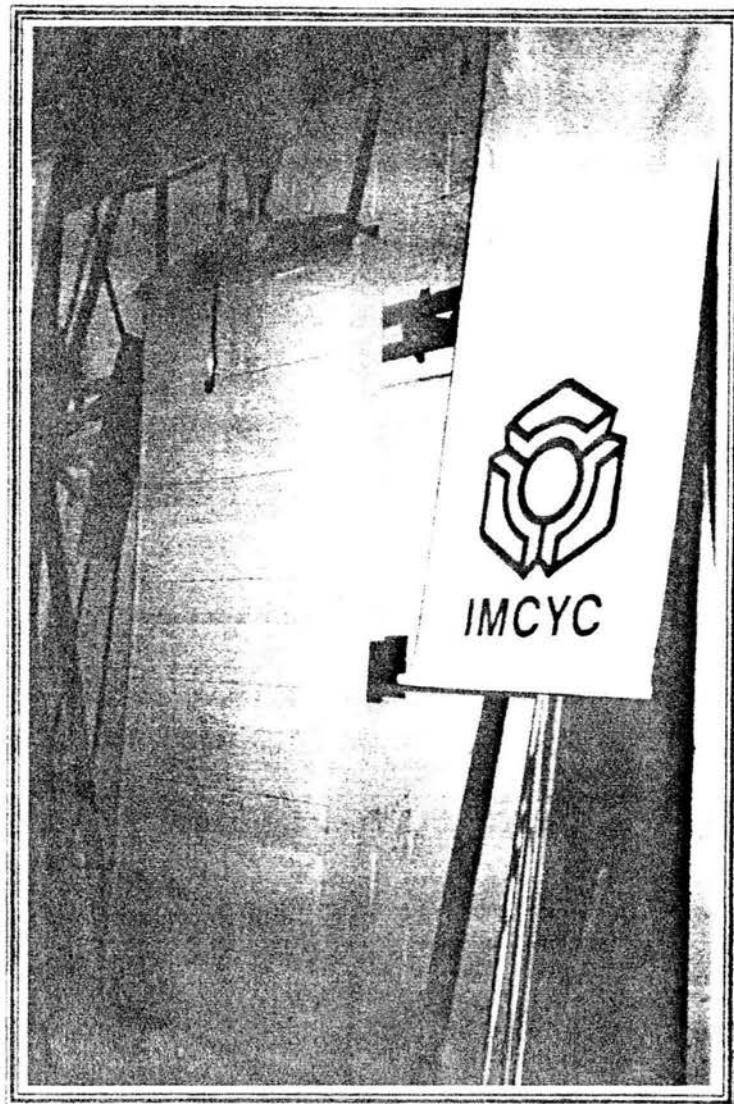


INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C.

Constitución No. 50 Colonia Escandón Delegación Miguel Hidalgo México, D.F. C.P. 11800
Teléfonos 5 272-8042, 5 272-8101, 5 272-8204 Fax. 5 272-8689 imcyc@mail.imcyc.com

ROYAL BUILDING SYSTEMS DE MEXICO

PANEL 100



**ENSAYE A COMPRESIÓN DEL PANEL CON LAS COSTURAS
HORIZONTALES**

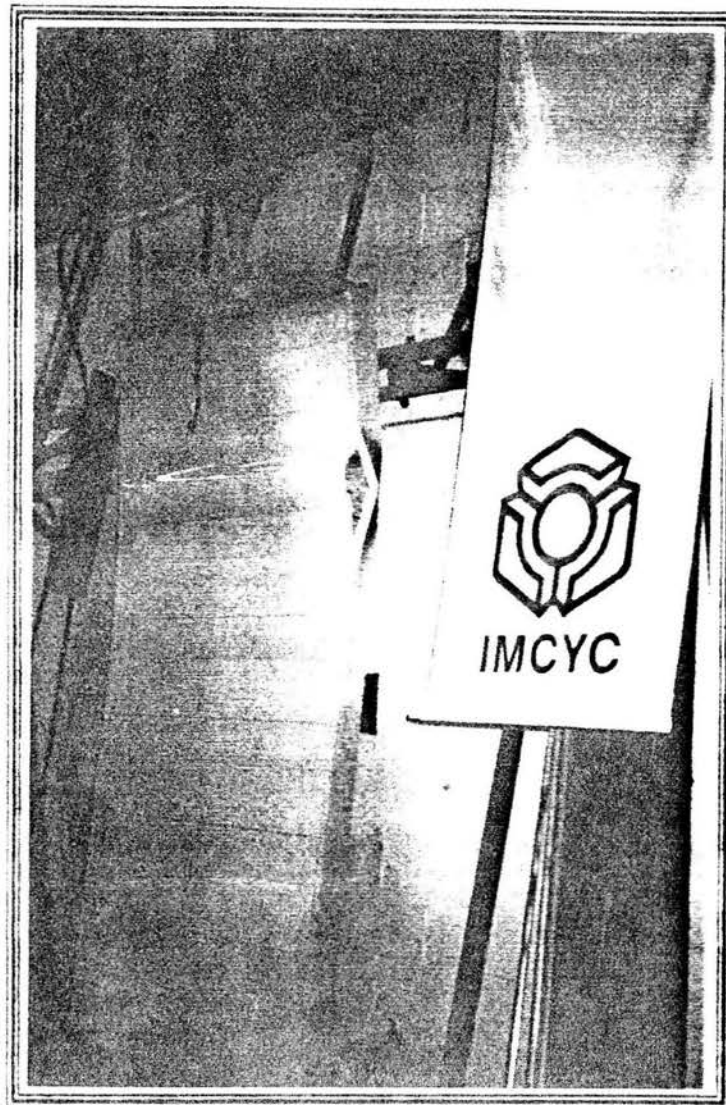


INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C.

Constitución No. 50 Colonia Escandón Delegación Miguel Hidalgo México, D.F. C.P. 11800
Teléfonos 5 272-8042, 5 272-8101, 5 272-8204 Fax. 5 272-8689 imcyc@mail.imcyc.com

ROYAL BUILDING SYSTEMS DE MEXICO

PANEL 100



FALLA DEL PANEL CON LAS COSTURAS HORIZONTALES



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

DIVISION DE INGENIERIA (CIVIL,
TOPOGRAFICA y GEODESICA)
DEPARTAMENTO DE ESTRUCTURAS
LABORATORIO DE MATERIALES

Dr. Oscar Hernández Basilio
Presente:

Con el motivo de haber realizado las pruebas de tensión diagonal a muretes de concreto en camisas de plástico rígido proporcionadas por usted, me permito enviarle el informe de resultados obtenidos.

INFORME DE RESULTADOS
OBTENIDOS EN MURETES DE
CONCRETO ENCAMISADO,
ENSAYADOS EN TENSION
DIAGONAL.

Muestra	Area cm ²	Carga Máxima kg	Esfuerzo Cortante Máxima. Kg/cm ²	Observaciones
1	950	17160	18.06	Falla por deslizamiento
2	1020	17840	17.49	Falla por deslizamiento
3	1015	18610	18.33	Falla por deslizamiento
4	943	14790	15.68	Falla por aplastamiento

El esfuerzo cortante promedio es de $v=17.39 \text{ kg/cm}^2$

Utilizando un coeficiente de variación $c.v.=0.2$

De acuerdo con las N.T.C.M. el $v^*=11.59 \text{ kg/cm}^2$

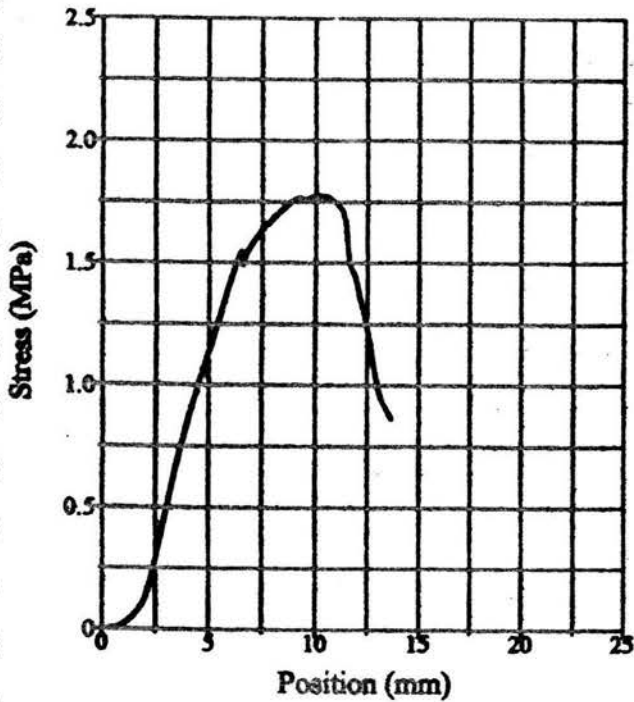
Y con un $c.v.=0.07$ obtenido de los ensayos $v^*=14.80 \text{ kg/cm}^2$

Los esfuerzos se obtuvieron sobre un ancho de 10 cm.

Dos de las muestras enviadas no fue posible probarlas, por no ajustarse a las dimensiones del marco de carga.

ATENTAMENTE

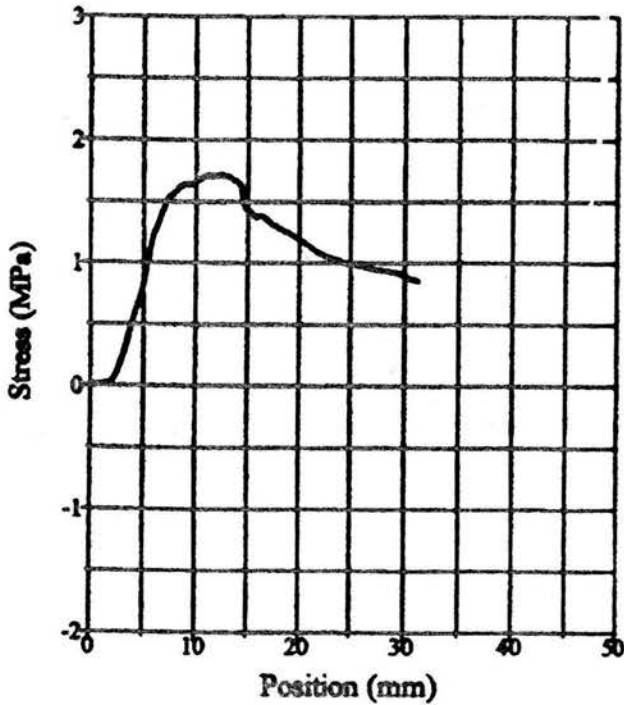
Ing. Héctor Javier Guzmán Olguín



Test Results
Area: 95000.0000 mm²
Compressive Strength: 1.7714 MPa
Peak Load: 17160.0000 kg
Peak Stress: 0.1806 kg/mm²

Test Summary

Center: 73
Elapsed Time: 00:06:07
Material: CONCRETO
Operator: MARIO
Specimen Identification: ROYAL1
Procedure Name: TENSION DIAGONAL
Start Date: 8/27/98
Start Time: 11:35:36 AM
End Date: 8/27/98
End Time: 11:41:43 AM
Workstation: Universidad Nacional Auto



Test Results

Area: $1.02 \times 10^5 \text{ mm}^2$
Compressive Strength: 1.7152 MPa
Peak Load: 17849.0000 kg
Peak Stress: 0.1749 kg/mm²

Test Summary

Counter: 74
Elapsed Time: 00:06:44
Material: CONCRETO
Operator: MARIO
Specimen Identification: ROYAL2
Procedure Name: TENSION DIAGONAL
Start Date: 8/27/98
Start Time: 11:51:26 AM
End Date: 8/27/98
End Time: 11:53:10 AM
Workstation: Universidad Nacional Auto



REFERENCIAS

- Anderson, J.C. (1998), "Ciencia de los materiales" 2ª ed., Limusa, México.
- Askeland, R. (1998), "Ciencia e Ingeniería de los Materiales", 3ª ed., Intercontinental Thomson Editores, México.
- Callister, W. D. Jr. (1996), "Ciencia e Ingeniería de los Materiales" Tomo II, Reverté, S.A., España.
- CFE (1981), "Acciones" Cap. C.1.2 del Manual de Diseño de Obras Civiles. Comisión Federal de Electricidad. México D.F.
- CFE (1994), Comisión Federal de Electricidad. "Manual de Tecnología del Concreto. (Sección 3)", Limusa, México.
- Deméneghi. (2000), "Método del Elemento Finito. Análisis lineal", Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. Departamento de Geotecnia." México.
- Ghiocel, D. (1975), "Wind, Snow and Temperature Effects on Structures Based on Probability" Abacus Press, Kent.
- Hernández O. (1996), "Evaluación Estructural del Sistema Royal Building Systems para su Aplicación en la Republica Mexicana", México.
- Hibbeler, C. (1995), "Mecánica de Materiales", Compañía Editorial Continental, México.
- Stephenson (1993), "Resultados de Ensayes y Datos de Diseño", Compañía de Ingeniería Estructural, Canadá.
- IMCYC (2001), "Resultado de Ensayes de Paneles RBS a Compresión Simple", Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- Karlekar, B.V. (1986), "Transferencia de Calor", 2ª ed., Interamericana, México.
- Manual SAP 2000 (2002), "Software Integrado para Análisis y Diseño Estructurales. Manual de Referencia del Análisis" Computadoras y Estructuras.
- Meli (2002), "Diseño estructural", 2ª ed., Limusa, México.
- Meli R. (1968), "Comportamiento de Muros de Mampostería Sujetos a Carga Lateral. Segundo Informe", Facultad de Ingeniería. UNAM.



Mongonon, P. L. (2001), "Ciencia de los Materiales. Selección y Diseño", Pearson Educación, México.

NTC (2001), Propuesta de Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal.

RBS 1 (2000), Royal Building Systems de México S.A. de C.V., "Consideraciones Estructurales para utilizar el sistema RBS en la Republica Mexicana".

RBS 2 (2000), "Construction Bulletin", Royal Building Systems de México S.A. de C.V. No.1, Issue 1, January 2000. www.rbsdirect.com.

RBS 3 (2002), "Construction Bulletin", Royal Building Systems de México S.A. de C.V. No.2, Issue 2, www.rbsdirect.com.

RBS 4 (2002), "Engineering Guide", Royal Building Systems. www.rbsdirect.com.

Rubin, I. I. (1999), "Materiales Plásticos, Propiedades y Aplicaciones", Limusa, México.

SAP 2000 (2000), "Programa de Análisis Estructural. SAP 200 Non Linear Version 7.40", Computers and Structures, Inc.

Smith, W. F. (1998), "Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales", 3ª ed., Mc Graw Hill, España.

TROW (1994), "Resultados de Ensayes y Datos de Diseño", TROW Consulting Engineers Ltd, Canadá.

UNAM (1998), "Informe de Resultados Obtenidos en Muretes de Concreto Encamisado, Ensayados a Tensión Diagonal", Universidad Nacional Autónoma de México, División de Ingeniería Civil, Topográfica y Geodesia. Departamento de Estructuras. Laboratorio de Materiales.