



SISTEMA NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES

ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE VIGAS DE CONCRETO REFORZADO DISEÑADAS CONFORME AL REGLAMENTO DE CONSTRUCCIÓN DE LA CIUDAD DE MÉXICO, SUJETAS A CARGA DEL TIPO SISMO

Osvaldo Contreras Reyes Oscar López Bátiz Víctor Simón Vargas Ortega

Dirección de Investigación Subdirección de Riesgos Estructurales

Enero 2021





ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS				
1.1.	Introducción	3			
1.2.	Objetivo	3			
2.	DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DE ESTUDIO				
2.1.	Características de los especímenes	5			
2.2.	Materiales	8			
3.	ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LOS MODELOS				
3.1.	Cálculo de las fuerzas asociadas a la resistencia cortante y a la resistencia a la flexión	9			
3.2.	Desplazamiento esperado y longitudes de anclaje y desarrollo	11			
3.3.	Calculo de la longitud de desarrollo	11			
4.	DISPOSITIVO DE APLICACIÓN DE CARGA E INSTRUMENTACIÓN				
4.1.	Dispositivo de instrumentación y aplicación de carga	13			
4.2.	Dispositivo de aplicación de carga	13			
4.3.	Montaje	13			
4.4.	Instrumentación interna	13			
4.5.	Instrumentación externa	17			
4.6.	Patrón de carga	19			
5.	COMPORTAMIENTO GENERAL DE LOS MODELOS Y ANALISIS DE				
	RESULTADOS				
5.1.	Comportamiento general de los modelos	21			
5.2.	Análisis de resultados	30			
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES				
ANE	хо				
A1.	Proceso de construcción de los especímenes	40			
A2.	Cimbrado	45			
A3.	Colado	46			
A4.	Dimensiones finales de los elementos	47			
A5.	Habilitado del marco de prueba	48			
A6.	Ensaye de materiales	49			
A7.	Resistencia real	50			
REFERENCIAS 5					
AGR	ADECIMIENTOS	54			





1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

En la nueva edición de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto 2017 (NTC-DCEC-2017), así como en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo 2017 (NTC-DS-2017), ambas del Reglamento de Construcción para la Ciudad de México, se introduce formalmente el análisis no lineal como una de las opciones para revisar y garantizar un adecuado comportamiento de las edificaciones ante el impacto de sismos fuertes; no obstante, aunque en los apéndices normativos existe información para el usuario, la información es producto de estudios realizados en otros países, no existe información suficiente en el medio mexicano sobre el comportamiento de elementos de concreto reforzado ante estos niveles de demanda. Por lo tanto resulta importante, tanto para el gremio académico, como para el ingeniero de la práctica, conocer los parámetros que describan el comportamiento de este tipo de elementos ante carga cíclica reversible, tipo sísmico, generalmente denominada como comportamiento histerético, que desarrollan los elementos de concreto reforzado.

El procedimiento propuesto en el capítulo 3 de las NTC-DCEC-2017, para realizar análisis no lineal de un sistema estructural es a través de modelar cada uno de los elementos estructurales mediante una barra que en la parte central tiene comportamiento lineal y en los extremos tiene comportamiento inelástico llamadas articulaciones plásticas, a dicho artificio se le conoce como elemento de plasticidad concentrada. Las rigideces de las articulaciones como el elemento central de la barra se determinarán con la opción de utilizar el diagrama momento-curvatura la cual se basa en la información de las curvas de esfuerzo-deformación del concreto y del acero; otra opción es la de idealizar la gráfica momento-rotación de información obtenida de pruebas experimentales.

En ambas opciones el Apéndice D de la NTC-DCEC-2017 presenta la información necesaria para que el ingeniero de la práctica utilice cualquiera de las dos opciones para modelar las zonas de las articulaciones plásticas, no obstante, el ingeniero de la practica debe de tener en cuenta las desventajas que presentan las opciones presentadas en las NTC-DCEC-2017 para logar representar el comportamiento real de los elementos de concreto reforzado ante la acción de las cargas cíclicas como son los sismos.

1.2 Objetivo

- Obtener información sobre el comportamiento carga desplazamiento (histerético) de trabes de concreto reforzado diseñadas convencionalmente de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto 2017, del Reglamento de Construcción de la Ciudad de México.
- Obtener los parámetros que gobiernan el comportamiento de pérdida de rigidez y
 resistencia bajo la acción de cargas cíclicas reversibles para diversos niveles de
 cuantía de refuerzo a flexión, así como para diferentes valores de cuantía de
 refuerzo y niveles de separación del refuerzo transversal;
- Cuantificar el nivel de daño acumulado con respecto a un parámetro visual (ancho de grieta), parámetro de vital importancia para los procedimientos de evaluación del





nivel de seguridad estructural de las edificaciones después de la incidencia de un sismo de gran intensidad.





2. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DE ESTUDIO

2.1 Características de los especímenes

Con el propósito de revisar el desempeño de las zonas donde se concentrará el comportamiento inelástico en un sistema estructural de múltiples grados de libertad, sujeto a fuerzas laterales similares a las que genera el efecto de sismo, se concibe el estudio en los extremos de las trabes, donde se acepta la conformación de articulaciones plásticas. Considerando la capacidad instalada del Laboratorio de Grandes Estructuras (LEG) del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, así como las posibilidades financieras para el desarrollo de actividades de investigación, se construyó un nodo monolítico de concreto armado, caracterizando una conexión entre trabes y columna en el plano, misma que se mantiene en comportamiento elástico durante la demanda de fuerzas laterales. Se consideró el estudio de cuatro tipos de trabes, para lo cual se construyeron dos elementos tipo unión trabe – columna en el plano, en forma de "+", en cuyos extremos se tenían las trabes a estudiar.

El espécimen representativo de la unión trabe – columna está conformado por una columna (nodo monolítico) y dos trabes, una en cada extremo de la columna, asumiendo que la distribución de momento flexionante en la trabe es nulo en el centro de su longitud, por lo que las trabes se analizarán como trabes en voladizo, con la aplicación de una carga concentrada en el extremo libre de las mismas. Las dimensiones y características de las trabes se describen en los párrafos siguientes.

Se diseñaron dos familias de trabes de concreto reforzado siguiendo los lineamientos de la reglamentación y normatividad de diseño actual (Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México 2017, así como Normas Técnicas Complementarias 2017). Se contó con dos familias de trabes, para la primera se contó con dos trabes con la cuantía mínima de refuerzo a flexión, con separación del acero de refuerzo transversal a cada 10 cm (@10) y a cada 20 cm (@20). La segunda familia de trabes se diseñó con un nivel de refuerzo a flexión considerando la cuantía de refuerzo longitudinal en la vecindad de la máxima (88% de que le corresponde a la falla balanceada), manteniendo como variable la separación del acero transversal, @10 y @20.

En la figura 1 se muestran las secciones transversales de los modelos de trabe que se revisaron en el presente trabajo, las secciones de los cuatro modelos son de 20 cm de ancho, por 50 cm de peralte total. Las secciones transversales de las trabes de los cuatro modelos tienen una relación de aspecto entre el peralte total y el ancho de la sección transversal h/b=2.5. Los cuatro modelos se diseñaron conforme a la NTC-C-2017 de modo que se comportaran adecuadamente a cortante para que el mecanismo de falla resultara preferentemente de flexión.

El elemento columna que une a las dos trabes, que hace las veces de nodo o unión de la trabe y la columna, es de concreto reforzado, con una propuesta de cuantía de acero longitudinal de 0.0049 (menor que el mínimo aceptable en columnas, pero las dimensiones





de la columna fueron definidas para evitar problemas de adherencia e incursión de la plasticidad del acero de refuerzo longitudinal de la trabe en la zona de influencia del modelo colocado en el lado opuesto de la unión), por lo que se colocaron 14 varillas de acero corrugado del número 6 y con acero transversal compuesto por barras de acero corrugado del número 3, considerando estribado exterior e interior, como se muestra en las figuras 2, 3 y 4.



Figura 1. Sección transversal de los modelos considerados en el estudio. Trabes de concreto reforzado de sección transversal de 20x50 cm: a) armada con 2 varillas de acero corrugado del número 4 (1/2") y estribos de alambrón (5/16"); b) armada con 7 varillas de acero corrugado del número 6(3/4") y estribos de número 3 (3/8")



Figura 2. Vista en plata del armado del dado o columna para ambos especímenes

El diseño de los modelos (cuatro trabes) se hizo de acuerdo con los procedimientos sugeridos en las NTC-DCEC-2017, para lo cual las trabes se diseñaron considerando que forman parte de una edificación con niveles de ductilidad baja, es decir, usando lo correspondiente al uso de un factor de comportamiento sísmico, Q, igual a dos.







Figura 3. Vista en elevación del armado del espécimen, para el caso cuando se usó cuantía máxima de acero de refuerzo longitudinal



Figura 4. Vista en elevación del armado del espécimen, para el caso cuando se usó cuantía mínima de acero de refuerzo longitudinal

Para identificar las trabes que con forman los especímenes, de este trabajo, se adoptado la siguiente terminología, ver figura 5.



Figura 5 Nomenclatura de las trabes o para el tratamiento de la información





En la tabla 1 se describen los modelos de las trabes de este trabajo:

Tabla 1 Descripción de cada una de las vigas contenidas en los especímenes de este trabajo

Modelo	Descripción
E1MA20	Trabe de concreto reforzado clase 1, con una propuesta de refuerzo longitudinal en tensión y compresión consistente en siete barras del #6, cada uno, por lo que el porcentaje de refuerzo longitudinal (cuantía de refuerzo) es del 88% del que corresponde a la condición balanceada. Para el refuerzo por cortante (estribos), se utilizaron barras del #3 separadas en la dirección transversal a una distancia de 20 cm.
E1MA10	Trabe de concreto reforzado clase 1, con una propuesta de refuerzo longitudinal en tensión y compresión consistente en siete barras del #6, cada uno por lo que el porcentaje de refuerzo longitudinal (cuantía de refuerzo) es del 88% del que corresponde a la condición balanceada. Para el refuerzo por cortante (estribos), se utilizaron barras del #3 separadas en la dirección transversal a una distancia de 10 cm.
E2MI20	Trabe de concreto reforzado clase 1, con una propuesta de refuerzo longitudinal en tensión y compresión consistente en dos barras del #4, cada uno, por lo que el porcentaje de refuerzo longitudinal (cuantía de refuerzo) corresponde al mínimo que establece las NTC-DCEC-2017. Para el refuerzo por cortante (estribos), se utilizaron barras de alambrón (varilla lisa del #2.5) separadas en la dirección transversal a una distancia de 20 cm.
E2MI10	Trabe de concreto reforzado clase 1, con una propuesta de refuerzo longitudinal en tensión y compresión consistente en dos barras del #4, cada uno, por lo que el porcentaje de refuerzo longitudinal (cuantía de refuerzo) corresponde al mínimo que establece las NTC-DCEC-2017. Para el refuerzo por cortante (estribos), se utilizaron barras de alambrón (varilla lisa del #2.5) separadas en la dirección transversal a una distancia de 10 cm.

2.2 Materiales

Se utilizó concreto clase I con resistencia nominal a compresión de f´c=250 kg/cm². Como refuerzo longitudinal para los modelos y la columna se usaron barras de acero corrugado del número 6 y 4, y para el acero de refuerzo transversal (estribos) barras del número 3 y alambrón (número 2.5). Las barras de acero corrugado con una resistencia nominal a la fluencia de fy = 4200 kg/cm², y en el caso del alambrón la resistencia nominal a la fluencia de fy = 2530 kg/cm².

A continuación, en la tabla 2 se presenta un resumen del material que se ocupó para la fabricación de los especímenes de este estudio:

Tabla 2 Cuantificación del acero de refuerzo y concreto utilizado para la construcción de los
especímenes de este trabajo

Material	Cantidad	Unidad
Varillas #6	9.00	m
Varillas #4	3.00	m
Varillas #3	30.00	m
Varillas #2.5	11.50	kg
f´c = 250 kg/cm ²	3.20	m ³





3. ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LOS MODELOS

3.1 Cálculo de la fuerza cortante asociada a la resistencia a cortante y a la resistencia a flexión

La resistencia a fuerza cortante esperada en cada uno de los modelos será la suma de cortante que toma el concreto (V_{cR}), y la fuerza cortante que toma el acero de refuerzo transversal (V_{sR}).

Para estimar la fuerza cortante que toma el concreto, se utilizara la ecuación 5.3.3 (ecuación 1) de las NTC-DCEC-2017, debido a que la relación claro a peralte total (L/h) es menor a 4, y para estimar la fuerza cortante que toma el acero para las diferentes separaciones del acero transversal se utilizará la ecuación 5.3.29 de las NTC-DCEC-2017 (ecuación 3).

$$V_{cR} = F_R \left(3.5 - 2.5 \frac{M}{Vd} \right) 0.5 \sqrt{f'c} bd$$

$$s = \frac{F_R A_V f_y d(\sin \theta + \cos \theta)}{V_{sR}}$$
2

Donde:

- F_R Es el factor de resistencia a cortante, para este trabajo se tomó igual a 1.0
- M Es el momento flexionante que actúa en el elemento
- *V* Es el valor de la fuerza cortante que actúa en el elemento
- *d* Distancia entre el centroide del acero de compresión y la fibra extrema a compresión
- *b* Ancho de la sección
- f'c Resistencia especificada del concreto a compresión
- Av Área transversal del refuerzo para fuerzo cortante comprendido a una distancia s
- *s* Separación del refuerzo transversal
- fy Esfuerzo de fluencia del acero
- Angulo del acero de refuerzo forma con el eje de la pieza
- *V_{cR}* Fuerza cortante de diseño que toma el concreto
- *V*_{sR} Fuerza cortante de diseño que toma el acero de refuerzo transversal

Para calcular el valor de la fuerza cortante que toma el acero de refuerzo transversal (VsR), para las separaciones del acero de refuerzo transversal propuesto en cada uno de los modelos de las trabes (s), de la ecuación 2 se despeja la variable V_{sR} y se sustituye el valor de s =10 cm y s=20 cm según sea el caso.

$$V_{SR} = \frac{F_R A_V f_y d(\sin\theta + \cos\theta)}{s}$$

En la tabla 3 se presentan los valores de la resistencia teórica de la fuerza cortante que toma el concreto, así como la fuerza cortante de diseño que toma el acero de refuerzo en los diferentes modelos de las trabes de este trabajo.





Tabla 3 Resistencias teóricas a cortante de cada uno de los modelos, conforme a loestipulado en la NTC-DCEC-2017

Modelo	VcR (kg)	VsR (kg)	Vu=VcR+VsR (kg)
E1MA20	7186.28	13419.00	20605.28
E1MA10	7186.28	26838.00	34024.28
E2MI20	7186.28	5578.65	12764.93
E2MI10	7186.28	11157.30	18343.58

De acuerdo con las características del amado en la zona de tensión se calculó la resistencia a flexión de las diferentes trabes con la expresión 5.13 de las NTC-DCEC-2017.

$$M_{RF} = F_R A_s f_y d(1 - 0.59q)$$

$$q = \frac{p f_y}{f' c}$$

$$p = \frac{A_s}{bd}$$

$$6$$

Donde:

- F_R Es el factor de resistencia a flexión, para este trabajo se tomó igual a 1.0
- As Área del acero de refuerzo en tensión
- fy Resistencia de fluencia del acero de refuerzo
- *d* Peralte efectivo de la sección
- *b* Ancho de la sección
- f'c Resistencia especificada del concreto a compresión

En la siguiente tabla se muestran los valores de la resistencia a flexión de los modelos de las trabes, de acuerdo con sus características de armado a flexión, así como el valor del cortante asociada a la falla a flexión.

Modelo	M _{RF} (x 10⁵ kg-cm)	V _{MRF} (kg)
E1MA20	29.45	22650.60
E1MA10	29.45	22650.60
E2MI20	4.67	3589.78
E2MI10	4.67	3589.78

Tabla 4 Cortantes asociados a la falla por flexión

Comparando los resultados de las tablas de resistencias a cortante y flexión, se identifica que el modelo E1MA20 tendrá un comportamiento probablemente dominado por la falla a cortante, con una marcada tendencia de comportamiento frágil; los demás modelos se asumen que presentarán un comportamiento dominado por el mecanismo de falla por flexión. Independientemente del mecanismo de falla, con base en los valores mostrados, se identifica que el valor de carga máximo esperado sería del orden de 35 toneladas, aspecto que permite definir el dispositivo de aplicación de carga.





3.2 Desplazamiento esperado y longitudes de anclaje y desarrollo

El desplazamiento esperado en el extremo libre de cada uno de los modelos se determinó considerando que cada trabe tiene un extremo empotrado y libre en el otro, con una carga puntual concentrada en cualquier punto de la trabe. En la siguiente tabla se presentan los valores teóricos de los desplazamientos calculados en el extremo libre de la trabe, cuando la carga se aplica a 1.30 m de la longitud de la trabe medida a partir del paño de la columna:

Espécimen	Vu (kg)	lg (cm⁴)	Ec (kg/cm²)	Desplazamiento esperado en el extremo libre (cm)
E1MA20	20605.28	208333.33	221359.44	0.40
E1MA10	34024.28	208333.33	221359.44	0.66
E2MI20	12764.93	208333.33	221359.44	0.25
E2MI10	18343.58	208333.33	221359.44	0.36

Tabla 5	Valores	estimados	del de	splazamiento	en el	extremo	libre d	e las i	trabes
i alora e	1410100	000000000	uo. uo	opiazannonico		0/10/11/0			

Los desplazamientos calculados fueron considerando que: el valor del módulo de elástico (Ec) se determinó a través de la expresión propuesta en las NTC-DCEC-2017 para concretos clase 1 (ver ecuación 7), se estimó el valor del momento de inercia de la sección gruesa (Ig) y como valor de la carga el valor de la resistencia a cortante teórico (VU).

$$E_c = 14000\sqrt{f'c}$$

7

3.3 Cálculo de la longitud de desarrollo

Para revisar la posibilidad de tener problemas de comportamiento en la zona de articulación plástica de los modelos, se calculó la mínima distancia que requieren las barras de acero de refuerzo longitudinal de las trabes de los modelos de este reporte, para que puedan transferir por adherencia la demanda de esfuerzos por flexión al concreto, y no afectar el comportamiento de las barras para la prueba del modelo colocado en el extremo opuesto de la columna. Para lo anterior se aplica la fórmula 6.1.1 de las NTC-DCEC-2017.

$$L_{db} = \frac{a_s f_y}{3(c + K_{tr})\sqrt{f'c}} \ge 0.11 \frac{d_b f_y}{\sqrt{f'c}}$$

$$K_{tr} = \frac{A_{tr} f_{yv}}{100 \text{ s } n}$$
9

Donde:

- Área transversal de la barra a_s
- Diámetro nominal de la barra $d_{\rm b}$
- Resistencia de fluencia del acero de refuerzo fy
- Índice de refuerzo transversal, que siguiendo lo dispuesto en las normas vigente, *k*_{tr} se permite suponer el valor de Ktr=0, a pesar de la presencia de acero de refuerzo transversal





- c Separación o recubrimiento, que siguiendo lo dispuesto en las en las normas vigentes, se usó el menor de los siguientes valores: 1) distancia del centro de la barra a la superficie de concreto más próxima; 2) la mitad de la separación entre centros de barras.
- f'c Resistencia especificada del concreto a compresión

En la siguiente tabla se presentan los valores de las longitudes de desarrollo para el acero conforme al diámetro nominal del acero de refuerzo que se utilizó en los modelos.

# varilla	d₀(mm)	as (cm²)	$\frac{a_s f_y}{3(c+K_{tr})\sqrt{f'c}}$ (cm)	$0.11rac{d_bf_y}{\sqrt{f'c}}$ (cm)
4	12.7	1.27	34.76	33.11
6	19.1	2.87	65.19	55.80

Tabla 6 Valores calculados de longitud de desarrollo

Se observa que la longitud de desarrollo mínima, estimada con las ecuaciones propuestas por las NTC-DCEC-2017, resultó ser mayor que los 30 cm (300 mm) tal y como lo sugiere la sección 6.1.2.1 de las NTC-DCEC-2017. No obstante, se acepta que la relación entre la dimensión de la columna y el requerimiento de longitud de desarrollo es suficiente para que no se presente un efecto en el comportamiento del acero de refuerzo durante la prueba del segundo modelo del mismo espécimen.

Se concluye que el tamaño de las columnas de cada uno de los especímenes es adecuado ya que supera el valor de la longitud de desarrollo teórico o estimado.





4 DISPOSITIVO DE APLICACIÓN DE CARGA E INSTRUMENTACIÓN Y MONTAJE

4.1 Dispositivos de instrumentación y aplicación de carga

El dispositivo de aplicación de carga fue diseñado de modo que no se tuviera que emplear el muro de reacción del LEG-CENAPRED, para lo cual, como ya se mencionó, se pensó en un subensamble, tipo unión trabe columna, con un panel de unión de gran robustez, lo cual se logró con la columna central de sección transversal de 90 x 90 cm. Usando parte de los elementos metálicos con los que se cuenta en el laboratorio, se configuró un marco que contribuyera fijar la columna o dado central contra el piso de reacción del LEG, esta condición permitió lograr el estado de empotramiento que se deseaba para probar a las trabes como elementos en cantiléver con carga en el extremo. A continuación, se presenta un resumen breve de las características del marco y dispositivo de aplicación de carga en el espécimen y los modelos.

4.2 Dispositivo de aplicación de carga

El marco de aplicación de carga está formado por elementos de acero estructural, con cuatro columnas formando un marco tridimensional de un claro en cada sentido, y con tres trabes armadas horizontales que permitieron colocar el gato de aplicación de carga axial en la columna-dado para fijación al piso de reacción, así como los gatos para aplicación de la carga cíclica reversible en los modelos. En la figura 6 se muestra la configuración general del dispositivo para aplicación de carga. La carga axial en la columna-dado se aplicó con un gato de 400 t de capacidad máxima, y los gatos empleados para aplicar las cargas cíclicas reversibles en los extremos de las trabes, son de 50 t de capacidad máxima. Las cargas de prueba en las trabes se aplicaron a 20 cm del extremo libre (figura 6.b), por medio de dos gatos hidráulicos, por lo que se preparó un dispositivo de carga sobre el piso de reacción del LEG-CENAPRED, como se muestra en las figuras 6.b y 6.c.

4.3 Montaje

El montaje del dado de cada espécimen al piso de reacción del LEG del CENAPRED, de acuerdo con los esquemas de las figuras 6, fue mediante cuatro barras potenzadas o barras de alta resistencia. A cada barra se le aplicó una fuerza de tensado de 50 t.

Ente el piso y el espécimen se colocó mortero a base de cemento-arena para lograr una superficie plana entre el piso de reacción y el bloquen o columna del espécimen a ensayar.

4.4 Instrumentación Interna

Se colocaron galgas extensométricas en el acero de refuerzo, comúnmente conocidos como strain-gauges (SG, por su denominación en inglés), los cuales son dispositivos cuya resistencia eléctrica varía de forma proporcional a la deformación a la que se someterá el acero de refuerzo durante la historia de cargas.







Figura 6 Marco de carga a) ubicación del marco de la carga en el LEG; b) vista lateral del arreglo del marco de carga; c) vista en elevación del arreglo del marco de carga





La colocación de éstos SG tiene la finalidad de identificar el estado de esfuerzos en el acero de refuerzo y, a partir de ello, poder definir condiciones de comportamiento asociado a mecanismos de falla; por ejemplo, si el acero de refuerzo longitudinal en la sección crítica, donde el momento es máximo, fluye antes que el acero de refuerzo de los estribos en cualquier parte de la trabe, el mecanismo de falla podría definirse como dominado por flexión; contrario, si los SG de los estribos presentan incursión en la fluencia antes que aquellos colocados en las barras de refuerzo longitudinal, el mecanismo de falla puede ser dominado por cortante.

En las figuras 7 y 8 se muestra la ubicación de los strain-gauges en cada uno de los especímenes a ensayar. Adicionalmente, en la figura 9 se muestra un SG adherido a la barra, donde se identifica la preparación en la misma, rebajando la corrugación y puliendo la superficie donde se pegó la galga.



Figura 7 Distribucion de la intrumentacion interna de los modelos E1MA20 y E1MA10





Tabla 7 Identificación y localización de las galgas extensométricas (SG) para los modelosE1MA20 y E1MA10

Número	Descripción		
1	SG-1	Acero longitudinal trabe	
2	SG-2	Acero longitudinal trabe	
3	SG-3	Acero longitudinal trabe	
4	SG-4	Acero longitudinal trabe	
5	SG-5	Acero longitudinal trabe	
6	SG-6	Acero longitudinal trabe	
7	SG-7	Acero longitudinal trabe	
8	SG-8	Acero longitudinal trabe	
9	SG-9	Acero longitudinal trabe	
10	SG-10	Acero longitudinal columna	
11	SG-11	Acero longitudinal columna	
12	SG-12	Acero longitudinal columna	
13	SG-13	Acero longitudinal trabe	
14	SG-14	Acero longitudinal trabe	
15	SG-15	Acero longitudinal trabe	
16	SG-16	Acero longitudinal trabe	
17	SG-17	Acero longitudinal trabe	
18	SG-18	Acero longitudinal trabe	
19	SG-19	Acero longitudinal trabe	
20	SG-20	Acero longitudinal trabe	
21	SG-21	Acero transversal	
22	SG-22	Acero transversal	
23	SG-23	Acero transversal	
24	SG-24	Acero transversal	
25	SG-25	Acero transversal	
26	SG-26	Acero transversal	



Figura 8 Distribucion de la intrumentacion interna de los modelos E2MI20 y E2MI10





Tabla 8 Identificación y localización de las galgas extensométricas (SG) para los modelosE2MI20 y E2MI10

Número		Descripción
1	SG-1	Acero longitudinal trabe
2	SG-2	Acero longitudinal trabe
3	SG-3	Acero longitudinal trabe
4	SG-4	Acero longitudinal trabe
5	SG-5	Acero longitudinal trabe
6	SG-6	Acero longitudinal trabe
7	SG-7	Acero longitudinal trabe
8	SG-8	Acero longitudinal trabe
9	SG-9	Acero longitudinal trabe
10	SG-10	Acero longitudinal columna
11	SG-11	Acero longitudinal columna
12	SG-12	Acero longitudinal columna
13	SG-13	Acero longitudinal trabe
14	SG-14	Acero longitudinal trabe
15	SG-15	Acero longitudinal trabe
16	SG-16	Acero longitudinal trabe
17	SG-17	Acero longitudinal trabe
18	SG-18	Acero longitudinal trabe
19	SG-19	Acero longitudinal trabe
20	SG-20	Acero longitudinal trabe
21	SG-21	Acero transversal
22	SG-22	Acero transversal
23	SG-23	Acero transversal
24	SG-24	Acero transversal
25	SG-25	Acero transversal
26	SG-26	Acero transversal
27	SG-27	Acero transversal



Figura 9 Colocación de las galgas extensiométricas, o straing-gauges (SG)





4.5 Instrumentación Externa

Además de revisar el estado de esfuerzos en el acero de refuerzo, para lo cual es indispensable la instrumentación interna, con el propósito de identificar la configuración deformada de los modelos y, a partir de ella corroborar el mecanismo de falla dominante, se colocan instrumentos que permitan identificar los desplazamientos de puntos predeterminados de los modelos respecto de puntos fijos de referencia, en este caso el piso de reacción y la columna. Para medir estos desplazamientos de los diferentes puntos del elemento debido a la aplicación de la carga, se recurrió a la instalación de transductores de desplazamiento.

La ubicación de los transductores de desplazamiento para todo el espécimen se muestra en la figura 10. Los transductores verticales en la parte superior de la columna son emplearon para verificar el nivel de empotramiento o fijación de la columna con respecto al piso de reacción, además de revisar si el elemento columna se desplaza verticalmente o rota durante la aplicación de la carga en el extremo libre de las trabes.

EL uso de los transductores verticales fue para medir el desplazamiento en columna y deflexión de la trabe al momento de la aplicación del patrón de cargas y el resto de los transductores para medir el comportamiento a flexión y cortante la trabe.



Figura 10 Distribución de la instrumentación externa

En la siguiente tabla se mencionan los instrumentos de medición externos.





Tabla 9 Identificación y localización de transductores de desplazamiento para todos losmodelos

Número	Nombre del canal	Descripción
4	0 50 1	Celda de carga para medir el valor de la carga aplicada
1	C-50-1	en el sentido positivo (+)
2	C 50 2	Celda de carga para medir el valor de la carga aplicada
2	0-30-2	en el sentido negativo (-)
3	T1-200-1	Medir el desplazamiento de la trabe
4	T2-200-2	Medir el desplazamiento de la trabe
5	C1-50-1	Medir el desplazamiento de la columna
6	C2-50-2	Medir el desplazamiento de la columna
7	D-25-1	Medir el comportamiento a flexión y cortante la trabe
8	D-25-2	Medir el comportamiento a flexión y cortante la trabe
9	D-25-3	Medir el comportamiento a flexión y cortante la trabe
10	D-25-4	Medir el comportamiento a flexión y cortante la trabe
11	D-25-5	Medir el comportamiento a flexión y cortante la trabe
12	D-25-6	Medir el comportamiento a flexión y cortante la trabe
13	D-25-7	Medir el comportamiento a flexión y cortante la trabe
14	D-25-8	Medir el comportamiento a flexión y cortante la trabe
15	D-25-9	Medir el comportamiento a flexión y cortante la trabe
16	D-25-10	Medir el comportamiento a flexión y cortante la trabe
17	D-25-11	Medir el comportamiento a flexión y cortante la trabe
18	D-25-12	Medir el comportamiento a flexión y cortante la trabe
19	D-10-13	Medir el comportamiento a flexión y cortante la trabe
20	D-10-14	Medir el comportamiento a flexión y cortante la trabe
21	D-10-15	Medir el comportamiento a flexión y cortante la trabe
22	D-10-16	Medir el comportamiento a flexión y cortante la trabe
23	C-300	Celda de cargas para el valor de la carga aplicada en la columna

En la figura 11 se muestran vistas de la distribución de los transductores en los modelos, antes de la ejecución de la prueba.

4.6 Patrón de carga

Con el propósito de obtener el comportamiento de las trabes ante la acción de cargas cíclicas, y tomando lo indicado en el ACI (ACI 374.2R-13), se propuso un protocolo estándar progresivamente creciente para lograr grandes desplazamientos y que además fuera posible ser controlada por los equipos con los que cuenta el LEG-CENAPRED. En la figura 12 se muestra la historia de carga y desplazamientos usado para el desarrollo de las pruebas de los cuatro modelos.

La forma en que se definió el modelo de carga fue a través de una estimación aproximada de la resistencia elástica de la trabe E1MA10 asociada al desplazamiento evaluado en el extremo libre de la trabe. La selección del valor pico del primer ciclo fue de 0.5 T y posteriormente se fueron incrementando después de cada dos ciclos hasta alcanzar el valor de la carga asociada de fluencia. Después para la etapa de post-fluencia; la prueba continua a través del parámetro de control de desplazamientos, por lo que el primer ciclo en esta





etapa fue de 7.5 mm en el extremo libre y posteriormente se incrementó después de dos ciclos hasta alcanzar un valor de 75 mm.



Figura 11 Instrumentación externa común a todos los modelos.



Figura 12 Patrón de carga aplicado a cada uno de los especímenes, en términos de carga





El patrón o historia de carga propuesta se caracteriza por tener una repetición por cada incremento, así como de incorporar ciclos pequeños después de los ciclos con grandes amplitudes. Es importante mencionar que, por el tipo de patrón propuesto para la prueba, consiste en ciclos reversibles con amplitudes progresivamente crecientes, y que se denominan protocolos estándar (Matthew y Bruce 2016); que en comparación con patrones de carga reales como son los sismos, pueden conducir a respuestas conservadoras del comportamiento sísmico de los elementos (referencia).

Para la aplicación el patrón de carga sugerido a través de los equipos disponibles en el laboratorio, en la figura 13 se muestra esquemáticamente el primer ciclo del patrón de cargas. La parte superior del ciclo está definida por los puntos AB y BC. La etapa AB representa la aplicación manual de la carga con el gato superior de 50 t hasta el valor de desplazamiento o de carga propuesto. La Trayectoria BC es la descarga y poder aplicar la segunda parte del ciclo la cual está definida por los puntos CD y DE. La trayectoria CD representa la aplicación manual de la carga hasta el valor de desplazamiento o de carga propuesto. La trayectoria DE representa la aplicación manual de la carga hasta el valor de desplazamiento o de carga propuesto. La trayectoria DE representa la descarga y así se logra completar el ciclo.



Figura 13 Proceso de aplicación del patrón de carga a cada modelo de trabe.





5 COMPORTAMIENTO GENERAL DE LOS MODELOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Comportamiento general de los modelos

Durante el desarrollo de la prueba, en cada una de las trabes, se registraron la aparición de las grietas verticales y grietas diagonales en cada sentido del ciclo histerético, como producto de la aplicación del patrón de carga sugerido en este trabajo. A continuación, se presenta, de manera resumida, el comportamiento de cada uno de los modelos.

Ciclo número 7, se presentan grietas en la unión trabe columna. Se registró una carga de +3 T y con desplazamiento en el extremo libre de 0.7 mm. La prueba es controlada por el parámetro de carga. Ciclo número 8, se presenta grieta aparentemente vertical sobre la trabe. Se registró una carga de +3 T y con un desplazamiento en el extremo libre de 0.97 mm. La prueba es controlada por el parámetro de carga. Ciclo número 14, siguen apareciendo grietas verticales y 1 algunas han incrementado su longitud. Se registró una carga de -7 T y con un desplazamiento en el extremo libre de 2.38 mm. La prueba es controlada por el parámetro de carga. Ciclo número 15, siguen apareciendo grietas verticales y algunas han incrementado su longitud, así como la aparición de la primera grieta inclinada. Se registró una carga de +9 T y con un desplazamiento en el extremo libre de 3.94 mm. La prueba es controlada por el parámetro de carga.

Modelo E1MA10













Modelo E1MA20



















Modelo E2MI10









Modelo E2MI20



Ciclo 3, aparece la primera grieta vertical a una distancia de medio peralte de la unión trabe columna. Se registró una carga de +1 T y un desplazamiento medido en el extremo de 2.0 mm. La prueba es controlada con el parámetro de carga. La prueba es controlada por carga.







Como se pudo ver en las descripciones del comportamiento de cada una de las trabes (modelo E1MA10, E1MA20, E2MI10 y M2MI20), el incremento en longitud y ancho de grietas fue paulatinamente hasta alcanzar altos niveles de daño, ocasionando la reducción del tamaño de la sección de confinamiento, además de no poder soportar más carga.





5.2 Análisis de resultados

Relaciones carga - desplazamiento

Con el propósito de revisar la influencia de las variables consideradas en el estudio, cuantías de refuerzo longitudinal y cuantías de refuerzo transversal, las cuales tienen un mayor efecto en el intervalo de comportamiento inelástico de los elementos de concreto reforzado, para el análisis de la información registrada durante la prueba de los diferentes modelos, se ha descartado la información correspondiente a los ciclos pequeños que se localizan después de los ciclos de gran amplitud.

En las figuras 14 y 15 se muestran las relaciones carga – distorsión (curvas histeréticas) de cada trabe, en las cuales se presenta en el eje vertical la carga aplicada, medida en toneladas (T), y en el eje horizontal, distorsión en el extremo libre de la trabe. La medida de distorsión se obtiene de dividir el desplazamiento medido en el extremo libre dividido entre la longitud de la trabe.



Figura 14 Relaciones carga – distorsión de los modelos; a) E1MA10; b) E1MA20





De la respuesta histerética de la trabe E1MA10 muestra que tiene una resistencia mayor a flexión, pero una resistencia inferior a cortante, mientras que la de la trabe E1MA20 tiene una resistencia mayor a cortante y a flexión.

La respuesta histerética que desarrollan las trabe E1MA10 y E2MI10 es que se mantienen una resistencia estable estables hasta que alcanza una distorsión de aproximadamente del 3.0%, y empieza a degradarse; en comparación las trabes E1MA20 y E2MI20 que presentan una degradación de resistencia en cada ciclo y severa después de lograr una distorsión de aproximadamente del 2.0% está empieza a degradar su rigidez y resistencia de manera severa.

De manera general se observa que en cada respuesta histerética, se presentan las diferentes capacidades que tienen los diferentes diseños de las trabes, la disipación de energía ante la acción cíclica de las cargas, así como la perdida de propiedades, la cuales atribuyen a las diferentes cuantías de acero de refuerzo longitudinal y transversal.



Figura 15 Relaciones carga – desplazamiento de los modelos: a) E2MI10; ab) E2MI20.





En las siguientes figuras (16 a 19) se muestran las cuervas envolventes cíclicas, las cuales son utilizadas en algunos programas de diseño estructural, para el modelado analítico de elementos de concreto reforzado.

Estas curvas relacionan la carga con la distorsión y se obtienen a través de la unión de los valores pico, asociadas al valor de la distorsión máxima

En la siguiente figura se muestran los valores pico (distorsión máxima alcanzada), en cada uno de los ciclos hiseterético.



Figura 16 Respuesta histerética E1MA10



Figura 17 Respuesta histerética del modelo E1MA20







Figura 18 Respuesta histerética del modelo E2MI10



Figura 19 Respuesta histerética del modelo E2MI20

Curvas envolventes

En las figuras 20 a 23 se presentan las curvas envolventes para los dos cuadrantes de las relaciones carga–distorsión, para el cuadrante de cargas y distorsión positivo (representadas con el color azul) y para el cuadrante de carga y distorsión negativo (representadas con el color rojo), las cuales se lograron de la unión de los valores pico máximo de cada ciclo. En las figuras se identifican la curva envolvente cíclica con línea segmentada, la cual representa la unión de los valores picos de cada ciclo, y con línea continua la curva idealizada de la envolvente cíclica.



Carga (T)



Para lograr conocer las curvas envolventes, las series de puntos que definen a los picos de ciclo se ajustaron a un modelo trilineal a través de igualar el área bajo la curva envolvente con el área de la curva propuesta.



Figura 21 Curva envolvente del modelo E1MA20

Las figuras anteriores presentan las curvas idealizadas de las curvas envolventes cíclicas logradas con el patrón de cargas aplicado en cada uno de los modelos.

Con base en las curvas envolventes para cada modelo, en la tabla 9 se presentan los valores de rigidez elástica equivalente (Ke), obtenida a partir del valor de la fuerza de fluencia (Vy) y distorsión correspondiente (δ y); también se presenta el valor del cortante (Vmax) y distorsión (δ max) máximo, así como los valores últimos de distorsión (δ u) y cortante (Vu).





Otra variable importante que se utiliza con el valor del máximo desplazamiento es la ductilidad de desplazamiento (μ), la cual se define como el cociente del desplazamiento de falla entre el desplazamiento de fluencia.





En la tabla 10 se resumen los valores característicos de los parámetros que definen las curvas envolventes de los cuatro modelos de vigas analizadas en este trabajo. Como era de esperarse los valores de las ductilidades globales de desplazamiento a nivel elemento resultaron considerablemente mayores para los dos modelos donde se consideró la cuantía en la vecindad de la mínima, aunque se esperaban diferencias mayores a una relación dos a uno. Por otro lado, es de llamar la atención que, independientemente de las cuantías de refuerzo longitudinal, la ductilidad de curvatura, rotación y, por lo tanto, desplazamiento de un elemento lineal de concreto reforzado, depende fuertemente de la cuantía de acero de refuerzo transversal, aspecto que se puede observar para los modelos de cuantía mínima,





tanto longitudinal, como transversal, la ductilidad no difiere significativamente de los modelos en los que se usó refuerzo longitudinal en la vecindad de la cuantía máxima.

Modelo	Dirección	Vy	δγ	Ke	Vmáx	δmáx	Vu	би	μ
EAMAAO	+	24.65	0.009	1.81	28.61	0.033	13.66	0.048	5.3
LIMATO	-	28.57	0.011	1.81	29.10	0.034	9.35	0.050	4.5
E1MA20	+	22.78	0.007	2.38	25.00	0.027	4.48	0.033	4.7
	-	21.78	0.006	2.38	25.93	0.019	8.14	0.027	4.5
E2MI10	+	4.30	0.005	0.62	5.35	0.033	4.36	0.050	10
LZIVIIIIO	-	4.80	0.005	0.62	5.65	0.052	5.65	0.051	10.2
E2MI20	+	3.93	0.005	0.60	4.63	0.027	2.63	0.033	6.6
	-	4.58	0.005	0.60	5.37	0.029	4.75	0.035	7.0

Tabla 10 Valores característicos de las curvas envolventes cíclicas idealizadas.

Las unidades de la fuerza cortante son toneladas.

Relación energía disipada y pérdida de rigidez

Con la información obtenida de las cargas cíclicas y con el propósito de obtener parámetros que puedan ser utilizados en la práctica para el modelado de elementos estructurales, así como para determinar la salud de los elementos ante la acción de cargas cíclicas como son los sismos, se ha considerado analizar la energía disipada y la degradación de la rigidez.

Energía disipada

Las trabes disipan energía, a través de la respuesta histerética (carga-desplazamiento), la cual es proporcional al área contenida dentro del ciclo histerético. Como medida de comparación entre los diferentes comportamientos observados entre los diferentes diseños, se estimará la energía disipada acumulada, como el área acumulada de cada ciclo histerético y se graficará respecto a la distorsión en el extremo de la trabe.

En la figura 24 se muestran las gráficas de energía acumulada respecto a la distorsión. En ellas se puede apreciar que la energía aumenta conforme aumenta la distorsión. De la misma figura se logra observar que las trabes E2MI10 y E2MI20 son las que presentaron una menor cantidad de energía disipada.

Pérdida de rigidez

Con la curva envolvente idealizada de cada uno de los resultados de la carga cíclica, se obtuvo la rigidez elástica y como otra medida adicional se estimó la degradación de la rigidez entre un ciclo y otro, para cada uno de los especímenes ensayados. La degradación de la rigidez se evaluó como el cociente entre la rigidez pico a pico (la pendiente percibida entre el desplazamiento máximo y mínimo de cada ciclo histerético), y la rigidez elástica.

En la figura 25 se muestra la relación de la pérdida de rigidez pico a pico respecto a la distorsión.







Figura 24 Curva de energía disipada – distorsión



De la gráfica de la figura 25 se logra observar que las estructuras con presentaron una mayor degradación de la rigidez son las trabes E2MI10 y E2MI20.





6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Los modelos de trabes E1MA10 y E1MA20, con cuantías de refuerzo longitudinal en la vecindad de la máxima permisible por el reglamento de construcción, alcanzan una resistencia a la fluencia aproximadamente cinco veces mayor que los especímenes diseñados para una cuantía de acero longitudinal mínima (E2MI10 y E2MI20).

Las vigas con barras de acero de refuerzo transversal con separación de s = 10 cm (s=b/2), logran niveles de resistencia mayor que las correspondientes a los modelos con acero transversal distribuido a una separación mayor, s=20 cm (s=b). Como ya se mencionó, en el procedimiento para determinar la ductilidad de curvatura – rotación – desplazamiento de elementos lineales, generalmente se considera a la cuantía de refuerzo longitudinal como elemento base, no obstante, independientemente de que el fenómeno de confinamiento generado por la presencia del acero de refuerzo transversal no se pueda corroborar fehacientemente en elementos viga como los del presente estudio, es evidente que la cuantía de refuerzo transversal es un parámetro que debe ser estudiado en relación con la influencia que tiene en la ductilidad de elementos lineales tipo viga.

El modelo E2MI10 desarrolló una ductilidad por desplazamiento mayor en comparación con el modelo E2MA10, pero con menor capacidad para disipar energía.

Como era de esperarse, la respuesta de los cuatro modelos, tanto en la parte de ciclos positivos, como negativos, se puede considerar casi simétrica. Lo anterior puede considerarse como representativo de que tanto el procedimiento de construcción de los modelos, como los dispositivos de aplicación de carga y medición de desplazamientos globales fueron adecuadamente diseñados e instalados. Además, como también se reporta en la bitácora de prueba, no se presentó ningún evento anómalo que pudiera influir en un desempeño asimétrico de los modelos.

Los resultados de los cuatro modelos indican la influencia de las cuantías del acero longitudinal y transversal, así como las características de la distribución del acero de refuerzo transversal en relación con el longitudinal. El efecto es tanto en la resistencia a flexión – cortante, como en la capacidad a deformación, siendo evidente que la combinación de cuantías de refuerzo longitudinal bajas y de refuerzo transversal altas, generalmente permitirán contar con elementos de gran capacidad a deformación, logrando un comportamiento que evidencie la posible ocurrencia de un fenómeno no deseado.

De acuerdo con la curva idealizada de cada envolvente cíclica de los modelos, se puede identificar que la distorsión ultima alcanzada por los especímenes, en todos los casos, superó a la distorsión permisible establecida en la normatividad vigente, para estructuras de concreto de ductilidad baja. Únicamente para el modelo construido con cuantía de refuerzo longitudinal alta (baja ductilidad teórica por flexión) y cuantía de refuerzo transversal baja (baja ductilidad teórica por cortante), no se logró superar el valor de





distorsión que la norma técnica de concreto de la Ciudad de México permite para elementos componentes de estructuras de concreto con alta ductilidad (Q=4), que corresponde a un valor de 0.03; alcanzando un nivel de distorsión máximo de 0.02, correspondiente a un diseño de sistema con ductilidad media (Q=3). Lo anterior, a la luz de la información obtenida en este estudio, permite mencionar que las propuestas planteadas para diseño de sistemas dúctiles de concreto en la normatividad de la ciudad, tienen un nivel de seguridad adecuado.

Finalmente, el desplazamiento esperado en los modelos se determinó en función de sus características físicas y usando los procedimientos de cálculo existente; no obstante, aun presentándose degradación de la rigidez ante ciclos sucesivos de carga, el desplazamiento logrado durante la prueba resultó mayor.

6.2 Recomendaciones

Independientemente de que la instrumentación fue concebida para poder calcular el desplazamiento global y las contribuciones por flexión y cortante, es claro que para determinar con mayor certidumbre la contribución de la rotación en la zona de la articulación plástica necesariamente se deben colocar instrumentos en las fibras superior e inferior de las vigas.

Diseñar trabes con diferentes niveles de resistencia de concreto, así como con diferentes niveles de ductilidad y someterlas a pruebas cíclicas reversibles.

Es altamente recomendable ser prudente en relación con las conclusiones del estudio, tomando en cuenta que las pruebas fueron cuasi-estáticas. La velocidad de aplicación de carga es un factor que impacta directamente en la rigidez y resistencia de los materiales y los elementos, por lo que resulta necesario pensar en la posibilidad de realizar pruebas con equipos dinámicos, para obtener parámetros de certidumbre para el gran universo de información que se tiene resultado de estudios sustentados en pruebas cuasi-estáticas.

A partir de la información obtenida en las pruebas, plantear un modelo de comportamiento ante cargas cíclicas reversibles, que incluya la posibilidad de considerar la degradación de rigidez, degradación de resistencia y, sobre todo, plantear expresiones que permitan relacionar ambos parámetros con las características geométricas de los elementos y mecánicas de los materiales componentes.

Con base en lo mencionado en el párrafo anterior, se pretende calibrar un modelo histerético, obtenido con los resultados de las pruebas, para su incorporación en algún programa de análisis y diseño. Lo anterior se considera importante por el advenimiento de la propuesta de uso de herramientas de análisis no lineal para verificar la bondad de los resultados de los procesos de diseño tradicionalmente incluidos en la normatividad.





Anexo

A1.- Proceso de construcción de los especímenes

Preparación del acero de refuerzo e instrumentación interna

Una vez realizado los cálculos de resistencia y planeado la instrumentación interna y externa, el siguiente paso fue la construcción de los diferentes modelos. Las figuras A1 a A13 presentan el procedimiento de construcción de los especímenes.



Figura A1 Enderezado del acero de refuerzo transversal (alambrón)



Figura A2 Habilitado manual del acero de refuerzo transversal (varilla del #3)







Figura A3 Armado de la columna



Figura A4 Armado final de una de las columnas

Para la instalación de las galgas extensométricas, fue necesario prepara las superficies de las barras por medio de la eliminación de la corrugación del acero de refuerzo, pulido y limpieza de la zona en donde se colocarían las galgas, lo anterior para logar una superficie lisa y libre de algún agente que no permita la correcta adherencia y, por lo tanto, no lograr una medición adecuada.

La herramienta y suplementos que se utilizaron para la preparación de la superficie de las varillas que se instrumentaron, se presenta en la figura A5.







Figura A5 Material empleado para pulir la varilla en donde se colocarán las galgas extensométricas: 1.- bastarda plana picado doble; 2.- lija de esmeril grano 120; 3.- lija de agua 2500; 4.- lija de agua 3000



Figura A6 Proceso de pulido de la varilla de acero de refuerzo





Con la herramienta conocida como bastarda se eliminaron las partes más gruesas, como las corrugaciones de las varillas y con la combinación de las diferentes lijas se logra el pulido de la zona en donde se instalarían las galgas extensométricas.



Figura A7 Proceso de pegado de galga extensometrica al acero de refuerzo

Para la instalación de las galgas extensométricas se limpió perfectamente con alcohol la superficie, para posteriormente colocar el adhesivo. A la galga extensométrica se le colocó catalizador para un mejor pegado.





Después de adherir las galgas al acero de refuerzo, se colocó una protección para evitar ser dañadas o desconectarlas por posibles golpes de los materiales pétreos o del vibrador durante el proceso de colado.

En la figura A8 se muestra el proceso de colocación de la cubierta protectora mencionada en el párrafo anterior.



Figura A8 Aplicación de recina para la protección de la galga extensometrica (SG)





La protección a las galgas consiste en cubrir con cinta aislante, gasa y por último una capa de resina.

A2.- Cimbrado

Para la construcción de los moldes (cimbra) que contendrán y confinarán al concreto fresco hasta su endurecimiento, se utilizó madera de pino de ½" de espesor, polines de 4" y tablones. Como sujetadores se recurrió al uso de alambrón y padecería de varilla de acero de refuerzo de 1" de diámetro, así como de clavos para madera.



Figura A9 Esquema del cimbrado para cada uno de los especímenes de este trabajo



Figura A10 Vista general del cimbrado de uno de los especímenes

Antes de la colocación del acero de refuerzo de los modelos dentro de la cimbra, a ésta se le aplicó material desmoldante en varias capas para lograr un mejor y fácil descimbrado.





A3.- Colado

El concreto que se utilizó en la fabricación de los especímenes fue elaborado en planta, por lo que se puede clasificar como un concreto estructural de clase 1 conforme a lo dispuesto en las NTC-DCEC-2017.

Las características que se le solicitaron a la planta fuero: tamaño máximo del agregado grueso de 20 mm, revenimiento de 14 cm y una resistencia la compresión de 250 kg/cm2. Lo anterior para poder tener una mezcla trabajable.

Como parte de los trabajos que se deben de realizar en cualquier colado de elementos de concreto previo al vaciado en el molde (colado), se tomó una muestra representativa para realizar la prueba de revenimiento de la mezcla, así como también se llevaron a cabo los trabajos de recolección de probetas cilíndricas de 15x30 cm para que, en estado endurecido, se pueda medir la resistencia a la compresión.

En las figuras A11 a A13 se presenta la obtención de la muestra representativa, para que en estado fresco se mida el revenimiento de la mezcla, así como el llenado de los cilindros para que en estado endurecido se realice la prueba a compresión.



Figura A11 Obtención del revenimiento

El valor del revenimiento medido fue de 18 cm, valor que resulta ser mayor a los 14 cm solicitados a la planta. Por el valor obtenido en la prueba se consideró no rechazar la mezcla ya que posiblemente se debió a los posibles errores cometidos al momento de la realización de la prueba.

Por el espacio disponible dentro del Laboratorio de Estructuras Grandes del CENAPRED, uno de los especímenes se logró colar directamente del camión, para el segundo espécimen el colado se realizó con tolva, como se ve en la figura A13.







Figura A12 Obtención de muestras de concreto



Figura A13 Proceso de vaciado en los moldes: a) directo del camión; b) con tolva

A4.- Dimensiones finales de los elementos

En este apartado se reportan las dimensiones reales en centímetros de cada una de las trabes ensayadas, medidas en el centro y en los extremos de cada modelo, como se muestra en la tabla A1.





labla A1 Dimensiones de las trabes	s, medidas en el centro	y extremos de cada trabe
------------------------------------	-------------------------	--------------------------

Espécimen	bxh	bxh	bxh	Espécimen	bxh	bxh	bxh
E1MA10	20x50.5	21.4x50.3	19.7x50	E1MA20	19.4x50.1	20.5x50	20x50.8
E2MI10	19.8x50	20.6x50.4	20x50	E2MI20	20x50	19.9x50	20x50.5
bxh	bxh	b	xh	bxh		bxh	bx

A5.- Habilitado del marco de prueba

En la figura A14 se muestra el marco de carga construido sobre el piso de reacción del Laboratorio de Estructuras Grandes del CENAPRED, los gatos que aplican la carga y el espécimen momentos antes de iniciar la prueba.

Adicionalmente del potenzado de las cuatro barras de prezfuerzo que se localizan en la columna de concreto del espécimen, se aplicó una carga de 100 t, la cual se trató de mantener durante el desarrollo de la prueba. Lo anterior con el propósito de garantizar que la columna no rotará por el efecto de la aplicación de la carga en los extremos libres de la trabe.



Figura A14 Espécimen colocado en el marco de carga, antes de la prueba





A6.- Ensaye de materiales

Se obtuvieron muestras de acero de refuerzo de aproximadamente de 60 cm de longitud de cada una de las varillas de acero de refuerzo con las que se construyeron los especímenes de este trabajo. Cada uno de los especímenes de ensayaron a tensión hasta la ruptura, obteniendo los valores de deformación y esfuerzo asociados a la fluencia y fractura, en la tabla A2 se presentan los resultados obtenidos de las pruebas.



Figura A15 Probetas de 60 cm de varilla de refuerzo del número 3



Figura A16 Ensaye en maquina universal del LEG - CENAPRED



Figura A17 Acero de refuerzo después de ser ensayado en la maquina universal





Ø Varilla (mm)	# Varilla	Área (cm²)	Longitud inicial (cm)	Longitud final (cm)	Fuerza de fluencia (Kg)	Fuerza de ruptura (Kg)	Resistencia fluencia (kg/cm²)	Resistencia última (kg/cm²)
9.5	3	0.71	58.80	65.50	3220	5020	4535.21	7070.42
9.5	3	0.71	59.20	65.90	3260	5060	4591.55	7126.76
9.5	3	0.71	60.00	66.20	3300	5300	4647.89	7464.79
9.5	3	0.71	60.00	65.80	3260	4950	4591.55	6971.83
9.5	3	0.71	60.40	66.10	3180	4970	4478.87	7000.00
9.5	3	0.71	59.70	65.90	3420	5210	4816.90	7338.03
9.5	3	0.71	59.70	65.60	3420	5220	4816.90	7352.11
9.5	3	0.71	60.20	65.80	3110	4940	4380.28	6957.75
9.5	3	0.71	59.90	65.20	3130	4980	4408.45	7014.08
9.5	3	0.71	59.90	65.20	3330	5200	4690.14	7323.94
9.5	3	0.71	60.15	65.90	3430	5220	4830.99	7352.11
9.5	3	0.71	60.30	66.20	3340	5220	4704.23	7352.11
9.5	3	0.71	60.10	66.70	3390	5210	4774.65	7338.03
9.5	3	0.71	60.20	66.05	3380	5240	4760.56	7380.28
12.7	4	1.27	60.5	62.3	4390	8800	3456.69	6929.13
12.7	4	1.27	59.3	64.4	6020	8900	4740.16	7007.87
12.7	4	1.27	60.3	63.8	5500	8820	4330.71	6944.88
19.1	6	2.87	61	66.5	12250	20350	4268.29	7090.59
19.1	6	2.87	61	68.7	12900	19300	4494.77	6724.74
19.1	6	2.87	61	66.7	12430	20100	4331.01	7003.48
19.1	6	2.87	60	65.8	13030	19550	4540.07	6811.85
19.1	6	2.87	60	66.5	12500	19250	4355.40	6707.32
19.1	6	2.87	58.7	65.5	12450	19240	4337.98	6703.83
19.1	6	2.87	59	65.4	12300	20100	4285.71	7003.48
19.1	6	2.87	59.5	66.8	12350	19500	4303.14	6794.43
19.1	6	2.87	60.8	66.3	12450	20100	4337.98	7003.48
19.1	6	2.87	59.4	64.4	12350	22400	4303.14	7804.88
19.1	6	2.87	59.7	65.5	12530	19250	4365.85	6707.32
19.1	6	2.87	59.4	65.9	12650	19130	4407.67	6665.51
19.1	6	2.87	61	67.9	12800	19150	4459.93	6672.47
19.1	6	2.87	60	63.5	12450	20250	4337.98	7055.75
Valores promedio							4473.69	7053.97

Tabla A2 Resultados del ensaye a tensión de barras de refuerzo

De la tabla anterior se puede observar que el valor de la resistencia a la fluencia (fy) promedio, medido en la máquina universal es de 4473.69 kg/cm², lo cual resultó ser 6.5 % mayor que el valor nominal de 4200 kg/cm².





Antes de realizar la prueba a los especímenes, se realizaron las pruebas a la compresión al concreto con los cilindros recolectados en estado fresco del concreto durante el proceso de colado. Lo anterior con el propósito de verificar la resistencia requerida del concreto (f´c) para el estudio.

Para obtener una distribución uniforme de la carga en la superficie del cilindro, los estándares normativos sugieren que antes del ensaye a compresión los cilindros sean cabeceados con azufre o se les coloque con almohadillas de neopreno. En el caso de este trabajo, se utilizaron las almohadillas de neopreno. Como se puede observar en la figura A18.



Figura A18 Obtención de la resistencia a compresión de cilindros de 15x30 cm

En las tablas A3 y A4 se muestran los resultados de los cilindros fallados a compresión:





ID	días	Ø(mm)	H (mm)	W(kg)	P (kgf)	Área	f'c (kg/cm²)	f´c promedio (kg/cm²)
A1	14	149.95	301.20	11.943	42400	176.59	240.1	
A2	14	149.81	303.35	11.409	47500	176.25	269.5	
B1	14	150.65	305.00	11.475	48900	178.25	274.33	
B2	14	150.93	301.60	11.398	50900	178.89	284.52	269.06
C1	14	150.00	301.45	11.714	47000	176.71	265.97	
C2	14	149.90	304.20	11.376	49400	176.47	279.93	

Tabla A3 Resultado del ensaye a compresión a los 14 días

Tabla A4 Resultado del ensaye a compresión a los 28 días

ID	días	Ø(mm)	H (mm)	W(kg)	P (kgf)	Área	f'c (kg/cm²)	f´c promedio (kg/cm²)
A3	24	145.00	295.00	11098	56800	165.12	343.98	
C3	24	143.00	294.00	11248	52500	160.60	326.89	
D1	24	140.00	291.00	10979	56900	153.93	369.64	
D2	24	142.00	296.00	11525	45100	158.36	284.79	333.83
D3	24	142.50	291.50	11139	56000	159.48	351.14	
C4	24	143.50	295.00	11546	53600	161.72	331.42	
C5	24	142.00	293.50	11435	52100	158.36	328.99	

Como se puede observar la resistencia a la compresión del concreto, obtenido en la prueba, a los 14 días en promedio es de 269.06 kg/cm² lo cual resultó ser 7.6 % mayor que el valor de resistencia nominal a la compresión de 250 kg/cm², mientras que a los 28 días el valor del f´c promedio resulto ser de 333.83 kg/cm², lo cual expone que, para el momento de la realización de la prueba el concreto en estado endurecido ya estaba en condiciones para ser sometido al patrón de cíclicas.

A7.- Resistencia real

Una vez conocidas las resistencias promedio del acero de refuerzo (varilla de refuerzo del número 3, 4 y 6) y del concreto, se estimará la resistencia de cada una de las trabes de este trabajo utilizando, nuevamente, las ecuaciones del capítulo 3 de este trabajo.

Tabla A5 Resistencias teóricas a cortante de cada uno de los modelos, conforme a las resistencias obtenidas en el LEG del CENAPRED

Modelo	VcR (kg)	VsR (kg)	Vu=VcR+VsR (kg)
E1MA20	8304.18	14293.44	22597.62
E1MA10	8304.18	28586.87	36891.05





Con los nuevos valores de la resistencia de los materiales, se observa que el valor del VcR para todos los modelos se incrementó 16%, mientras el valor de VsR del modelo E1MA10 y E1MA20 se incrementó un 6.5%, estimados con valores nominales de resistencia del acero y del concreto.

Es importante resaltar que no se obtuvieron muestras del alambrón por lo que se carece de dicha información.

En la siguiente tabla se muestran los valores de la resistencia a flexión de las trabes E1MA10, E1MA20, E2MI10 y E2MI20 de acuerdo con sus características de armado a flexión y resistencia de los materiales obtenidas en la maquina universal del LEG del CENAPRED.

Modelo	M _{RF} (x 10⁵ kg-cm)	V _{MRF} (kg)
E1MA20	33.12	25479.61
E1MA10	33.12	25479.61
E2MI20	4.99	3845.63
E2MI10	4.99	3845.63

Tabla A6 Cortantes asociados a la falla por flexión

Los valores de la resistencia por flexión de las trabes E1MA20 y E1MA10 estimados con las resistencia reales resultaron ser 12.5% mayor que la estimada con resistencia nominal del acero y del concreto, mientras que la resistencia estimada de las trabes E2MI10 y E2MI20 resulto ser de 6.9%.





REFERENCIAS

ACI 374.2R-13 Guide for testing reinforced concrete structural elements under slowly applied simulated seismic loads, Reported by ACI Committee 3741124.

Matthew S. Speicher y Bruce F. Maison 2016, Loading protocols for ASCE 41 backbone curves. Earthquake Spectra, Earthquake Engineering Research Institute, vol 32, no. 4, November, pp 2513-2532.

NTC DCEC 2017 (2017), Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto, Gaceta oficial de la Ciudad de México.

NTC DS 2017 (2017), Normas técnicas complementarias para diseño por sismo, Gaceta oficial de la Ciudad de México.

AGRADECIMIENTOS

Se agradecen el apoyo de los prestadores de Servicio Social los ciudadanos alumnos de la Escuela Superior de ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco del IPN, así como del ciudadano alumno de la Facultad de Ingeniería de La UNAM.