



MUROS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO

Desempeño sismo-resistente basado
en ensayos en mesa vibratoria

Julián Carrillo León
Sergio M. Alcocer

ECOE
EDICIONES



Contenido



INTRODUCCIÓN	XV
CAPÍTULO 1: REVISIÓN DE LA LITERATURA	1
1.1. Usos y ventajas del CRFA	1
1.2. Nivel de agrietamiento del CRFA	4
1.3. Desempeño a flexión del CRFA	4
1.4. Aplicaciones del CRFA en el diseño sísmico	6
CAPÍTULO 2: PROGRAMA EXPERIMENTAL	9
2.1. Descripción del prototipo	9
2.1.1. Prototipo de vivienda	9
2.1.2. Estados límite	10
2.1.3. Analogía de ensayo	10

2.2. Variables de estudio y listado de especímenes	11
2.3. Requerimientos de similitud	13
2.4. Propiedades nominales de los modelos	15
2.4.1. Geometría y refuerzo	15
2.4.2. Diseño de los modelos	17
2.4.3. Características dinámicas y masa adicional sobre los modelos	21
2.5. Propiedades mecánicas de los materiales de construcción	22
2.5.1. Concreto reforzado con fibras de acero	22
2.5.2. Acero de refuerzo: barras y fibras	45
2.6. Configuración de los ensayos	50
2.6.1. Dispositivo de ensayo	50
2.6.2. Carga axial	52
2.6.3. Demanda sísmica	52
2.6.4. Instrumentación	55
2.6.5. Programa de pruebas en los modelos	60
CAPÍTULO 3: ENSAYOS DE MUROS	63
3.1. Sistema dinámico: dispositivo de ensayo – mesa vibratoria	63
3.1.1. Aceleración efectiva	64
3.1.2. Fuerza lateral efectiva	66
3.1.3. Periodos naturales de vibración y factores de amortiguamiento efectivo	67
3.2. Definición de parámetros	68
3.2.1. Modos de falla	68
3.2.2. Coeficiente sísmico y amplificación dinámica	69
3.2.3. Curvas de histéresis	69

3.2.4.	Componentes de desplazamiento	70
3.2.5.	Procedimiento de identificación de grietas	74
3.2.6.	Fluencia de barras	75
3.2.7.	Inicio de la contribución de las fibras de acero	75
3.2.8.	Índice de agrietamiento residual	75
3.2.9.	Procesamiento de señales	76
3.3.	Propiedades medidas en los modelos	77
3.4.	Descripción del daño y mecanismo de falla	78
3.4.1.	Agrietamientos previos al ensayo	78
3.4.2.	Evolución del agrietamiento	79
3.4.3.	Estado final de daño	81
3.4.4.	Modos de falla	81
3.5.	Comportamiento histerético	84
3.5.1.	Curvas de histéresis	84
3.5.2.	Componentes de deriva	90
3.5.3.	Perfiles de desplazamiento lateral, rotación y curvatura	95
3.6.	Frecuencias naturales de vibración y factores de amortiguamiento	98
3.7.	Fluencia de barras	105
3.8.	Contribución de las fibras de acero	112
3.8.1.	Inicio de la contribución	113
3.8.2.	Perfiles de deformaciones	119
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		127
4.1.	Programa experimental	127
4.2.	Propiedades mecánicas del CRFA	129

4.3. Ensayos de los muros de concreto	130
4.3.1. Descripción del daño y mecanismo de falla	130
4.3.2. Comportamiento histerético)	132
4.4. Frecuencias naturales de vibración y factores de amortiguamiento	133
4.5. Fluencia de barras y contribución de las fibras de acero	134
REFERENCIAS	135

Índice de figuras

FIGURA 1.	Curva carga – deflexión característica de CRFA (ASTM-C-1609, 2010).....	6
FIGURA 2.	Analogía para el ensayo de los modelos.	11
FIGURA 3.	Geometría y refuerzo de los modelos.....	16
FIGURA 4.	Configuración de los ensayos del CRFA.....	26
FIGURA 5.	Curvas esfuerzo-deformación del CRFA-AF en compresión.	33
FIGURA 6.	Curvas e sfuerzo-deformación del CRFA-1F en compresión.....	34
FIGURA 7.	Curvas esfuerzo-deformación del CRFA-2F en compresión.....	35
FIGURA 8.	Tendencias de las propiedades mecánicas en compresión y en tensión del CRFA.	36
FIGURA 9.	Tendencia de la resistencia a tensión indirecta del CRFA.....	38
FIGURA 10.	Curvas esfuerzo-deformación del CRFA-AF en flexión.	39
FIGURA 11.	Curvas esfuerzo-deformación del CRFA-1F en flexión.	40
FIGURA 12.	Curvas esfuerzo-deformación del CRFA-2F en flexión.	41
FIGURA 13.	Tendencias de las propiedades mecánicas a flexión del CRFA.	42
FIGURA 14.	Tendencias de las resistencias residuales a flexión del CRFA.	44
FIGURA 15.	Dispositivos para el ensayo de probetas de barras corrugadas y alambón liso a tensión.....	47
FIGURA 16.	Curvas esfuerzo-deformación de barras corrugadas de acero.....	48

FIGURA 17.	Parámetros de la curva esfuerzo-deformación de barras corrugadas de acero.....	50
FIGURA 18.	Dispositivo de ensayo	51
FIGURA 19.	Historias y espectros de aceleración para el prototipo.	53
FIGURA 20.	Instrumentación interna de los muros.	57
FIGURA 21.	Instrumentación externa de los muros cuadrados.	59
FIGURA 22.	Señales utilizadas en las pruebas de baja frecuencia.	61
FIGURA 23.	Localización de masas en la configuración de ensayo.	65
FIGURA 24.	Componentes de desplazamiento por otros efectos.	72
FIGURA 25.	Componentes de desplazamiento por efectos propios del modelo.....	74
FIGURA 26.	Agrietamientos previos al ensayo de los muros.	78
FIGURA 27.	Nivel de agrietamiento de los muros con fibra tipo 1F, en el estado límite de resistencia.	79
FIGURA 28.	Nivel de agrietamiento de los muros con fibra tipo 2F, hasta el registro 83-150%.	79
FIGURA 29.	Ángulo promedio del agrietamiento diagonal.	80
FIGURA 30.	Estado final de daño de los muros con fibra tipo 1F	82
FIGURA 31.	Estado final de daño de los muros con fibra tipo 2F	82
FIGURA 32.	Detalles característicos del estado final de daño de los muros.	83
FIGURA 33.	Estado del CRFA después de la falla por tensión diagonal.....	84
FIGURA 34.	Curvas de histéresis de los muros.	85
FIGURA 35.	Curvas de histéresis de los muros con fibra tipo 1F.....	90
FIGURA 36.	Curvas de histéresis de los muros con fibra tipo 2F.....	91
FIGURA 37.	Componentes de deriva de los muros con fibra tipo 1F.....	92
FIGURA 38.	Componentes de deriva de los muros con fibra tipo 2F.....	93
FIGURA 39.	Variación de la contribución a la deriva de los muros con la dosificación y el tipo de fibra para el estado límite de resistencia.....	95

FIGURA 40.	Perfiles de desplazamiento lateral, rotación y curvatura de los muros con fibra tipo 1F	96
FIGURA 41.	Perfiles de desplazamiento lateral, rotación y curvatura de los muros con fibra tipo 2F	97
FIGURA 42.	Frecuencias de vibración y factores de amortiguamiento efectivo de los muros con fibra tipo 1F	99
FIGURA 43.	Frecuencias de vibración y factores de amortiguamiento efectivo de los muros con fibra tipo 2F	100
FIGURA 44.	Relación entre deriva y la frecuencia de vibración o el amortiguamiento de los muros con fibra tipo 1F	102
FIGURA 45.	Relación entre deriva y la frecuencia de vibración o el amortiguamiento de los muros con fibra tipo 2F	103
FIGURA 46.	Variación de la frecuencia de vibración o el amortiguamiento de los muros con la dosificación y el tipo de fibra para el estado límite de resistencia	105
FIGURA 47.	Deformaciones en las barras de refuerzo del muro MC1F75.	106
FIGURA 48.	Deformaciones en las barras de refuerzo del muro MC1F100.	107
FIGURA 49.	Deformaciones en las barras de refuerzo del muro MC1F125.	108
FIGURA 50.	Deformaciones en las barras de refuerzo del muro MC2F75.	109
FIGURA 51.	Deformaciones en las barras de refuerzo del muro MC2F100	110
FIGURA 52.	Deformaciones en las barras de refuerzo del muro MC2F125	111
FIGURA 53.	Deformaciones en el CRFA del muro MC1F75.	113
FIGURA 54.	Deformaciones en el CRFA del muro MC1F100.	114
FIGURA 55.	Deformaciones en el CRFA del muro MC1F125	115
FIGURA 56.	Deformaciones en el CRFA del muro MC2F75	116

FIGURA 57.	Deformaciones en el CRFA del muro MC2F100.....	117
FIGURA 58.	Deformaciones en el CRFA del muro MC2F125.....	118
FIGURA 59.	Perfil de deformaciones en el CRFA del muro MC1F75 hasta el estado límite MRL.....	120
FIGURA 60.	Perfil de deformaciones en el CRFA del muro MC1F100 hasta el estado límite MRL.....	121
FIGURA 61.	Perfil de deformaciones en el CRFA del muro MC1F125 hasta el estado límite MRL.....	122
FIGURA 62.	Perfil de deformaciones en el CRFA del muro MC2F75 hasta el estado límite MRL.....	123
FIGURA 63.	Perfil de deformaciones en el CRFA del muro MC2F100 hasta el estado límite MRL.....	124
FIGURA 64.	Perfil de deformaciones en el CRFA del muro MC2F125 hasta el estado límite MRL.....	125

Índice de Tablas

TABLA	1.	Descripción de las variables de estudio.....	12
TABLA	2.	Listado de modelos para ensayos.....	13
TABLA	3.	Factores de escala del modelo de similitud simple.....	14
TABLA	4.	Resistencia de los modelos.....	20
TABLA	5.	Diseño de ensayos dinámicos de los modelos (escala 1:1.25).....	22
TABLA	6.	Características especificadas de los tipos de CRFA.....	24
TABLA	7.	Muestreo y tipos de ensayo en el concreto.....	25
TABLA	8.	Valores promedio de las propiedades mecánicas del concreto de los modelos.....	28
TABLA	9.	Coefficientes de variación de las propiedades mecánicas del concreto de los modelos.....	31
TABLA	10.	Ecuaciones propuestas para calcular las propiedades mecánicas del CRFA.....	45
TABLA	11.	Características especificadas de barra y alambión liso de acero.....	46
TABLA	12.	Características especificadas de fibras de acero.....	46
TABLA	13.	Propiedades mecánicas de barra y alambión liso de acero.....	49
TABLA	14.	Coefficientes de variación de las propiedades mecánicas de barra y alambión liso de acero.....	49
TABLA	15.	Características de los sismos en el prototipo.....	54
TABLA	16.	Niveles de intensidad sísmica en los prototipos.....	55
TABLA	17.	Programa de pruebas en los modelos.....	62
TABLA	18.	Pesos del sistema.....	66
TABLA	19.	Características del filtrado de las señales.....	77
TABLA	20.	Geometría real de los modelos.....	77
TABLA	21.	Coefficientes sísmicos y amplificación dinámica.....	87

TABLA 22.	Resultados principales de las curvas de histéresis.....	89
TABLA 23.	Componentes de deriva para el estado límite de resistencia.....	94
TABLA 24.	Frecuencias de vibración y factores de amortiguamiento para el estado límite de resistencia.....	104
TABLA 25.	Deformaciones en barras longitudinales de elementos de borde y barras en el nivel de desplante para el estado límite de MRL	112
TABLA 26.	Deformaciones en CRFA para el estado límite de MRL	119

Introducción



Una de las opciones más eficientes para la construcción de viviendas es el desarrollo de conjuntos habitacionales con viviendas de concreto en su totalidad. Teniendo en cuenta la resistencia inherente de las estructuras con muros de concreto, las demandas sísmicas en este tipo de viviendas son bajas. Por tanto, actualmente se utilizan muros con baja resistencia de concreto y espesor, y cuantías de refuerzo reducidas.

Con el propósito de incrementar y mejorar la oferta tecnológica de las viviendas a base de muros de concreto, manteniendo una seguridad estructural adecuada, en el Instituto de Ingeniería de la UNAM se llevó a cabo un extenso programa de investigación experimental y analítico (Flores *et al.*, 2007; Carrillo y Alcocer, 2012a, 2012b; Sánchez, 2010). El objetivo esencial de dicha investigación fue proponer criterios de análisis y diseño sísmico aplicables a muros de concreto para viviendas de baja altura. El programa experimental incluyó 39 ensayos cuasi-estáticos y dinámicos de muros con diferente relación de aspecto y sistemas de muros con aberturas. Las variables estudiadas fueron el tipo de concreto (peso normal, peso ligero y auto compactable), la cuantía de acero a cortante en el alma (0%, 0.125% y 0.25%) y el tipo de refuerzo (barras corrugadas y malla de alambre soldado).

A partir del análisis de la información experimental y analítica, se comprobó que las cuantías mínimas de refuerzo a cortante estipuladas en los reglamentos disponibles para diseño sísmico de viviendas de baja altura son conservadoras o muy conservadoras, especialmente para estructuras situadas en algunas zonas de amenaza sísmica baja o moderada. Con base en lo anterior, en dicho estudio se presentaron recomendaciones de acuerdo con la capacidad y la demanda de las viviendas. Por ejemplo, en algunas zonas se propuso prescindir o disminuir el refuerzo a cortante en el alma del muro, a cambio de utilizar requisitos específicos por cambios volumétricos y/o refuerzo por integridad estructural, así como parámetros particulares para diseño sísmico.

Diferentes tipos de fibras se utilizan para mejorar las propiedades del concreto, tales como fibras de carbón, vidrio, polipropileno y de polietileno; el tipo de fibra más comúnmente utilizado es la fibra de acero. El Concreto reforzado con Fibras de Acero (CRFA) es utilizado como un material de construcción en estructuras modernas. Estudios recientes han mostrado que las fibras de acero pueden ser utilizadas para mejorar el desempeño de estructuras, así como para incrementar la capacidad de momento flexionante y de la resistencia a cortante de elementos de concreto reforzado (Fahmi y Saber, 2012).

Estudios experimentales previos (Naaman, 1985; Adebar *et al.*, 1987, Kwak *et al.*, 2002; Parra-Montesinos, 2005) han indicado que el Concreto Reforzado con Fibras de Acero (CRFA) incrementa la resistencia a esfuerzo cortante, la capacidad de deformación y el control de agrietamiento de elementos estructurales y no estructurales. El incremento de desempeño resulta de la habilidad de las fibras aleatoriamente orientadas para detener las grietas y de la capacidad pos-agrietamiento del concreto. En una investigación experimental previa desarrollada en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Carrillo *et al.*, 2014) se estudió el comportamiento dinámico de dos muros de concreto de baja altura rehabilitados mediante un encamisado de CRFA. En términos generales, la respuesta medida de los muros rehabilitados fue satisfactoria, ya que se registraron resistencias superiores y desplazamientos similares a los medidos en los muros originales. A partir del desempeño observado en vigas de concreto reforzado con fibras, el Reglamento ACI-318 (2010) permite el uso de fibras de acero en sustitución del acero de refuerzo mínimo por cortante en vigas, el cual se dispone de forma convencional utilizando estribos de acero. El ACI-318 permite dicha sustitución, siempre y cuando la resistencia nominal a compresión del concreto (f_c'):

- a. sea menor que 40 MPa,
- b. el peralte de la viga sea menor que 60 cm
- c. y el esfuerzo cortante de diseño sea menor que $\phi 0.17\sqrt{f_c'}$ MPa.

Si se consideran las características particulares de los muros de concreto para vivienda de baja altura y las demandas sísmicas en este tipo de estructuras, las propiedades mecánicas de los concretos con fibras, en especial su resistencia a tensión y su capacidad de deformación post-agrietamiento, los convierten en materiales idóneos para su utilización en la construcción de muros de concreto para vivienda. A partir de los resultados de estudios experimentales previos, una alternativa para incrementar y mejorar la oferta tecnológica de este tipo de viviendas, manteniendo una seguridad estructural adecuada, es la sustitución del acero de refuerzo convencional por cortante en el alma por un concreto reforzado con fibras de acero. Sin embargo, el Reglamento Americano de Construcción, ACI 318-11; el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo-Resistente, NSR-10 y las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto de México (NTC-C, 2004) no hacen referencia al uso de concreto reforzado con fibras en muros de concreto. La falta de recomendaciones para diseño y de evidencia experimental sobre el desempeño dinámico de este tipo de concreto en muros son las razones principales que justifican el desarrollo de este estudio.

El objetivo principal de este estudio es desarrollar criterios y recomendaciones para diseño sísmico de muros de concreto reforzados con fibras de acero, en sustitución del acero de refuerzo por cortante convencional (barras y mallas). Los resultados del estudio promoverán el uso de concretos con fibras en la construcción de viviendas económicas y con un nivel de seguridad sísmico adecuado. Para cumplir con el objetivo principal, se plantearon tres objetivos específicos. El primero es ampliar el conocimiento sobre la utilización de concretos con fibras de acero en elementos sometidos a fuerzas sísmicas. De acuerdo con la revisión de la literatura disponible, no se han realizado investigaciones experimentales donde se estudie la sustitución completa del refuerzo convencional en muros de concreto de baja altura.

El segundo objetivo específico es establecer correlaciones para diseño entre las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de acero. A partir de un número significativo de probetas de concreto, se obtienen índices de resistencia a compresión, módulo de elasticidad, relación de Poisson, resistencia a tensión y, especialmente, los parámetros que definen el desempeño a la flexión del CRFA. Las correlaciones se plantean en el formato convencional establecido en los reglamentos de construcción.

El último objetivo específico es evaluar experimentalmente el desempeño estructural de muros de concreto reforzados con fibras de acero. Para cumplir este objetivo se realizaron ensayos dinámicos en mesa vibratoria de muros de concreto sometidos a acelerogramas naturales y sintéticos. Se reconoce ampliamente

que los ensayos en mesa vibratoria constituyen el mejor método para reproducir, con alto grado de fidelidad, los efectos dinámicos que los sismos imponen a las estructuras o elementos estructurales. Las variables de estudio se definieron de acuerdo con los resultados de investigaciones previas, las características de los muros y las especificaciones de los reglamentos vigentes.

MUROS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO



El concreto reforzado con fibras de acero (CRFA) es utilizado como material de construcción en estructuras modernas. Estudios recientes han mostrado que las fibras de acero pueden ser utilizadas para incrementar la capacidad de momento de flexión y la resistencia a cortante de elementos de concreto reforzado. La resistencia a tensión y capacidad de deformación post-agrietamiento convierten al concreto reforzado con fibras de acero en un material atractivo para la construcción de muros para viviendas de baja altura.

Incluye

- Revisión de la literatura sobre concreto reforzado con fibras de acero (CRFA).
- Desarrollo de un programa experimental de muros de CRFA para uso en vivienda de baja altura.
- Resultados de los ensayos de muros de CRFA en mesa vibratoria.

El objetivo de esta obra es presentar criterios y recomendaciones para diseño sismo-resistente de muros de concreto reforzados con fibras de acero (CRFA) en sustitución del acero de refuerzo por cortante convencional (barras y mallas). Para ello, los autores inician ampliando el conocimiento sobre la utilización de concretos con fibras de acero en elementos sometidos a fuerzas sísmicas; luego establecen correlaciones para diseño entre las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de acero; y finalizan con una evaluación experimental del desempeño estructural de muros de CRFA por medio de ensayos dinámicos en mesa vibratoria de muros de concreto sometidos a acelerogramas naturales y sintéticos.

Esta obra está dirigida a estudiantes y profesores de Ingeniería de Materiales, Ingeniería Civil e Ingeniería Industrial, centros de investigación e institutos relacionados con el concreto reforzado y, en general, a profesionales y consultores del sector de la construcción.

Colección: Ingeniería y salud en el trabajo

Área: Ingeniería Civil

ECOE
EDICIONES



www.ecoediciones.com

ISBN 978-958-771-348-0



9 789587 713480

e-ISBN 978-958-771-349-7