



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):

- sea menor que 40 MPa,
- el peralte de la viga sea menor que 60 cm
- 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.

Capítulo 1



Revisión de la literatura

En este capítulo se describen los usos y ventajas principales del Concreto Reforzado con Fibras de Acero (CRFA), su nivel de agrietamiento, los parámetros más representativos para evaluar experimentalmente su desempeño, así como las aplicaciones del CRFA en elementos sometidos a acciones de tipo sísmicas.

1.1. Usos y ventajas del CRFA

El uso de fibras en materiales de edificación para mejorar su comportamiento es un concepto antiguo e intuitivo. Ejemplos incluyen la adición de fibras de baja resistencia a piezas de adobe y cerámica para crear un compuesto con mejor desempeño. Sin embargo, el uso de fibras resistentes y discretas como refuerzo del concreto ha sido un desafío para la mayoría de ingenieros en materiales. La adición de refuerzo en forma de fibras a la mezcla, como la adición de los agregados, para crear un material homogéneo, isotrópico y moldeable, es una tarea que empezó hace más de cien años y, hoy en día, puede considerarse como una realidad. El empleo exitoso del concreto reforzado con fibras empozó a inicios de los años 60, y desde ese entonces, muchos investigadores están tratando de evaluar las propiedades potenciales de este material para un uso más amplio (Barragán, 2002).

Un incremento en la resistencia del concreto desde la resistencia normal hasta alta resistencia está directamente asociada con un aumento de casi todas las propiedades del material pero, al mismo tiempo, produce un incremento en su fragilidad, lo cual origina limitaciones para su aplicación. Esto es especialmente crítico en secciones donde, debido a restricciones de construcción, una pequeña cantidad de barras de refuerzo puede colocarse o donde la falla está dominada por la propagación súbita de grietas, como en el caso de fallas de cortante. Si el Concreto Reforzado con Fibras de Acero (CRFA) tiene tales características importantes, una pregunta lógica podría estar basada en porqué éste casi no es usado para un diseño estructural más seguro. Esto se explica al considerar la falta total de reglamentos que contemplen el diseño estructural del concreto reforzado con fibras (Barragán, 2002).

El enfoque más fundamental para estudiar la reducción de la fragilidad, o mejor el incremento de tenacidad, está basado en el ensayo de tensión uniaxial. Sin embargo, este ensayo tiene algunas limitaciones prácticas, las cuales han conducido a utilizar el ensayo de flexión para la determinación de los parámetros de tenacidad del material basados en la respuesta carga-deflexión determinada experimentalmente en especímenes prismáticos. Con frecuencia, el objetivo del ensayo es determinar parámetros que pueden utilizarse en el diseño estructural general contra fallas frágiles, la cual es la principal tarea a conseguir si el CRFA tiene que ser extensamente utilizado (Barragán, 2002).

El uso de fibras para reforzar materiales frágiles se ha reportado desde hace varios siglos. Por ejemplo, datos históricos hacen referencia a una casa construida en el año 1540, en la cual se utilizó adobe reforzado con fibras de paja. En los últimos años, en una gama amplia de materiales de ingeniería (incluyendo cerámicos, plásticos, cementantes y productos de yeso) se han incorporado las fibras para mejorar las propiedades de resistencia a tensión, resistencia a compresión, módulo de elasticidad, resistencia a la fatiga, resistencia al impacto y a la abrasión, control del agrietamiento, contracción, expansión, durabilidad, resistencia al fuego, así como las propiedades térmicas (ACI-544, 1996). En el concreto, desde el año 1910 se han adicionado elementos discontinuos de acero, tales como clavos y pequeños trozos de alambre y de metal (Naaman, 1985). Durante la década de 1960, en los Estados Unidos se realizó la primera investigación para evaluar el potencial de las fibras de acero como refuerzo para concreto (Romualdi, 1963). Desde entonces, se ha generado una cantidad importante de investigación para el desarrollo y aplicación del CRFA.

El uso de fibras en el concreto para proveer comportamiento adecuado antes y después de agrietamiento ha ganado gran popularidad en las últimas décadas. Desde 1967 varios tipos de fibras han sido utilizadas en el concreto de forma satisfactoria, pues se han mejorado las propiedades físicas y de durabilidad del

concreto. Adicionalmente, los resultados de investigaciones experimentales han demostrado la capacidad de las fibras para mejorar las propiedades mecánicas del concreto (ACI-544, 2010). Las ventajas más significativas de la adición de fibras de acero al concreto son las siguientes: a) proveen tenacidad a la flexión (capacidad de absorber energía después del agrietamiento), b) aumentan la resistencia a tensión directa, al cortante y a la torsión, c) incrementan las propiedades de resistencia al impacto y a la fatiga, d) mejoran el comportamiento de contracción y flujo plástico y, e) incrementan la durabilidad en ciertas condiciones climáticas (ACI-544, 1996).

En aplicaciones donde la presencia del refuerzo continuo no es esencial para la integridad de la estructura, por ejemplo en pavimentos, pisos, revestimientos de concreto lanzado, entre otros, los incrementos de resistencia a la flexión asociados a las fibras pueden reducir los espesores y/o proporcionar desempeño estructural (ACI-544, 1996). A continuación se describen algunos ejemplos característicos de usos estructurales y no estructurales del CRFA:

- *Pisos industriales*: útil para altas cargas de impacto y para reducción o eliminación de juntas
- *Pavimentos*: particularmente cuando se requieren espesores menores a los normales
- *Capas de compresión*: puede sustituir la malla de alambre soldado en entrepisos de edificios y losas de puentes
- *Concreto lanzado*: en revestimientos temporales y definitivos de túneles y minas para estabilidad de taludes de suelo y roca, así como en cortes y terraplenes carreteros
- *Estructuras prefabricadas*: para controlar agrietamientos en elementos prefabricados, así como en muros o paneles autoportantes que no soportan cargas, dovelas de túneles, tubos, etc.
- *Tanques o depósitos de fluidos*: puede eliminar o reducir la utilización de mallas de alambre soldado en fosas sépticas, tanques de aceite, colectores de lluvia, cisternas, etc.
- *Estructuras tipo cascarón*: en domos.
- *Reparaciones estructurales*: rehabilitación sísmica a partir del encamisado de columnas, vigas y muros.

A pesar de las propiedades y ventajas del CRFA, en la actualidad la utilización de CRFA en aplicaciones estructurales tiene un papel secundario, es decir, se usa esencialmente como suplemento para controlar el agrietamiento, aumentar la resistencia al impacto y resistir la desintegración del material. En elementos

estructurales solicitados por tensión axial o tensión por flexión, tales como vigas, columnas, losas de entrepiso, entre otros, el acero de refuerzo debe resistir los esfuerzos de tensión. En estos casos, el uso de fibras de acero en combinación con refuerzo convencional ha demostrado buenos resultados. Por ejemplo, los estudios de Jindal (1984), Batson *et al.* (1984) y Craig (1987) han indicado que el CRFA incrementa la resistencia a la flexión, al cortante y a la torsión.

Después de 30 años de investigación y desarrollo, el CRFA no ha sido usado masivamente en elementos estructurales. Este hecho está relacionado con la falta de métodos de análisis y diseño de estructuras con CRFA. Debido a la anisotropía originada por la fundida del material y la dispersión originada por el relativo bajo número de fibras, tales métodos deben estar ligados a una caracterización precisa del material (Casanova y Rossi, 1997).

1.2. Nivel de agrietamiento del CRFA

Cuando se alcanza la resistencia a tensión de la matriz del CRFA se supone que aparece una sola grieta. Con los CRFA usados actualmente, el esfuerzo remanente después del agrietamiento en tensión directa es aproximadamente menos que la mitad de la resistencia a tensión de la matriz. En consecuencia, una macro-grieta aparece bajo flexión y se propaga significativamente en la sección e incrementa el brazo de palanca del refuerzo. Esta larga grieta modificará el campo de esfuerzos en su área y una grieta secundaria no aparecerá cerca de la primera grieta. Por tanto, de forma diferente al concreto reforzado convencionalmente, las grietas de flexión de una viga de CRFA no podrían considerarse tan cercanas y regularmente espaciadas. La mejor forma de modelar tal comportamiento es el uso de una rótula plástica (Casanova y Rossi, 1997).

Evitar en la estructura una falla no-dúctil de cortante, es una de las principales preocupaciones de los ingenieros civiles. Cientos de ensayos se han llevado a cabo en muros de concreto reforzado (CR) para estudiar los mecanismos de falla y para establecer relaciones de predicción. Más recientemente, la capacidad de las fibras de acero para controlar el agrietamiento del concreto ha originado grandes esperanzas para mejorar la ductilidad de los elementos sometidos a cortante. Algunos estudios han sido llevados a cabo sobre el comportamiento a cortante de vigas de CRFA (Lim *et al.*, 1987; Baston *et al.*, 1972; Narayanan y Darwish, 1987; Swamy *et al.*, 1993). Estos estudios han probado la eficiencia del CRFA como refuerzo del alma.

1.3. Desempeño a flexión del CRFA

Varios ensayos se han desarrollado para caracterizar directamente la capacidad de absorción de energía del Concreto Reforzado con Fibra (CRF) bajo consideraciones simples de carga, tales como compresión, flexión y tensión. Debido a las dificultades para llevar a cabo pruebas de tensión directa en especímenes de

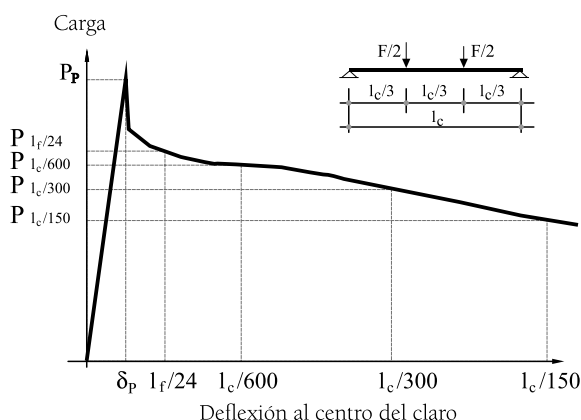
concreto reforzado con fibras, el ensayo de flexión es el más representativo en el CRFA pues a partir de este ensayo se puede estimar la capacidad de deformación que la fibra le proporciona al concreto después de alcanzar la resistencia máxima a flexión. Adicionalmente, el ensayo de flexión es el más popular porque éste simula más realísticamente las condiciones en muchas situaciones prácticas. Los resultados de la prueba de flexión permiten la caracterización de la tenacidad a partir de unos o más de los siguientes parámetros: absorción de energía absoluta, índices adimensionales relacionados con la capacidad de absorción de energía, resistencias equivalentes a flexión asociadas a determinadas deflexiones pos-agrietamiento (Gaitán, 2013), entre otros parámetros que describen la respuesta pos-agrietamiento del CRF.

Según la norma ASTM-C-1609 (2010), para determinar el desempeño a flexión del CRF se debe utilizar una viga con sección transversal igual a 150×150 mm y longitud de 600 mm, con cargas aplicadas en los tercios de la luz central, la cual debe ser igual a 450 mm. Esta configuración de ensayo tiene un cociente entre el claro de cortante y la altura (150 mm / 150 mm) igual a 1, y un cociente entre la luz central y la altura (450 mm / 150 mm) igual a 3. Aunque las pruebas experimentales de tensión y flexión intentan caracterizar el comportamiento del material, los resultados de estos ensayos son comúnmente afectados por el tamaño y la geometría del espécimen (Gopalaratnam y Gettu, 1995). Por ejemplo, el valor extremadamente pequeño del cociente entre el claro de cortante y la altura, causa grandes esfuerzos cortantes similares a los observados en vigas peraltadas y muros. Por tanto, en los resultados obtenidos a partir de esta configuración podría estar implícita una significativa influencia de la dependencia geométrica. Adicionalmente, este estado de esfuerzos es poco representativo de muchas de las aplicaciones más comunes del CRF (dovelas para túneles, losas sobre suelo). Se debe notar que para esta configuración de ensayo, la deformación adicional debido a cortante es del orden de 25% para compuestos típicos de CRF (Gopalaratnam y Gettu, 1995).

En la **Figura 1** se presenta el desempeño característico del CRFA a flexión. La última lectura de deformación que se muestra en la figura no está asociada a la capacidad última de desplazamiento, ya que el valor de este parámetro se establece explícitamente en la norma ASTM-C-1609 (2010) como $l_c/150$ de la longitud del claro del espécimen (l_c). En la sección 5.6.6.2 del Reglamento ACI-318 (2011) se especifica un criterio de aceptación basado en el desempeño a la flexión, el cual debe medirse siguiendo los lineamientos de la norma ASTM-C-1609 (2010). De acuerdo con dicho criterio, se considera aceptable el CRFA para resistir fuerza cortante, siempre y cuando sus resistencias residuales asociadas a deflexiones al centro del claro equivalentes a $l_c/300$ y $l_c/150$, sean mayores que 90% y 75%, respectivamente, de la resistencia de agrietamiento (carga de primer pico P_p , **Figura 1**).

A partir de una investigación experimental utilizando CRFA con longitudes diferentes de fibras, Dinh *et al.* (2010) proponen un criterio de aceptación distinto, pero basado también en la norma ASTM-C-1609; es decir, recomiendan considerar el primer límite de deflexión en función de la longitud de la fibra l_f , en lugar de la longitud del claro del espécimen, l_c , así como valores diferentes de las resistencias residuales. Por ejemplo, Dinh *et al.* (2010) consideran aceptable un CRFA para resistir fuerza cortante, siempre y cuando sus resistencias residuales en deflexiones al centro del claro equivalentes a $l_f/24$ y $l_c/150$, no sean menores que 75% y 40%, respectivamente, de la resistencia de agrietamiento (**Figura 1**).

FIGURA 1. Curva carga – deflexión característica de CRFA (ASTM-C-1609, 2010).



1.4. Aplicaciones del CRFA en el diseño sísmico

El CRFA ha demostrado ser efectivo tanto para mejorar el desempeño estructural en elementos sometidos a cargas gravitacionales, como para incrementar la resistencia al cortante, la ductilidad y disipación de energía en elementos sometidos a fuerzas sísmicas (Henager, 1977; Parra-Montesinos, 2005). En la literatura disponible se reportan varios estudios donde se ha investigado el comportamiento del CRFA en elementos sometidos a fuerzas sísmicas. Por ejemplo, Katzensteiner *et al.* (1994) ensayaron dinámicamente dos modelos de marcos estructurales; en uno de ellos el refuerzo fue detallado con estribos de confinamiento de acuerdo con los requerimientos de los reglamentos de diseño para estructuras dúctiles y en el segundo modelo se disminuyó la cantidad requerida de estribos a cambio de utilizar CRFA en toda la estructura. Los resultados de estas pruebas demostraron que ambos modelos experimentaron niveles de ductilidad similares, pero la disipación de energía en las juntas fue mayor y el nivel de agrietamiento fue menor en el modelo donde se utilizó CRFA.

Debido al incremento del costo asociado con la adición de las fibras, en algunos casos se planea la utilización de CRFA solamente en zonas críticas. En dichas zonas las demandas de deformación inelástica obligan a un detallado especial y sustancial del refuerzo, el cual es necesario para garantizar un comportamiento adecuado durante un evento sísmico. El buen comportamiento a tensión que exhibe el CRFA, hace especialmente atractivo su uso para elementos con respuesta dominada por cortante, por ejemplo, en conexiones viga columna, muros de baja altura, vigas de acoplamiento, así como en regiones de elementos a flexión sometidos a la combinación de grandes deformaciones inelásticas y altos esfuerzos cortantes, tales como bases de muros y columnas, y algunas zonas de vigas de marcos estructurales donde se espera la formación de articulaciones plásticas (Parra-Montesinos, 2005). Por ejemplo, para asegurar un comportamiento adecuado de las vigas de acoplamiento ante sismos, con frecuencia se requieren cantidades de refuerzo significativas, lo cual genera congestionamiento del refuerzo y dificultades constructivas. Como una alternativa de diseño, Cambolat *et al.* (2005) y Lequesne *et al.* (2009) estudiaron experimentalmente el comportamiento de vigas de acoplamiento utilizando Concreto Reforzado con Fibras de Alto Desempeño (CRFAD) ante cargas cíclicas reversibles. Los resultados de estas investigaciones mostraron que el funcionamiento del CRFA de alto desempeño fue adecuado, pues se registró mayor resistencia al cortante, mayor capacidad de retención de rigidez y, de esta manera, se constituyó la posibilidad de reducir o eliminar el refuerzo transversal gracias al confinamiento provisto por el CRFAD.

Parra-Montesinos y Kim (2004) estudiaron el uso de CRFAD en muros de mediana altura. En el programa experimental se incluyó el ensayo de dos muros de CRFAD con relación de aspecto $h/l_w = 1.5$, sometidos a carga cíclica reversible. En uno de los modelos se utilizó fibras de polipropileno y en el otro, fibras de acero con gancho. La cuantía de acero de refuerzo a cortante en el alma fue menor que el valor establecido por el reglamento ACI-318 de la época. Los resultados de esta investigación indicaron que el desempeño de la resistencia al cortante, la capacidad de deformación y la tolerancia al daño de los muros de CRFAD fueron adecuados para propósitos de diseño sísmico. Continuando con esta línea de investigación, Parra-Montesinos *et al.* (2006) ensayaron cuatro muros con relación $h/l_w \approx 3.5$, sometidos a desplazamientos cíclicos reversibles. El propósito de esta nueva investigación fue proporcionar evidencia experimental para relajar los requisitos del refuerzo por confinamiento que se requiere en los elementos de borde de los muros, los cuales son esenciales para mantener una capacidad de desplazamiento adecuada durante un evento sísmico. En general, al utilizar CRFA se disminuyen las dificultades constructivas ocasionadas por el congestionamiento del refuerzo. Uno de los muros fue construido usando concreto normal y con refuerzo detallado de acuerdo con los requisitos del capítulo 21 del ACI-318 de la época. En la zona de articulación plástica de los tres especímenes

restantes se utilizó CRFA y se emplearon fibras con gancho o fibras retorcidas en fracciones de volumen (V_f) iguales a 1.5% y 2%; es decir, dosificaciones aproximadas de 120 y 160 kgf/m³, respectivamente.

Los muros con fibra exhibieron capacidades de deriva entre 2.5% y 3.5%. Aunque en el muro con fibras con gancho y $V_f = 2\%$ se eliminó el refuerzo por confinamiento en los bordes, no se observaron efectos negativos en la respuesta del muro. En este muro la falla se ocasionó por la fractura del refuerzo longitudinal en una deriva igual a 3.5%. El espécimen con $V_f = 1.5\%$ y el uso de fibras con gancho representó una solución viable para reducir la cuantía por confinamiento. El muro de concreto normal donde se detalló el refuerzo de acuerdo con el ACI-318 de la época exhibió un buen comportamiento y no se observó una indicación clara de falla para un nivel de deriva igual a 3.5%.

Con el propósito de estudiar nuevas técnicas de rehabilitación de muros de concreto de baja altura, Carrillo *et al.* (2014) evaluaron experimentalmente el desempeño del encamisado por medio de concreto reforzado con fibras. Para ello, se estudió la respuesta dinámica de dos muros de concreto reforzados con malla de alambre soldado y rehabilitados mediante una capa adicional de CRFA. Antes de llevar a cabo la rehabilitación, los especímenes habían sido ensayados en mesa vibratoria hasta condiciones de daño severas. La capacidad de resistencia de los muros rehabilitados fue, en el menor de los casos, 40% mayor que la del muro original. En cuanto a la capacidad de desplazamiento, uno de los modelos alcanzó el mismo nivel de deriva que su modelo original. Sin embargo, el otro modelo rehabilitado registró derivas un poco menores que el modelo original. Esto se ocasionó a causa del aumento pronunciado de la rigidez del muro rehabilitado en comparación con la del muro original.

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