

PROPIEDADES Y APLICACIONES DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO.

Dr. Colin. D. Johnston\*

RESUMEN

Este trabajo se inicia identificando las características importantes de las fibras, las cuales gobiernan el funcionamiento de las fibras incorporadas al concreto por medio de un proceso convencional de mezclado, al ser así intenta comunicar la lógica que debería gobernar la selección de fibras para una variedad de aplicaciones específicas. Se hace un resumen de la disponibilidad de la fibra e inclinaciones hacia el uso de las mismas. El efecto de las fibras en el comportamiento del concreto fresco y las propiedades del concreto endurecido se discuten en términos de la información obtenida para fibras de acero, vidrio y polipropileno, aunque por razones que se dan en la introducción, se le da énfasis a las fibras de acero. El trabajo concluye con un repaso breve de la variedad de aplicaciones en las cuales los tres tipos de fibras se han utilizado, una vez más con énfasis principalmente en las fibras de acero debido al amplio uso de éstas. Limitaciones de espacio impiden la inclusión de ilustraciones, pero se espera que la presentación de transparencias remediará parcialmente esta deficiencia.

\* Profesor asociado en Ingeniería Civil en la Universidad de Calgary, Alberta, Canadá, y director de M&S. Research Consulting Ltd.

## INTRODUCCION.

En este trabajo relativamente corto, es imposible describir en detalle las propiedades del material y aplicaciones de los varios tipos de concreto reforzado con fibras, dentro del alcance de la tecnología presente. Mi deseo es comunicar al lector la lógica que deberá gobernar la selección del tipo de fibra, para la variedad de aplicaciones específicas o posibles, la naturaleza y grado de avance en las propiedades del material básico que aumentan como resultado de la inclusión de las fibras más comunes, y la variedad de aplicaciones o aplicaciones posibles para las cuales cada tipo de concreto reforzado con fibras, ha sido o es probable que sea adecuado.

Antes de discutir las propiedades del material y la amplia variedad de aplicaciones asociadas al concreto reforzado con fibras, deberá racionalizarse el énfasis aparente de las fibras de acero en este trabajo. En primer lugar, el balance de factores tecnológicos y económicos, favorece al acero como fibra para agregarse al concreto mezclado y vaciado por medios convencionales, como será evidente más tarde. En segundo lugar, la información publicada disponible sobre las propiedades de los materiales se refieren casi completamente a fibras de acero. En tercer lugar, y probablemente a consecuencia de lo anterior, la mayoría de las pruebas de campo hasta la fecha se han hecho con fibras de acero. En cuarto lugar, las limitaciones sobre la extensión del texto y tiempo de presentación hacen imposible discutir todos los tipos de materiales fibrosos para reforzar el concreto.

El alcance del trabajo está por lo tanto limitado a concretos en los cuales se les incorpora las fibras por medio de un mezclado convencional. Se han excluido una amplia variedad de productos en láminas o paneles reforzados con fibra de asbesto o de vidrio, en donde la matriz es pasta de cemento (1). Estos difieren, en forma acentuada, de los concretos reforzados con fibra, en el proceso de fabricación y el grado de orientación de las fibras que se presenta de dos dimensiones, esta orientación es originada por lo delgado de las secciones. También se han excluido compuestos donde las fibras son continuas y alineadas, como las que se han desarrollado eficientemente para utilizar refuerzo de fibra de carbón (2).

El qué y el por qué de las fibras.

Vamos a considerar que se requiere de fibras discontinuas orientadas al azar y que se incorporan a una matriz de concreto por medio de un proceso de mezclado convencional, que las someta a considerable mal trato en la forma de esfuerzos de flexión y de abrasión.

Propiedades intrínsecas de las fibras.

- (i) Resistencia a la tensión.- Las fibras deberán ser más resistentes que la matriz para que puedan soportar la carga adicional que se les transfiera cuando la matriz se agrieta.
- (ii) Elongación.- La falla por deformación de las fibras deberá ser substancialmente mayor que la de la matriz, si es que las fibras van a soportar la deformación adicional impuesta sobre éstas después que la matriz se agrieta.

- (iii) Módulo de elasticidad.- Con el fin de hacer máximo el grado de transferencia de carga de la matriz a las fibras, antes de que se agriete la matriz y de aquí su efecto reforzante, la relación  $E_f/E_m$  deberá ser lo mayor posible. Esto no es necesario en ciertas aplicaciones donde se aprovecha la resistencia a la desintegración posterior al agrietamiento, por ejemplo: impacto o cargas explosivas.
- (iv) Adherencia.- La habilidad de las fibras para soportar cargas transferidas de la matriz, depende de la adherencia adecuada, física (adhesiva), mecánica (friccional y de entrelazamiento) o química (de reacción entre materiales de la matriz y las fibras).
- (v) Razón de Poisson.- Bajo esfuerzo de tensión, si la razón de Poisson para las fibras es mayor que para la matriz, las fibras tienden a zafarse, reduciendo así o rompiendo la adhesión interfacial. Si es menor, la adhesión se mejora debido al esfuerzo interfacial de compresión y a la fricción resultante generada.
- (vi) Flujo.- Si la razón de flujo de las fibras es relativamente alta comparada con la de la matriz, éstas no pueden mantener su función reforzante con el tiempo, porque se vuelve a transferir la carga a la matriz.

Características físicas.

- (i) A medida que aumenta la razón de aspecto (largo/diámetro efectivo) de la fibra, aumenta también el esfuerzo en las fibras y consecuentemente su efecto reforzante. A razones de aspecto bajos, la falla involucra extracción de la fibra, mientras que para cierto valor crítico, incluye la fractura de la fibra. Idealmente, para utilizar plenamente la resistencia de la fibra, la razón de aspecto deberá aproximarse a este valor crítico.
- (ii) Estructura.- Algunas fibras se producen ya sea como monofilamento, multifilamento o en forma fibrilada, como ejemplo: el polipropileno. Para la forma de multifilamento, el área superficial exterior y diámetro promedio correspondiente gobiernan la razón de aspecto. También la estructura torcida o entretejida ofrece una mejor adherencia mecánica que la forma de monofilamento.
- (iii) Textura superficial.- El procesado físico o químico puede mejorar la resistencia interfacial de adherencia para algunos tipos de fibra. Dicho procesado puede comprender a una cubierta para mejorar la adhesión, deformación mecánica de la superficie de la fibra para hacerla áspera, o alteración del perfil alargado de una línea recta a una ondulada o a una forma arrugada, a una con extremos alargados, en forma de gancho o en círculo.
- (iv) Concentración.- El grado de mejoramiento en propiedades como compuesto está directamente relacionado con la concentración de la fibra. Por lo general, las propiedades mejoran en proporción a la concentración de fibra hasta que el proceso escogido para el mezclado llega a ser incapaz de distribuir las fibras con uniformidad en toda la matriz. El límite superior de concentración depende del proporcionamiento, tamaño máximo

de agregado, tipo, tamaño, aspecto y textura superficial de la fibra.

Compatibilidad del concreto con el proceso de mezclado.

- (i) El proceso de mezclado convencional somete las fibras a un alto grado de abrasión, impacto y esfuerzo de flexión, los cuales deben de soportar para mantener la relación de aspecto y resistencia. Algunas fibras como las de vidrio y carbón sufren una pérdida substancial de resistencia con esta operación. Otros que se quiebran fácilmente sufren pérdida de la relación de aspecto y consecuentemente de su efectividad reforzante.
- (ii) Después del mezclado y colocación, las fibras son selladas, potencialmente para su vida de trabajo, en un ambiente alto en alcalinidad donde deberán mantener resistencia y durabilidad. Además, si el sello se rompe agrietándose durante su servicio, es deseable que la fibra exhiba durabilidad y retención de su resistencia al ser expuestas a varios agentes que penetran por las grietas, por ejemplo: agua, productos químicos en solución como sales para el deshielo, aire, luz, etc..

Resumen del uso de fibras.

Como se muestra en la Tabla #1, en vista de esta extensa lista de características deseables, pocas fibras son perfectas en todos los aspectos. En operaciones comerciales hasta la fecha, únicamente fibras de acero, de vidrio (un tipo especialmente desarrollado que es resistente a los álcalis llamado Ceni-F12), y fibras de polipropileno se han utilizado con cierta amplitud, aunque los polímeros de alto módulo PRD-29 y PRD-49 ofrecen un alto potencial interesante. Las razones no son difíciles de comprender. Las fibras de acero califican bien en casi todos los casos (Tabla #1) con alguna duda únicamente en la durabilidad al post-agrietamiento. Las fibras de vidrio son fácilmente dañadas en el proceso de mezclado convencional, y su estabilidad química de larga duración en el cemento aún está en duda. Por eso su aprovechamiento, aunque substancial en la elaboración por medio de bomba de asperción de una base delgada de pasta de cemento donde las consecuencias de una falla son menores (1), aún no se ha extendido en el concreto. Las fibras de polipropileno tienen poco efecto reforzante debido a su bajo módulo, pero ofrecen excelente durabilidad y resistencia al post-agrietamiento, y por eso se han mostrado útiles en situaciones que incluyen cargas de impacto y resistencia al resquebrajamiento y desintegración.

Disponibilidad.

Las fibras de acero fueron primero producidas en Norteamérica utilizando alambre de 0.25 mm (0.01 pulgadas) de diámetro que era casi la porción desechada de alambre utilizado en la elaboración de llantas radiales. Después fue introducido el tipo de alambre patentado Duform con una superficie dispereja y deformada con el objeto de mejorar la adherencia interfacial de la misma manera que el refuerzo corrugado es superior a refuerzo convencional. Es evidente ahora que fibras pueden ser producidas más económicamente cortando láminas de acero o vaciando fibras directamente del horno. Las fibras cortadas de hoja de lámina de acero al alcance del solicitante en los Estados Unidos, Canadá, Australia y Japón. Las fibras obtenidas por fusión del metal se están produciendo de acero inoxidable para un mezclado específico en Estados Unidos de productos refractarios de concreto, pero problemas relacionados con la oxidación y otros factores han impedido la pro-

TABLA 1  
RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS MÁS IMPORTANTES DE LA FIBRA

Tipo de fibra	Esfuerzo de tensión en kg/cm <sup>2</sup> x 10 <sup>3</sup>	Elongación en %	Módulo Young en kg/cm <sup>2</sup> x 10 <sup>6</sup>	Módulo de Poisson en: Poisson	Adherencia con el cemento k/cm <sup>2</sup>	Flujo Plástico	Competibilidad con el concreto		Durabilidad en el concreto agrietado	Costo aprox. \$/lb
							Física (durante el mezclado)	Química (a largo plazo)		
Acero al carbón	3.5-31.6	3-20	2.10	0.30-0.33	> 21.1	Bajo	Excelente	Excelente	Regular	0.25* - 0.30*
Acero Inoxidable	21.1	3	1.69	0.30-0.33	-	Bajo	Excelente	Excelente	Excelente	1.50 - 3.00
Asbesto blanco	31.6	> 3	1.69	-	8.4	Bajo	Pobre	Fuero	Buero	0.06* - 0.10
Asbesto azul	35.2	2-3	1.97	-	32.3	Bajo	Pobre	Buero	Buero	0.07 - 0.11
Algodón	2.8-8.4	5-10	0.06-0.11	-	-	Moderado	Regular	Pobre	Pobre	0.25 - 0.30
Henequén	8.4	2.9	-	-	-	Moderado	-	Pobre	Pobre	0.20 - 0.40
Cáñamo	3.9	1.8	-	-	-	Moderado	-	Pobre	Pobre	0.15 - 0.20
De vidrio	31.6-35.2	2-3.5	0.77	0.22	> 63.3	Bajo	Pobre	Pobre	Pobre	0.40 - 0.50
Tipo E	31.6-28.1	2-3	0.70-0.84	0.22	-	Bajo	Regular	Buero	Buero	0.85
CENI-F12	8.7	13	0.04	0.4-0.5	Pobre	Moderado	Buena	Buero	Buero	0.80
Nylon	8.9	10	0.11	0.4-0.5	Pobre	Moderado	Buena	Pudoso	Pudoso	0.70
Peryleno	6.5	18	0.05	0.4-0.5	Pobre	Moderado	Buena	Buena	Buero	0.70
Polipropileno	4.0	3	0.08	0.4-0.5	Buena	Moderado	Buena	Buena	Buero	0.50
PRD-29	-	-	0.63	-	-	-	-	-	-	-
PRD-49	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(Kevlar) Carbón	28.6	2.6	1.34	-	-	-	-	-	-	3.0 - 8.0
	14.1-31.6	0.4-1.0	2.46-4.57	0.2-0.4	-	Bajo	Regular (como cintas)	Excelente	Excelente	5.0 - 7.0
Alumino-Silicato	-	-	-	-	-	-	-	Pudoso	-	1.10

m - En forma de monofilamentos  
f - En forma fibrosa  
\* - Precio canadiense actual