

### 1. INTRODUCCIÓN

Con el crecimiento en el uso de las fibras para refuerzo de concreto, lo que realmente llama la atención es la variedad de opciones disponibles actualmente, pudiendo generar clasificaciones que distinguen las fibras como: metálicas, macro fibras sintéticas y micro fibras sintéticas. Teniendo presente las diferentes tecnologías, materias primas y desempeño de esos materiales, existe una necesidad del mercado por resultados que comprueben cómo se comportan, para que sean escogidas correctamente en función al tipo de aplicación.

De una manera simplificada, el texto a continuación facilita la comparación de las características físicas, mecánicas, las ventajas y desventajas de cada fibra para cada tipo de aplicación.

### 2. REFUERZO

El concreto reforzado con fibras es un material compuesto donde las fibras quedan distribuidas de manera aleatoria en la matriz cementicia. Estas fibras, cuando son solicitadas estructuralmente actúan transversalmente en las fisuras generando un “puente de transferencia” de tensiones. De esta forma, las fibras controlan la propagación de las fisuras y alteran el comportamiento mecánico del compuesto. En otras palabras, las fibras solo ejercen la función de refuerzo después que inicia la fisuración de la matriz.

En la Tabla 1, se puede observar el comportamiento de diferentes tipos de fibras en diferentes solicitudes:

Tabla 1 - Propiedades de refuerzo de las fibras

|                                                   | Fibras de Acero                       | Micro Fibras Poliméricas | Macro Fibras Poliméricas |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Retracción plástica                               | +                                     | +++                      | +                        |
| Retracción por secado                             | +++                                   | ×                        | ×                        |
| Resistencia al impacto                            | +++                                   | +                        | ++                       |
| Control de fisuración (estado límite de servicio) | +++                                   | ×                        | ×                        |
| Tensión pos-fisuración (estado límite último)     | ++                                    | ×                        | +                        |
| Dependiente de temperatura                        | +                                     | -                        | -                        |
| Dependiente de tiempo                             | +                                     | -                        | -                        |
| Sin ruptura por fluidez                           | +                                     | -                        | -                        |
| Propiedades anti-spalling                         | ×                                     | +++                      | ×                        |
| Resistencia a la fatiga                           | +++                                   | ×                        | +                        |
| Resistencia al fuego                              | +                                     | -                        | -                        |
| Sin manchas (estética)                            | + (*)                                 | +                        | +                        |
| Resistencia a la corrosión                        | + En el concreto<br>+ Fisuras < 0.2mm | +                        | +                        |

+ = Efecto positivo    - = Efecto negativo    × = efecto insignificante    (\*) = galvanizado

## 2.1. Refuerzo para retracción plástica

Posterior al vaciado del compuesto, el concreto comienza a ganar resistencia y rigidez. Durante este periodo inicial, la resistencia a compresión es del orden de 3 MPa, la resistencia a tracción 0.3 MPa y el módulo de elasticidad (Young) es menor que 5 GPa. En este momento, el concreto podría presentar fisuras superficiales. De esta forma, el uso de micro fibras sintéticas posibilita minimizar la fisuración que ocurre en el estado plástico y en las primeras horas de endurecimiento.

## 2.2 Refuerzo para retracción de secado y control de fisuras

Después de 24 horas, las propiedades mecánicas del concreto se multiplican: la resistencia a la compresión excede 10 MPa, la resistencia a la tracción 1 MPa y el módulo de elasticidad (Young) 15 GPa. En estas condiciones el concreto podría presentar fisuras nuevamente ya que ahora estaría sometido a nuevas solicitudes de cargas.

Debido a su bajo modulo de elasticidad (Tabla 2) las macro fibras sintéticas necesitan de fisuras con mayores aberturas para entonces comenzar a desenvolver un estado de tensión útil. Eso se debe al hecho de que las macro fibras presentan un efecto de refuerzo plástico apenas en las primeras 24 horas, cuando la elasticidad es superior al módulo de elasticidad del concreto fresco (Figura 1).

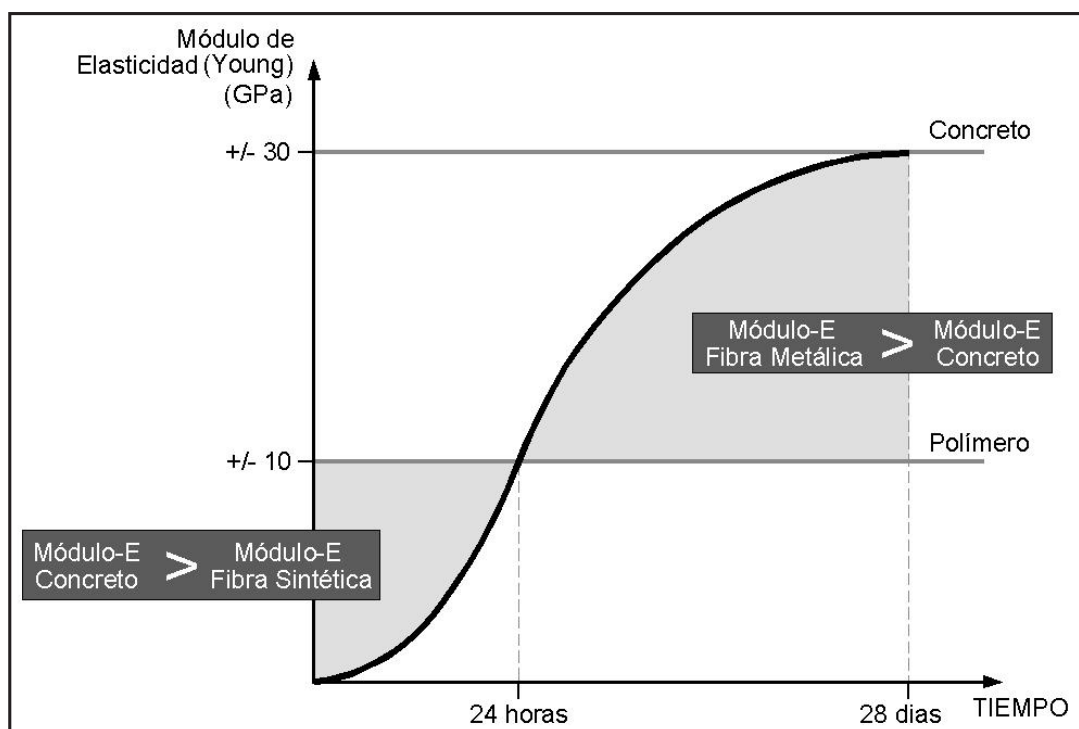


Figura 1 - Gráfico Módulo de Young X Tiempo

Tabla 2- Módulo de elasticidad de los materiales

| Material                | Módulo de Elasticidad (Young) |
|-------------------------|-------------------------------|
| Concreto                | +/- 30 GPa                    |
| Micro fibras sintéticas | +/- 4 GPa                     |
| Macro fibras sintéticas | 3 - 10 GPa                    |
| Fibras de acero         | 210 GPa                       |

Estructuras en concreto reforzado con macro fibras sintéticas, con edad avanzada, presentan fisuras con aberturas mayores que el mismo concreto reforzado con la fibra de acero, pudiendo aún presentar grandes deformaciones y, dependiendo de la carga aplicada, es posible que se generen fallas en la estructura.

### 2.3 Capacidad de carga del refuerzo en Estado Límite de Servicio (ELS), y Estado Límite Último (ELU)

El efecto de refuerzo de las fibras es medido a través de ensayos con métodos estandarizados, como EN14651 y ASTM C 1609 (Figura 2).

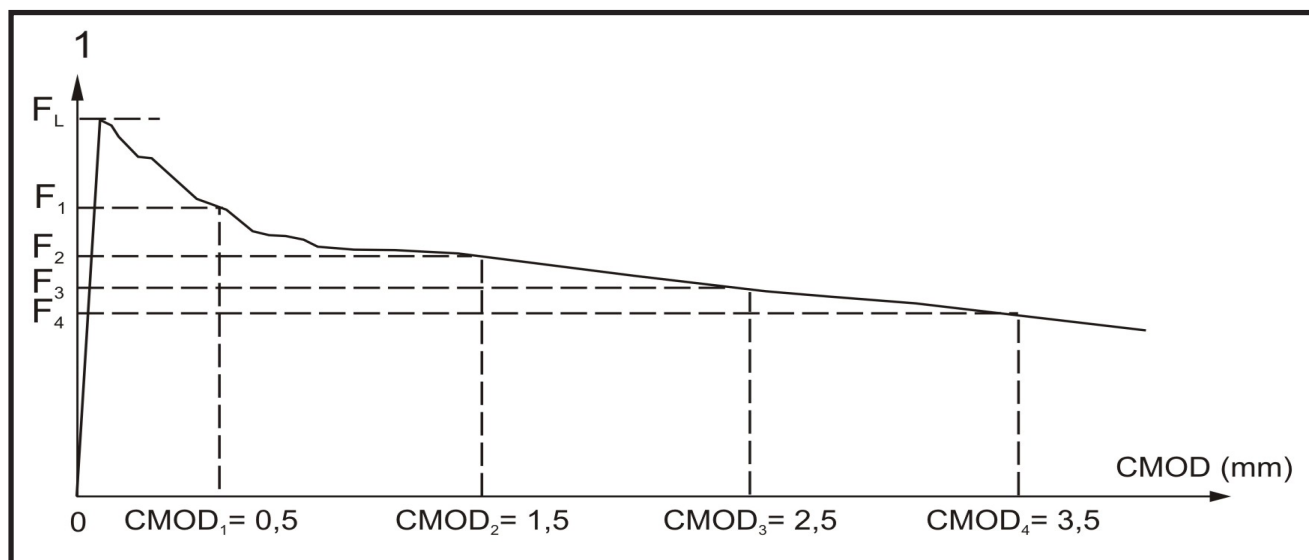


Figura 2 - Gráfico F X CMOD (*Crack Mouth Opening Displacement*)

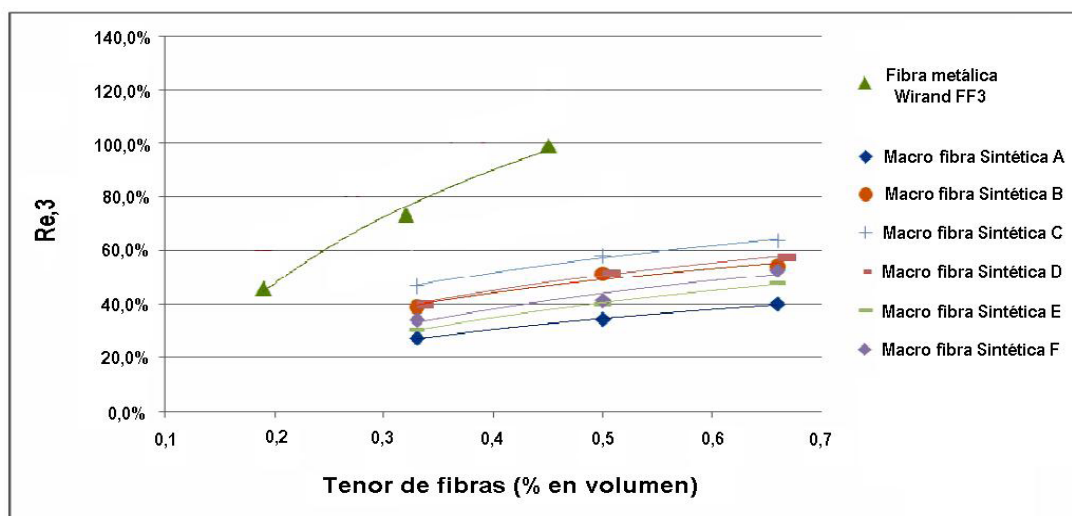
Normalmente, la resistencia pos-fisuración considerando baja abertura de las fisuras ( $CMOD=0.5$  mm) es aplicada en el cálculo ELS, y la tensión pos-fisuración hasta  $CMOD=3$  mm es usada en el cálculo de ELU. Las Fibras de acero y las macro fibras sintéticas se comportan de manera diferente en el ensayo de viga estandarizado (micro fibras sintéticas son muy pequeñas para ofrecer cualquier tipo de efecto de refuerzo, entonces no serán mencionadas). Debido al bajo modulo de elasticidad de las macrofibras sintéticas, el ancho de las fisuras son muy significativas ( $>0.5$  mm) antes de que las fibras comiencen a trabajar. El “efecto refuerzo” de la macro fibras sintéticas, observado en el ensayo de viga estandarizado, debe ser analizado con cuidado: los valores son obtenidos después de 15 minutos (el tiempo de ejecución del ensayo). Para las macro fibras sintéticas, propensas a un comportamiento plástico de fluidez (creep), cabe considerar la necesidad de conocer la materia prima de cada fibra en cuestión, antes de analizar el resultado del ensayo, ya que la misma pueda variar de acuerdo con el fabricante.

### 2.4 Ensayos comparativos

Con el gran crecimiento en el uso de fibras metálicas y poliméricas, surgieron en el mercado, materiales con diferentes formatos, composiciones y desempeños. De esa manera, con la falta de acuerdo entre los fabricantes, proyectistas y consumidores sobre como cuantificar y controlar el desempeño de las fibras, fue necesario la ejecución de un estudio experimental realizado por el Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de Campinas (UNICAMP), donde fueron analizados diversos tipos de fibras de varios fabricantes. La tabla 3 y la Figura 3 presentan los valores medidos de  $Re,3$  (Porcentual de resistencia equivalente a la tracción en la flexión para un desplazamiento de 3 mm) característicos para cada una de las fibras estudiadas:

Tabla 3 - Valores medios de  $R_{e,3}$  característico

| Fibra                      | Dosificación de Fibra (Kg/m <sup>3</sup> ) | $R_{e,3}$ (valor medio) |
|----------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|
| Fibra de Acero Wirand® FF3 | 15                                         | 45,7%                   |
|                            | 25                                         | 73,2%                   |
|                            | 35                                         | 99,2%                   |
| Macro fibra Sintética A    | 3,0                                        | 27,2%                   |
|                            | 4,5                                        | 34,2%                   |
|                            | 6,0                                        | 39,9%                   |
| Macro fibra Sintética B    | 3,0                                        | 38,9%                   |
|                            | 4,5                                        | 51,2%                   |
|                            | 6,0                                        | 54,2%                   |
| Macro fibra Sintética C    | 3,0                                        | 46,7%                   |
|                            | 4,5                                        | 58,0%                   |
|                            | 6,0                                        | 63,7%                   |
| Macro fibra Sintética D    | 3,0                                        | 39,8%                   |
|                            | 4,5                                        | 51,4%                   |
|                            | 6,0                                        | 57,4%                   |
| Macro fibra Sintética E    | 3,0                                        | 30,4%                   |
|                            | 4,5                                        | 39,8%                   |
|                            | 6,0                                        | 47,6%                   |
| Macro fibra Sintética F    | 3,0                                        | 34,1%                   |
|                            | 4,5                                        | 41,3%                   |
|                            | 6,0                                        | 52,7%                   |

Figura 3 - Correlación entre el valor  $R_{e,3}$  y el tenor de fibras (% en volumen), para la fibra metálica Wirand® FF3 y macro fibra sintéticas

Estudios realizados en concretos reforzados con fibras poliméricas deben ser analizados con cautela en relación a algunas características:

1- Las aberturas de las fisuras son bastante acentuada y de comportamiento impredecible hasta la ruptura total de los cuerpos de prueba.

2- Algunas estructuras sufren efecto extremo de la fluidez, con pérdidas acentuadas de la tenacidad después de un pequeño intervalo de tiempo (pocas semanas)

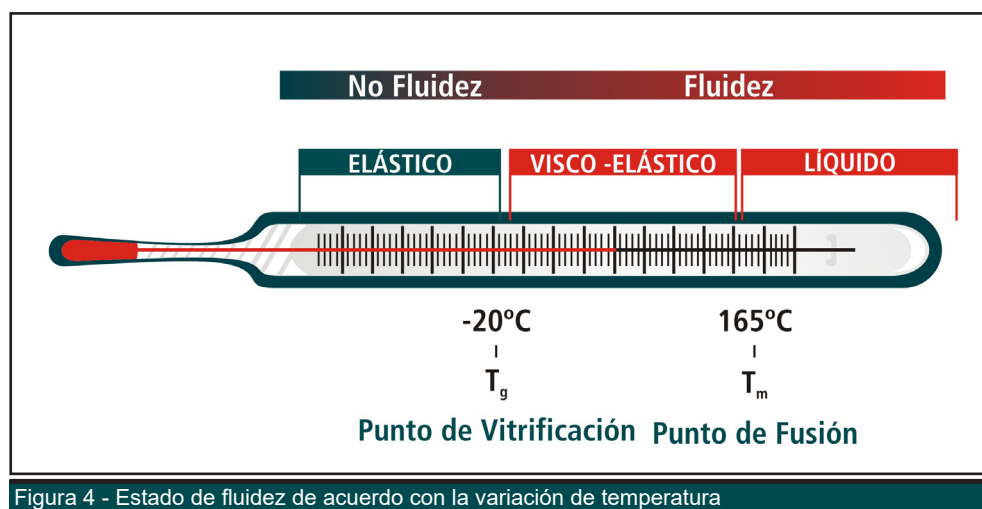
### 3. DEFORMACIÓN LENTA DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS SINTÉTICAS.

Algunas propiedades de las fibras poliméricas, como el comportamiento de las mismas a lo largo del tiempo, han sido estudiadas desde el inicio de su aparición en el mercado. En especial la “deformación lenta”, efecto observado en los polímeros sometidos a esfuerzos que merece especial atención cuando hay posibles características no aceptables que son utilizados en estructuras de concreto. Al reforzar el concreto con fibras poliméricas es

posible obtener un determinado nivel de tenacidad, por eso, a lo largo del tiempo, el efecto de la deformación lenta puede significar la ruptura total de una pieza estructural que está sujeta a cargas. Eso implica que solo las fibras de acero puedan desempeñar la función de refuerzo estructural del concreto.

### 3.1 Comportamiento plástico o de fluidez

Estudios realizados hasta el momento no presentan diferencias relevantes en el comportamiento plástico o de fluidez entre concreto simples y concreto reforzado con fibras de acero (tenor < 1%) cuando son sometidos a compresión a largo plazo. A diferencia de las macro fibras sintéticas, conforme lo indicado a continuación (Figura 4), que presentan comportamiento plástico o de fluidez:



Un material presenta fluidez sí, sobre tensión constante su deformación aumenta con el tiempo.

Figura 4 - Estado de fluidez de acuerdo con la variación de temperatura

**Temperatura inferior a -20°C:** El polipropileno y el polietileno son normalmente elásticos, con un comportamiento plástico o de fluidez poco importante.

**Temperatura entre -20°C y 165°C:** En temperatura ambiente, el polipropileno y el polietileno normalmente son visco-elásticos, con un comportamiento plástico o de fluidez significativo. Este comportamiento es el incremento de la extensión del material sobre una carga constante. La deformación de la fibra no depende únicamente del tiempo sino también de la temperatura.

Siendo así, el comportamiento plástico o de fluidez de la macro fibra sintética, que ocurre en temperaturas entre 20°C y 40°C conduce a:

- Un comportamiento impredecible en la abertura de las fisuras, que aumentará con el pasar del tiempo en caso de carga constante, que afecta la durabilidad de la estructura, su resistencia, impermeabilidad, etc.

- Ruptura de la fibra por comportamiento plástico o de fluidez, sobre todo a niveles de tensión dentro del Estado Límite de Servicio.

- Algunas estructuras sufren efecto externo de fluidez, con pérdidas acentuadas de la tenacidad después de un pequeño intervalo de tiempo (pocas semanas).

De esta forma, estudios realizados en concretos reforzados con fibras poliméricas deben ser analizados con cautela en relación a algunas características citadas en el siguiente tópico.

### 4. CUAL FIBRA UTILIZAR

Diferentes tipos de fibras, diferentes propiedades. La definición de cual tipo de fibra usar varía de acuerdo con la necesidad de cada obra. En la tabla 4 se encuentran descritas algunas características que definen en que caso cada fibra ofrecerá el mejor desempeño.

Tabla 4 - Características y desempeños de las fibras según su uso.

| Características físicas y mecánicas de las fibras | Propiedades                                                                                                      | Concreto                             | Fibra de Acero                                       | Micro / Macro Fibras Sintética<br>Polipropileno extruido / Polietileno |
|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
|                                                   | Coefficiente de expansión térmica                                                                                | $12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ | + $12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$               | - $1.5 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$                                |
|                                                   | Retracción por reducción de temperatura de $30^\circ\text{C}$ en fibra de 50 mm de largo                         | 0.018 mm                             | Retracción insignificante                            | 0.23 mm                                                                |
|                                                   | Comportamiento de fluidez en tensión (Punto de vitrificación)                                                    |                                      | + $+370^\circ\text{C}$                               | - $-20^\circ\text{C}$                                                  |
|                                                   | Temperatura de fusión                                                                                            |                                      | + $1500^\circ\text{C}$                               | - $165^\circ\text{C}$ (deja de actuar como refuerzo)                   |
|                                                   | Módulo de Young                                                                                                  | 30.000 MPa                           | + 210.000 MPa                                        | - 3.000 - 10.000 MPa                                                   |
|                                                   | Resistencia a la tracción                                                                                        |                                      | + 500 - 2.000 Mpa                                    | + 200 - 600 MPa                                                        |
|                                                   | Peso específico                                                                                                  | $2.400 \text{ kg/m}^3$               | - $7.850 \text{ kg/m}^3$                             | + $910 \text{ kg/m}^3$                                                 |
|                                                   | Resistencia a los rayos UV                                                                                       |                                      | +                                                    | - Degradable                                                           |
|                                                   | Resistencia a la corrosión                                                                                       |                                      | + En el concreto y en las fisuras $< 0.2 \text{ mm}$ | +                                                                      |
|                                                   | Largo                                                                                                            |                                      | 30 - 60 mm                                           | Micro: 6 - 20 mm<br>Macro: 30 - 65 mm                                  |
|                                                   | Diámetro                                                                                                         |                                      | 0.5 - 1.0 mm                                         | Micro: 0.015 - 0.030 mm<br>Macro: 0.5 - 1.0 mm                         |
| Indicación de fibras según su uso                 | Refuerzo para retracción plástica                                                                                |                                      |                                                      | + (solo las micro fibras)                                              |
|                                                   | Resistencia contra incendio                                                                                      |                                      | +                                                    | + (solo las micro fibras)                                              |
|                                                   | Refuerzo sin carga<br>Pre-moldados: manejo y transporte<br>Pisos y Pavimentos: temperatura y retracción plástica |                                      | +                                                    | + (solo las macro fibras)                                              |
|                                                   | Revestimiento temporal (túneles y minas), permitiendo gran deformación                                           |                                      | +                                                    | + (solo las macro fibras)                                              |
|                                                   | Control de fisuración                                                                                            |                                      | +                                                    |                                                                        |
|                                                   | Refuerzo estructural                                                                                             |                                      | +                                                    |                                                                        |
|                                                   | Resistencia al impacto                                                                                           |                                      | +                                                    |                                                                        |
|                                                   | Fatiga                                                                                                           |                                      | +                                                    |                                                                        |

+ = Efecto positivo    - = Efecto negativo



El concepto de utilizar concreto y acero en elementos estructurales proporciona una serie de ventajas. Con la elevada resistencia a la tracción del acero la resistencia a compresión del concreto, es posible obtener un nuevo material con características mecánicas diferenciadas al concreto convencional. Además esta interacción permite que el concreto (cuando es alcalino) proteja el acero contra la corrosión y retarde su debilitamiento en caso de incendios. También es interesante notar que poseen coeficientes de expansión térmica que permiten que el acero y el concreto puedan expandir y contraer conjuntamente, justificando la conclusión de que la fibra metálica es la mejor opción cuando la necesidad es obtener un elemento con refuerzo estructural.

### 5. RESISTENCIA CONTRA INCENDIO

Las fibras de acero pueden contribuir en las estructuras de concreto reduciendo el efecto de spalling, además de eso, todas sus propiedades y su nivel de desempeño son mantenidos en temperaturas elevadas de hasta 400°C (Figura 5).

Las fibras sintéticas comienzan a perder sus propiedades físicas y mecánicas en temperaturas superiores a 50°C hasta desintegrarse completamente a los 160°C (Tabla 5).

En el caso de un incendio, una estructura que posee como refuerzo una macro fibra sintética se transformará rápidamente en una estructura no reforzada, perdiendo completamente su capacidad portante. La micro fibras sintéticas tienen una importante contribución en el comportamiento de una estructura de concreto contra los efectos de spalling durante una situación de incendio. Este benéfico puede ser explicado fácilmente, pues en la presencia de fuego, las fibras de polipropileno desaparecen cuando la temperatura alcanza los 165 °C, dejando así espacios vacíos en forma de micro canales.

Tales canales actúan como una válvula de escape para la presión de vapor de agua presente en el concreto, generado por la acción del fuego.

Tabla 5 - Comportamiento de las fibras en relación a la temperatura

| Características               | Tipo de Fibra  |                         |                         |
|-------------------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|
|                               | Fibra de Acero | Macro fibras sintéticas | Micro fibras sintéticas |
| Perdida de desempeño mecánico | 300°C          | 50°C                    | 50°C                    |
| Punto de fusión               | 1500°C         | 160°C                   | 160°C                   |

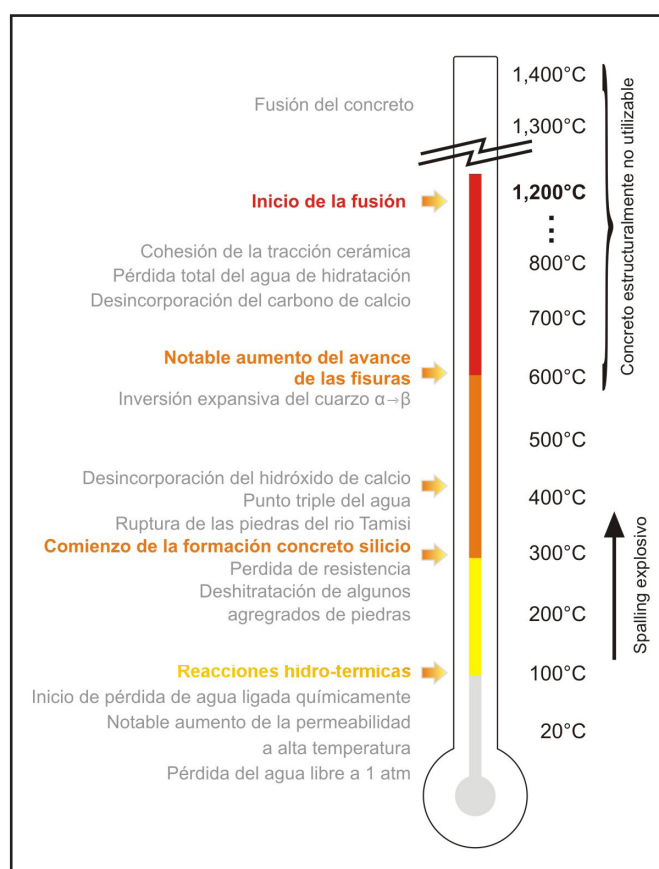


Figura 5 - Reacción físico-química de la estructura de concreto con el incremento de la temperatura.

### 6. RESISTENCIA CONTRA ATAQUES QUÍMICOS O EFECTO DE LA CORROSIÓN

La gran mayoría de las macro y micro fibras sintéticas son resistentes a los agentes agresivos, por ende es importante tomar en cuenta el tipo de materia prima de las fibras, de modo que puedan ser evitados problemas relacionados a los ataques químicos por la presencia de los álcalis del cemento.

El efecto de corrosión en las fibras de acero puede provocar la aparición de un punto de oxidación, perjudicando únicamente el aspecto estético de la estructura, por ende, la misma no es afectada en ninguna de sus propiedades mecánicas.

Los concretos reforzados con fibras de acero en general son menos sensibles a corrosión metálica que el concreto armado tradicional, limitándose en la zona superficial. Este hecho se debe a la distribución aleatoria de las fibras, la discontinuidad y consecuentemente el mejor control de fisuración en toda la matriz de concreto.

## 7. CONCLUSIÓN

En el momento de decidir cual tipo de fibra utilizar es fundamental conocer la función que cada fibra puede desempeñar y lo que se puede esperar de su comportamiento, para que sea posible trabajar con un adecuado tipo de fibra, dosificación y calidad del concreto.

Como es posible observar en los resultados de ensayo de laboratorio de estructuras de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de Campinas (UNICAMP) la resistencia equivalente a la tracción en la flexión (Re,3) del concreto reforzado con macro fibras sintéticas se presenta muy inferior a los resultados del concreto reforzado con fibras de acero.

De esta forma es posible concluir que las macro fibras sintéticas poseen características limitadas al ser consideradas como refuerzo estructural, restringiéndose a usos particulares que requieran apenas aplicaciones de cargas leves y moderadas, o sea, que no soliciten un alto desempeño por parte del elemento de refuerzo.

Por otro lado la micro fibra sintética, de bajo modulo de elasticidad, presenta excelentes características cuando el objetivo es disminuir la exudación y combatir la retracción inicial del concreto, pudiendo así trabajar en conjunto al elemento de refuerzo, inclusive con las fibras metálicas que presentan desempeño inferior durante las primeras edades del concreto.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- EN 14889-1. 2006. Fibras for concrete: Steel fibres - Definitions, specifications and conformity;
- EN 14889-2. 2006. Fibras for concrete: Polymer fibres - Definitions, specifications and conformity;
- The technical performance of steel and polymer based fibre concrete, Ann N. Lambrechts, The Institute of Concrete Technology, Annual Technical Symposium. 2005. Concrete for a New world;
- Steel fibres on synthetic fibres, P. Rossi, LCPC. 2009. Tunnels and Tunnelling International;
- Viscous Material Behaviour of Solids – Creep of Polymer Fibre Reinforced Concrete, Wolfgang Kusterle, Regensburg University of Applied Sciences, Germany, 5th Central European Congress on Concrete Engineering, Baden 2009;
- Brite Euram BRPR - CT 98 - 0813 Project nr: Be 97-4163 ISBN 90-5682 - 358-2, 2002;
- Brite Euram program on steel fibre concrete - Subtask: Durability: corrosion Resistance of Cracked Fibre Reinforced Concrete D. Nemegeer, J. Vanbrabant and H. Stang, Rilem, Proceedings PRO 31 Test and design methods for Steel Fibre Reinforced Concrete. 2003;
- Richtlinie Fa serbeton AuSsgabe. 2008. Österreichische eVreinigung üfr Beton- und Bautechnik;
- Sarzalejo A. G. at all – Manual Técnico Maccaferri “Fibras como elemento estrutural para reforço de concreto” – Brasil. 2009;