

## INDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Planteamiento del problema .....	2
1.2	Objetivos .....	3
1.3	Metodología.....	4
2.	MARCO TEÓRICO .....	5
2.1	Materiales compuestos de cemento reforzados con fibras de vidrio.....	5
2.1.1	Materiales compuestos.....	5
2.1.2	Conceptos generales del comportamiento mecánico de materiales compuestos reforzados con fibra .....	6
2.1.3	Fibra de vidrio.....	11
2.1.4	Morteros de GRC.....	14
2.2	Importancia de la durabilidad de hormigones y morteros.....	18
2.2.1	Acciones de tipo físico.....	19
2.2.2	Acciones de tipo químico.....	21
2.3	Adiciones minerales .....	23
2.3.1	Materiales puzolánicos .....	23
2.3.2	Beneficios del uso de adiciones minerales en cementos y hormigones.....	25
2.3.3	Humo de sílice (HS) .....	26
2.3.4	Catalizador de craqueo catalítico (FCC).....	27
2.3.5	Ceniza volante (CV) .....	28
2.4	Antecedentes sobre morteros de GRC y adiciones activas .....	31
2.5	Bibliografía.....	51
3.	EXPERIMENTAL .....	55
3.1.	Materiales empleados .....	55
3.1.1.	Cemento.....	55
3.1.2.	Filler calizo .....	55
3.1.3.	Fibra de vidrio AR.....	55
3.1.4.	Materiales puzolánicos .....	56
3.1.5.	Árido.....	56
3.1.6.	Agua.....	56
3.1.7.	Aditivos.....	57
3.1.8.	Reactivos.....	57
3.2.	Equipos y procedimientos utilizados .....	58
3.2.1.	Molienda.....	58
3.2.2.	Preparación de los morteros de GRC .....	58
3.2.2.3.	Trabajabilidad .....	60
3.2.3.	Análisis termogravimétrico (ATG).....	61
3.2.4.	Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	64
3.2.5.	Análisis granulométrico por difracción láser .....	65
3.2.6.	Difracción de rayos X (DRX) .....	65
3.2.7.	Proceso de sonicación.....	66
3.2.8.	Ensayos mecánicos .....	67
3.2.9.	Envejecimiento acelerado .....	71
3.2.10.	Absorción de agua y densidad seca.....	72
3.2.11.	Ciclos de humectación - secado .....	72

3.2.12.	Ciclos de hielo – deshielo .....	73
3.2.13.	Exposición ante agentes agresivos.....	73
3.3.	Fases de estudio.....	73
3.4.	Bibliografía.....	75
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	77
4.1.	Caracterización físico - química.....	77
4.1.1.	Materiales puzolánicos .....	77
4.1.2.	Fibra de vidrio álcali resistente .....	84
4.1.3.	Conclusiones.....	88
4.1.4.	Bibliografía .....	88
4.2.	Conocimiento del GRC y adiciones activas. estudios preliminares sobre probetas 4x4x16cm .....	90
4.2.1.	Propiedades mecánicas y comportamiento al envejecimiento .....	90
4.2.2.	Estudio de la microestructura.....	106
4.2.3.	Evolución de la actividad puzolánica.....	109
4.2.4.	Conclusiones.....	115
4.2.5.	Bibliografía .....	118
4.3.	GRC Premezclado: mezcla de fibras y envejecimiento acelerado.....	120
4.3.1.	Propiedades mecánicas de GRC con mezcla de diferentes tipos de fibras 121	
4.3.2.	Efecto del Envejecimiento sobre compuestos de GRC con mezcla de fibras 132	
4.3.3.	Morteros con diferentes fibras y adición de CV .....	136
4.4.	GRC Premezclado y Adiciones Activas: propiedades mecánicas y envejecimiento acelerado .....	142
4.4.1.	Propiedades mecánicas .....	144
4.4.2.	Conclusiones.....	163
4.4.3.	Bibliografía .....	165
4.5.	Compuestos de GRC y adiciones activas: envejecimiento acelerado y durabilidad.....	166
4.5.1.	Caracterización de composites y estudio del envejecimiento .....	168
4.5.1.1.	Porcentaje de absorción y densidad seca .....	169
4.5.1.2.	Propiedades mecánicas .....	170
4.5.1.3.	Exposición de fibras AR a diferentes ambientes agresivos.....	173
4.5.2.	Evaluación del comportamiento de composites sometidos a agresiones físicas 176	
4.5.2.1.	Ciclos de humectación - secado.....	177
4.5.2.2.	Ciclos de hielo-deshielo.....	183
4.5.3.	Evaluación del comportamiento de composites sometidos a agresiones químicas 186	
4.5.3.1.	Exposición de morteros de GRC a disolución de NH <sub>4</sub> Cl.....	187
4.5.3.2.	Exposición de morteros de GRC a disolución de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	191
4.5.4.	Conclusiones.....	195
4.5.4.1.	Porcentaje de absorción y densidad seca .....	195
4.5.4.2.	Exposición de fibras AR a diferentes ambientes agresivos.....	196
4.5.4.3.	Ciclo de humectación-secado.....	196
4.5.4.4.	Ciclos de hielo-deshielo.....	196
4.5.4.5.	Exposición de morteros de GRC a disolución de NH <sub>4</sub> Cl.....	197

4.5.4.6.	Exposición de morteros de GRC a disolución de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	197
4.5.5.	Bibliografía .....	198
4.6.	GRC proyectado: estancia en empresa Saint Gobain Vetrotex España .....	199
4.6.1.	Generalidades sobre el proceso de fabricación .....	201
4.6.2.	Propiedades mecánicas .....	204
4.6.3.	Conclusiones.....	209
4.6.4.	Bibliografía .....	210
5.	CONCLUSIONES GENERALES.....	211
	LISTA DE FIGURAS.....	216
	LISTA DE TABLAS.....	221

## 1. INTRODUCCIÓN

La gestión racional de los residuos surge como una contribución a la protección del medio ambiente, incentivando la reducción en origen de los residuos y priorizando en su reutilización y valorización.

El sector de la construcción resulta ampliamente atractivo para esta práctica, por ser un gran consumidor de materias primas extraídas de la naturaleza; estas actividades se deben realizar garantizando la calidad final del producto y evitando nuevos impactos ambientales.

La ceniza volante (subproducto procedente de las centrales termoeléctricas de carbón), el catalizador gastado de craqueo catalítico (residuo de la industria de la obtención de las naftas de petróleo), y el humo de sílice (subproducto de la fabricación de silicio elemental y aleaciones ferro silíceas en hornos de arco eléctrico) son materiales artificiales de carácter puzolánico, que son estudiados para ser utilizados en la construcción, al objeto de mejorar las características tanto de morteros como hormigones. Con el estudio de morteros de cemento Pórtland con sustitución parcial del cemento por estas puzolanas artificiales, se busca la mejora de las características mecánicas, físicas y químicas de la matriz cementante, lo que representa una mayor durabilidad de los elementos y, en algunos casos, reducción de los costes de fabricación.

Los materiales compuestos son elementos fabricados con el objetivo de mejorar las propiedades que cada uno de sus componentes presentan por separado, o bien generar o activar características no aprovechadas para un mejor comportamiento. En el caso de los hormigones y más específicamente de los morteros, se busca con la inclusión de las fibras generar un material compuesto que permita favorecer su comportamiento mecánico, confiriéndole mejoras en las resistencias a compresión, flexión, tracción e impacto. De acuerdo con el tipo de material y su uso, se define el tipo de fibra a utilizar, éstas pueden ser de vidrio, plástico, carbono y acero entre otras.

Las fibras de vidrio presentan una gran facilidad de trabajo y gran manejabilidad conjugada a un carácter inocuo y seguro [1]. En los morteros de cemento Pórtland se recomienda utilizar fibras de vidrio álcali resistentes debido al ambiente alcalino presente en la matriz cementante; éstas le confieren al mortero mejoras en sus propiedades mecánicas, pero aparentemente presentan problemas de durabilidad. El material compuesto resultante, es decir, el mortero de cemento reforzado con fibras de vidrio álcali-resistentes (AR), se conoce por las siglas GRC, correspondientes a la denominación inglesa "Glass Fibre Reinforced Cement".

Con la sustitución parcial del cemento por puzolanas en los morteros de GRC, se busca la mejora de las propiedades mecánicas, físicas y químicas de la matriz cementante, para incrementar la durabilidad de los elementos fabricados con este composite. En este trabajo se presentan los estudios realizados sobre morteros de GRC con diferentes adiciones, evaluando sus componentes, dosificaciones y su comportamiento ante procesos de carga y envejecimiento controlado.

## **1.1 Planteamiento del problema**

El GRC es un material compuesto formado claramente por dos fases, el mortero de cemento Pórtland que actúa como matriz, y la fibra de vidrio AR que actúa como fase dispersa. Las propiedades de este material son función de las propiedades de cada una de las fases y de la manera como éstas interactúan entre sí.

Son conocidas las propiedades mecánicas que presentan los materiales compuestos de matriz cementante GRC: la adherencia de las fibras y su distribución en tres dimensiones en la matriz cementante permite soportar los esfuerzos de tracción en los morteros, disminuye y controla la fisuración, y mejora la tenacidad de los elementos debido al tipo de fallo que sufre la fibra, el cual es primero por deslizamiento y no por rotura [2]. La respuesta de estos composites ante cargas de tracción y flexión es excelente a edades jóvenes, pero se ve afectada con el tiempo por envejecimiento de las fibras [3]; el deterioro de sus propiedades se manifiesta en una reducción del comportamiento mecánico, afectando a su durabilidad.

Aunque las fibras AR ricas en óxido de circonio pueden soportar ambientes alcalinos como el que se presenta en la matriz cementante, temperaturas y humedades altas pueden afectar su comportamiento; el medio altamente alcalino y la frecuente acumulación de hidróxido cálcico en los espacios entre las fibras son factores que contrarrestan las condiciones de durabilidad de este tipo de morteros [2]. Se ha observado que la fibra AR sufre un ataque por parte de los productos que se generan durante la hidratación del cemento [4], los cristales de hidróxido cálcico se incrustan en la fibra alterando sus propiedades físicas. Estos factores son responsables en gran medida de la pérdida de las propiedades del composite, como la disminución de tenacidad y de la resistencia a flexión [5]. Además, se genera una reacción química en la interfase entre la fibra y la matriz cementante (hidroxilación) que produce una pérdida de masa por parte de la fibra [6, 7].

De acuerdo con la aplicación que se dé a los diferentes elementos fabricados con GRC, éstos estarán sometidos a diferentes agresiones dependiendo del medio en el que se encuentren; pueden ser afectados por agentes físicos o químicos, externos o internos, los

cuales pueden producir erosiones, fisuras y expansiones de carácter nocivo para el composite. Los agentes físicos tales como los procesos de desecación y las acciones de hielo-deshielo, se presentan cuando los materiales están a la intemperie expuestos a los cambios climáticos y cuando son sometidos a la acción del agua en movimiento, generando un desgaste superficial. En el entorno del composite, podemos encontrar sulfatos, cloruros o ácidos, entre otros, que afectan a la matriz cementante causando pérdida de masa o su hinchamiento y rotura. La respuesta de la matriz cementante ante este tipo de agresiones depende en gran medida del porcentaje de absorción, del grado de porosidad y de la evolución y naturaleza de la matriz cementante, lo cual permitirá en menor o mayor medida la penetración de estos agentes y su reacción perjudicial con los componentes de la matriz [8].

## **1.2. Objetivos**

Estudiar la influencia de la sustitución parcial del cemento por diferentes materiales puzolánicos en morteros de GRC, que permitan modificar y mejorar la matriz cementante y su interfase con la fibra de vidrio AR. De esa forma se pretende mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad de estos compuestos, al ser sometidos a diferentes procesos de agresión y envejecimiento. Para conseguir el objetivo general del estudio, es necesario cumplir con los siguientes objetivos específicos:

- Realizar la caracterización físico - química de los materiales constituyentes de los morteros de GRC con adiciones puzolánicas.
- Evaluar los productos de hidratación y las diferentes fases cristalinas, productos de la reacción de la portlandita con las puzolanas, presentes en las pastas que componen la matriz cementante.
- Determinar el comportamiento mecánico, resistencias a compresión, flexión e impacto, de los diferentes morteros de GRC, y su respuesta a procesos de envejecimiento controlados.
- Estudiar la modificación de la interfase entre la fibra AR y la matriz cementante, por la acción de la reacción de las puzolanas con el cemento.
- Corroborar el estado de álcali-resistencia de las fibras de vidrio AR, al ser sometidas a un medio altamente alcalino como es la matriz de cemento Pórtland.
- Evaluar el comportamiento de los morteros de GRC planteados y de sus materiales constituyentes, al ser expuestos ante la acción de agentes agresivos físicos, químicos o fisicoquímicos.

### 1.3. Metodología

Las propiedades del GRC dependen de las propiedades de cada una de las fases, la fase matriz que conforma el mortero de cemento Pórtland y la fase dispersa que conforma el conjunto de fibras, y de la manera como éstas interactúan entre sí. Con la inclusión de las fibras de vidrio álcali-resistentes (fibras AR) se busca generar un material compuesto que permita favorecer su comportamiento mecánico, confiriéndole mejoras especialmente en las resistencias a flexión, tracción e impacto. Con la sustitución parcial del cemento por puzolanas se trata de mejorar, además de sus características mecánicas del mortero de cemento Pórtland, las características físicas y químicas de la matriz cementante lo cual representa un incremento en la durabilidad de los elementos fabricados con GRC. Se pretende evaluar el comportamiento de los morteros a edades mayores, sometidos a procesos controlados de envejecimiento y de ataque mediante agentes físicos o químicos en diferentes medios agresivos.

Al sustituir parte del cemento por la ceniza volante (CV), que es una puzolana que reacciona a tiempos largos con el hidróxido cálcico, por el catalizador de craqueo catalítico (FCC) y el humo de sílice (HS), los cuales reaccionan a tiempos más cortos, se pretende generar una mayor cantidad de silicatos, aluminatos y silicoaluminatos cálcicos hidratados, para disminuir el porcentaje de portlandita presente alrededor de las fibras; también se reduce el calor de hidratación de la mezcla cementante evitando así problemas por fenómenos térmicos; se incrementa la trabajabilidad de la mezcla debido al efecto lubricante de la CV, por estar formada por partículas en su mayor parte esféricas, compactas y lisas. Todas estas características permiten mejorar el estado de la interfase fibra-matriz cementante [9].

En este trabajo se exponen los resultados del comportamiento mecánico (resistencia a flexión, compresión e impacto), y químico (nivel de formación de productos de hidratación y su naturaleza) de morteros de GRC fabricados con cemento Pórtland sustituido por puzolanas en diferentes porcentajes y fibras álcali-resistentes. Se plantearon dosificaciones combinando los diferentes materiales puzolánicos antes mencionados con una relación agua/material cementante de 0,35 (entiéndase material cementante como la mezcla de cemento más adición puzolánica), una relación árido/material cementante de 0,67, con un contenido en fibra AR del 3% del total del peso del mortero y la cantidad de aditivo de acuerdo con las condiciones de trabajabilidad óptimas.

Se determinaron dos procesos de curado, el primero durante 28 días a 20°C para los morteros control y con sustitución puzolánica; el segundo, sólo para un grupo de probetas

con sustitución puzolánica, se curaron durante 7 días a 20°C y luego 21 días sumergidas en agua a 55°C, para acelerar la reacción puzolánica y el desarrollo de su resistencia. Posteriormente se sometieron a diferentes procesos controlados de ataque mediante agentes físicos y químicos en diferentes medios agresivos: ciclos de humectación – secado, hielo-deshielo y exposición ante agentes químicos agresivos, por inmersión en diferentes disoluciones. Paralelamente se realizó el proceso de envejecimiento sobre pastas sin fibras con igual relación agua/material cementante y los mismos porcentajes de sustitución, estudiándose la evolución de la reacción puzolánica mediante termogravimetría e identificando los productos hidratados mediante microscopía electrónica; adicionalmente se evaluó el estado de la fibra después de ser sometida a los procesos planteados fuera de la matriz cementante.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Materiales compuestos de cemento reforzados con fibras de vidrio**

#### **2.1.1 *Materiales compuestos***

Se considera que un material compuesto es un material multifase que conserva una proporción significativa de las propiedades de las fases constituyentes, de manera que presente la mejor combinación posible [10]. De acuerdo con este principio, las mejores propiedades se obtienen con la combinación de dos o más materiales diferentes. El gran número de materiales compuestos que existe en la actualidad se ha creado para obtener mejoras en la combinación de propiedades mecánicas tales como rigidez, tenacidad y resistencia a la tracción y flexión, en condiciones ambientales normales y a elevadas temperaturas.

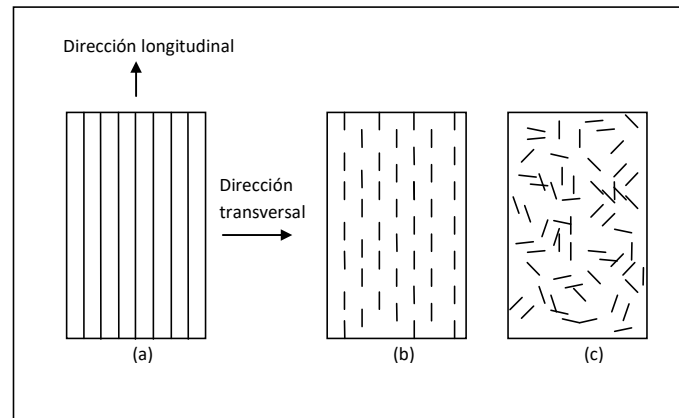
Generalmente están formados por dos fases: la matriz, que es continua y rodea a la otra fase, que se denomina fase dispersa; las propiedades de los compuestos son función de las propiedades de las fases, de sus proporciones relativas y de la forma, tamaño, distribución y orientación de la fase dispersa. La fase dispersa presenta generalmente mayor dureza y resistencia que la matriz; está formada por las partículas de refuerzo que tienden a restringir el movimiento de la matriz, en nuestro caso estas partículas son las fibras; es decir, la matriz transfiere el esfuerzo aplicado a las partículas, las cuales soportan una parte de la carga. El nivel de resistencia o la mejora presente en el compuesto se debe a la fuerza de cohesión en la interfase matriz-partícula.



## 2.1.2 Conceptos generales del comportamiento mecánico de materiales compuestos reforzados con fibra

### 2.1.2.1 Influencia de la orientación y de la concentración de la fibra

La fase de refuerzo de los materiales compuestos obtiene su mejor comportamiento mecánico cuando se usan las fibras, debido a esto su amplia utilización. Las fibras pueden ser continuas o discontinuas, y estar alineadas o con orientación aleatoria (figura 2.1.1).



**Figura 2.1.1. Representación esquemática de compuestos reforzados con fibras: (a) fibras continuas y alineadas, (b) fibras discontinuas y alineadas, (c) fibras discontinuas con orientación aleatoria [10].**

Se ha observado que la resistencia de un material compuesto con fibras discontinuas alineadas, siempre es menor que la de un material compuesto con fibras continuas alineadas cuando la fracción de volumen de las fibras es igual; sin embargo, mientras más largas sean las fibras más resistente será el material, incluso acercándose a la de un material compuesto continuo [10]. Cuando las fibras están sometidas a esfuerzos multidireccionales, generalmente se utilizan fibras discontinuas con orientación aleatoria; aunque la eficiencia del refuerzo de estos compuestos es menor que la de los compuestos cuyas fibras están alineadas en dirección longitudinal (tabla 2.1.1), sus propiedades mecánicas son isotrópicas [11].

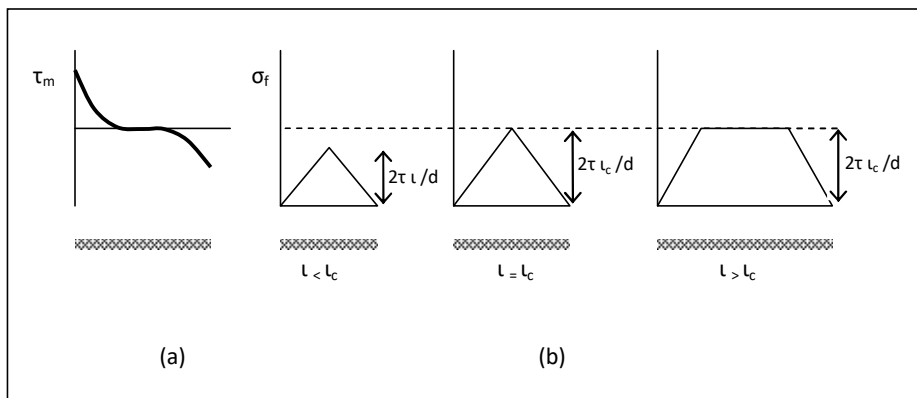
La producción de las fibras discontinuas es más rápida, menos costosa y permite la producción de elementos con formas especiales, imposibles con refuerzos de fibras continuas; estos aspectos deben contemplarse al seleccionar la longitud y orientación de las fibras, además del tipo de esfuerzo al que estará sometido el compuesto.

**Tabla 2.1.1. Eficiencia del reforzamiento de compuestos con fibras orientadas en varias direcciones. [10].**

Orientación de la fibra	Dirección del esfuerzo	Factor de eficiencia por orientación
Todas las fibras paralelas	Paralela a las fibras	1
	Perpendicular a las fibras	0
Fibras orientadas al azar y uniformemente distribuidas en un plano específico	Cualquier dirección en el plano de las fibras	3/8
Fibras orientadas al azar y uniformemente distribuidas en el espacio de tres dimensiones	Cualquier dirección	1/5

**2.1.2.2 Influencia de la longitud de la fibra**

Las características mecánicas de los materiales compuestos dependen de las propiedades de la fibra y del grado de transmisión de la carga aplicada al refuerzo a través de la fase matriz. En el caso de compuestos con fibras discontinuas, en el proceso de transmisión de carga, cobra importancia la resistencia de la interfase matriz - fibra.



**Figura 2.1.2. (a) esfuerzo de corte en la matriz, (b) esfuerzo de tensión en la fibra en función de la longitud de la fibra [10].**

La diferente deformación entre las fibras y la matriz produce un esfuerzo de corte en la matriz, en la interfase matriz-fibra en dirección paralela a las fibras. Esta tensión ( $\tau_m$ ) tiene un máximo en los extremos de la fibra y un mínimo en la parte media de la misma (figura 2.1.2a). A su vez el esfuerzo de corte produce una tensión en las fibras ( $\sigma_f$ ), que tiene un valor de cero en los extremos y aumenta hacia el medio de la fibra (figura 2.1.2b); este esfuerzo es proporcional a la longitud de la fibra y llega a su valor máximo para una longitud crítica de la fibra ( $l_c$ ). Esta  $l_c$  está relacionada con la resistencia al corte de la matriz ( $\tau_m$ ), con la resistencia a la tensión de las fibras ( $\sigma_f$ ) y con el diámetro de las fibras

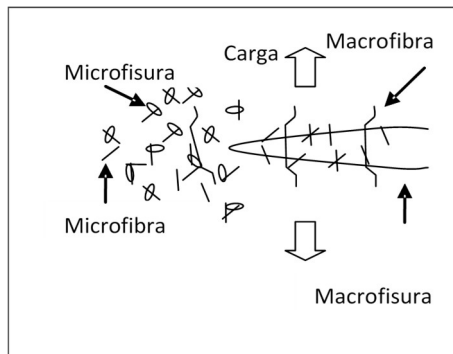
(d) [10]. De acuerdo con la longitud de la fibra se pueden presentar diferentes mecanismos de falla del compuesto:

- Cuando la longitud de la fibra es menor a la longitud crítica ( $l < l_c$ ) el esfuerzo no será suficiente para fracturar la fibra, se presentará primero el fallo de la matriz y la interfase o la falla por pull out (extracción de la fibra).
- Cuando la longitud de la fibra equivale a la longitud crítica ( $l = l_c$ ), el pico de esfuerzo o esfuerzo máximo puede ser justo para generar la rotura de la fibra.
- Cuando la longitud de la fibra es mayor a la longitud crítica ( $l > l_c$ ), el esfuerzo máximo afecta la zona central de la fibra generando su rotura.

### 2.1.2.3 *Influencia de la fase matriz*

La resistencia a la ruptura de los sólidos es fuerte, pero es sensible a la presencia de grietas. Un material con fibras discontinuas, las únicas grietas importantes necesariamente serán cortas a través del ancho de la fibra, y se limitarán a las fibras en las cuales existan [10]. Por tanto, es de esperar que un sólido constituido por fibras presente mayor resistencia a la fractura, que sólo se presenta si se rompen un gran número de aquellas (figura 2.1.3). Además, si se emplea una matriz adecuada, se pueden mantener juntas y al mismo tiempo proteger sus superficies contra daños debidos a la abrasión. La fase matriz ejerce varias funciones en el material compuesto:

- Unir las fibras y actuar como medio de distribución y transmisión de los esfuerzos a las fibras.
- El módulo de elasticidad de la matriz debe ser menor al de la fibra, de esa forma, al tratarse de un material con relativa plasticidad y blandura, actúa de barrera de separación entre las fibras evitando la propagación de fisuras entre las fibras, generando un material dúctil.
- Proteger las fibras del deterioro superficial que resulta de la abrasión mecánica o de reacciones químicas con el medio.



**Figura 2.1.3. Escala relativa de la fisura con interacción de la fibra [32].**

#### 2.1.2.4 Anisotropía

Cuando un material compuesto presenta las fibras alineadas, y el esfuerzo es aplicado en dirección normal al eje de las fibras, el compuesto es débil y presenta una resistencia transversal baja. La resistencia transversal de las fibras generalmente es menor que la resistencia de la matriz y en este caso, las fibras ejercen un efecto negativo en el compuesto. Cuando un material tiene propiedades que varían según la orientación se dice que es anisotrópico [10].

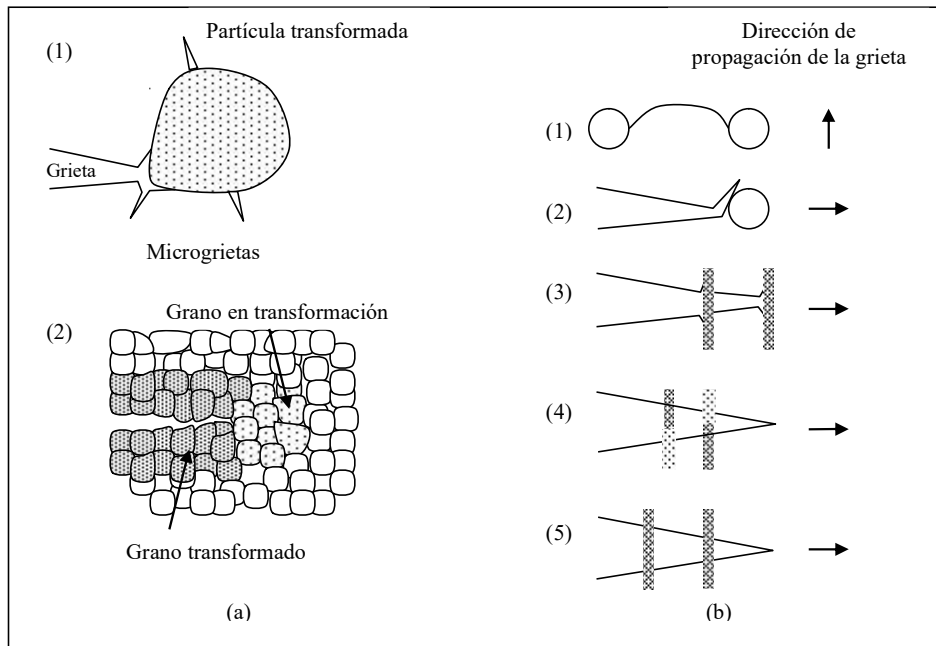
Materiales compuestos con fibras alineadas son anisotrópicos, propiedad poco deseada ya que genera limitaciones para su aplicación. Se puede considerar como solución a este problema la orientación aleatoria de las fibras. Se genera un material con propiedades isotrópicas, aunque sus propiedades son menores a las de un compuesto con fibras alineadas [10] (siempre y cuando el material se someta a esfuerzos en la dirección del eje de la fibra, con la misma fracción volumétrica de fibras).

#### 2.1.2.5 Endurecimiento

Varios son los mecanismos de endurecimiento que actúan en los materiales compuestos, el endurecimiento por transformación y por formación de microgrietas que se presenta en la matriz, y el endurecimiento por estela o puentes de fibra que se da entre la matriz y la fibra [10].

Durante el endurecimiento de la matriz cementante, se generan microgrietas alrededor de las partículas de árido; es decir, en la liberación del calor de hidratación, se genera una distribución fina de microgrietas que al unirse pueden generar grietas que pueden afectar la resistencia de la matriz. El endurecimiento por transformación se da cuando una partícula se convierte en la punta de la grieta, impidiendo su avance; este mecanismo no afecta la resistencia (figura 2.1.4a). Cuando en la matriz se producen grietas se genera

cierto grado de desunión, con la presencia de las fibras se formará un puente en las caras de la estela de la grieta que se propaga; para que la grieta continúe propagándose las caras deben abrirse, pero esto se ve impedido por el puente que forma la fibra, la cual tiene que deformarse de forma elástica o deslizarse (pull out) retrasando el avance de la grieta (figura 2.1.4b).



**Figura 2.1.4. Mecanismos de endurecimiento en compuestos: (a) endurecimiento por transformación, (b) endurecimiento por estela: (1) curvatura de grietas, (2) desviación de grietas, (3) desunión, (4) extracción de fibras, (5) endurecimiento de estela [10].**

#### 2.1.2.6 Tenacidad

La tenacidad de un material es una medida de la energía absorbida por unidad de área agrietada. Es el resultado de la interacción de la fibra y la matriz. En las zonas agrietadas donde se forma el puente entre la fibra y la matriz, la fibra se puede romper o deslizarse y desprenderse progresivamente (pull out). Todo esto influye sobre la cantidad de energía absorbida en la propagación de la grieta y depende de la adherencia de la fibra a la matriz [10] [11].

El trabajo realizado por cada fibra durante el agrietamiento incrementará la absorción de energía aumentando la tenacidad. Si se quiere obtener una tenacidad alta, la fibra debe ser fuerte y la matriz se debe fracturar antes, el módulo de elasticidad de la fibra debe ser mayor al de la matriz. En el agrietamiento de la matriz se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Cuando el volumen de fibra es bajo, el compuesto se fracturará inmediatamente después de la matriz, y la resistencia de rotura del compuesto será similar a la de ésta, por separado.
- Con un volumen de fibras adecuado, después del agrietamiento de la matriz, el compuesto resiste cargas menores a la de rotura, es decir, se generará un comportamiento dúctil.
- Si el volumen de fibras es lo suficientemente alto, después del agrietamiento, las fibras resistirán cargas mayores por más tiempo, es decir, se generará un comportamiento tenaz.

### 2.1.3 *Fibra de vidrio*

Se constituye como uno de los materiales más utilizados como refuerzo en los materiales compuestos. Su composición fundamental es la sílice asociada a diversos óxidos: alúmina, alcalinos y alcalinotérreos; la mezcla de estos componentes por fusión y los procesos posteriores de fibrado y ensimado, permiten obtener un material de excelente adherencia fibra-matriz, con buenas propiedades dieléctricas y una relación de costes benéfica si se compara con otros materiales [12]. A continuación, se describe el proceso de fabricación de la fibra de vidrio:

- Se introduce en el horno de fusión la mezcla homogénea de las materias primas finamente molidas y dosificadas con precisión, y posteriormente se calientan a una temperatura que depende de la composición específica de cada tipo de fibra (1500°C aproximadamente).
- Luego de fundir el vidrio en el horno, se distribuye en canales que alimentan series de hileras (cada una compuesta por 400 a 4000 agujeros calibrados, entre 2 y 8 milímetros de diámetro) a una temperatura de 1250°C necesaria para el colado por gravedad para generar barras de milímetros de diámetro.
- A la salida de la hilera el vidrio es estirado a gran velocidad (entre 10 y 60 m/seg) y es enfriado primero por radiación y luego por pulverización de agua. El resultado de este proceso son filamentos de varias micras de diámetro por cada agujero.
- Los filamentos obtenidos no son utilizables debido a que no presentan cohesión y son vulnerables a la abrasión y a los ataques del agua, para contrarrestar estos defectos y conformar la fibra en función de su utilización, es necesario revestir los filamentos con una fina capa de ensimaje; éste es depositado a una temperatura de entre 80 y 120°C.
- Finalmente se procede a agrupar las fibras en unidades de acuerdo con los productos comerciales y finalmente se exponen a dispositivos de secado para eliminar el exceso de agua que conlleva el ensimaje.

### 2.1.3.1 Ensimaje

Dispersión acuosa de diversos compuestos químicos (tabla 2.1.2), que tiene por función generar una fina película encargada de revestir y agrupar los filamentos que componen las fibras; de acuerdo con el tipo de fibra, su aplicación y su disposición comercial se determina la combinación fibra- ensimaje [12]. La necesidad primordial del ensimaje es la de fortalecer el conjunto de la fibra de vidrio compuesto por cientos de filamentos, brindándole cohesión a los filamentos, aumentando o disminuyendo la rigidez y brindar protección contra la abrasión; sin él, la fibra presentaría los siguientes problemas [12]:

- Falta de cohesión entre filamentos.
- Sin resistencia a la abrasión entre filamentos y con superficies externas.
- Vulnerable al ataque del agua.
- Generación de cargas electrostáticas.
- Limitación para unirse químicamente a la matriz.
- No se adapta a los procesos de transformación.

**Tabla 2.1.2. Principales componentes del ensimaje [12].**

Constituyente	Porcentaje	Naturaleza química	Función
Líquido vector	85 -95	Agua	Soporte
Agentes filmógenos colantes	3 – 15	Acetatos, poliésteres, epoxi, copolímeros	Integridad, rigidez, protección, impregnación
Agentes lubricantes	0,05 - 2	Aminas con radicales grasos, oxialcoholamidas, sales de amonio cuaternario	Protección y lubricación
Agentes de puente	0,1 – 0,5	Silanos	Unión a la resina, resistencia, envejecimiento
Agentes antiestáticos	0,2 - 1	Sulfonatos de alquilarilo, sales de amonio cuaternario	Eliminar o reducir la electricidad estática

### 2.1.3.2 Fibra de vidrio E

El vidrio E es de los más usados en la industria, algunos ejemplos de su utilización son el aislamiento de conductores eléctricos, la fabricación de barnices y resinas sintéticas y de forma importante en la industria textil; adicionalmente ha sido ampliamente utilizada por la industria en la fabricación de materiales compuestos, donde ha llegado a representar cerca del 90% de los refuerzos utilizados [12]. En la tabla 2.1.3 se muestran los componentes más importantes de las fibras compuestas por vidrio E.

Sin embargo, las fibras de vidrio E presentan un grave inconveniente, el de ser atacadas por los álcalis cuando se utiliza como refuerzo de morteros de cemento Pórtland. Para evitarlo se puede recurrir a varios procedimientos: empleo de vidrios E con cementos ricos en alúmina y de bajo pH, vidrio E revestido con una película de resinas epoxídicas o empleándolo con cementos siderúrgicos, vidrio E con cementos de alto contenido en alúmina y añadiendo a la pasta un polímero [13]. Las soluciones sólo son adecuadas si los morteros no están sometidos a la acción de ambientes muy húmedos y si las temperaturas no son elevadas.

**Tabla 2.1.3. Componentes del vidrio E [12].**

Componente	Fórmula Química	Porcentaje
Sílice	SiO <sub>2</sub>	53-54
Cal	CaO	20 - 24
Magnesio	MgO	
Alúmina	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14 – 15,5
Óxido de Boro	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,5 - 9
Óxidos de Zirconio, sodio, potasio, hierro, titanio		≤ 1

### 2.1.3.2 Fibra de vidrio álcali-resistente

Si se opta por las fibras de vidrio álcali-resistente (AR) para generar el material compuesto, se obtienen los compuestos conocidos como GRC “Glass Fibre Reinforced Cement”; éste es el nombre comercial con el que se conocen a los composites formados por morteros de cemento reforzados con fibras de vidrio AR. La industria ha desarrollado un tipo de fibra con la capacidad de resistir este tipo de ambientes, se trata de las fibras compuestas por vidrio A con un alto contenido en álcalis y vidrio R con elevadas características mecánicas (resistencia a la tracción y elevado módulo de elasticidad) [12]; la fusión de estos componentes genera el vidrio AR, cuya principal característica es el álcali resistencia.

**Tabla 2.1.4. Componentes del vidrio álcali-resistente [14].**

Componente	Fórmula Química	Porcentaje
Sílice	SiO <sub>2</sub>	55-75
Óxido de Zirconio	ZrO <sub>2</sub>	15-20
Óxido de Sodio	Na <sub>2</sub> O	11-21
Alúmina	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0-5
Óxido de Litio	Li <sub>2</sub> O	0-5

Las fibras de vidrio álcali-resistentes son el principal componente de los morteros de GRC, tiene un diámetro que varía entre 14 y 20 µm y están compuestas aproximadamente por 200 filamentos; gracias a ellas se logran las características que distinguen a este



material, especialmente por sus componentes donde destaca el circonio que le proporciona la cualidad de álcali-resistencia (tabla 2.1.4) y por sus propiedades mecánicas (tabla 2.1.5) [14].

**Tabla 2.1.5. Propiedades mecánicas de la fibra de vidrio AR [14].**

Propiedades	Vidrio AR
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2,68
Resistencia a la tensión (MPa)	3500
Módulo Elástico (GPa)	72
Elongación hasta la rotura (%)	4,3

## 2.1.4 Morteros de GRC

### 2.1.4.1 Elementos constituyentes

Generalmente los morteros de GRC se componen de cemento, arena silíceo, agua, aditivos y fibra de vidrio AR; cada uno de estos componentes se agrega dependiendo de las propiedades del producto final que se quiera obtener o del proceso de fabricación elegido. Se distinguen dos métodos de fabricación, el proceso de proyección simultánea y el premix. En la proyección simultánea se utilizan porcentajes de fibra del 5% del peso del total de la mezcla, y relaciones agua/cemento entre 0,30 y 0,35 y árido/cemento de 1. En el proceso de premix o premezcla se utilizan porcentajes de fibra del 3%, y relaciones agua/cemento de 0,35 y árido/cemento de 1 [1, 134]. Dependiendo de la proporción y longitud de las fibras, éstas pueden generar en los morteros de GRC diferentes características [1]:

- Proporciones bajas, disminuyen la segregación de materiales y evitan la microfisuración, proporcionando dureza y resistencia a los choques.
- Cuando se presentan entre el 1 y el 2%, su uso ideal es en mezclas armadas, reduciendo la densidad de los productos fabricados.
- Cuando se presentan entre el 2 y 3,5%, sirven de refuerzo primario en productos moldeados y vibrados de bajo costo.
- Cuando se utiliza un 5%, se incluyen en materiales que requieren gran resistencia.
- Fibras muy largas pueden dar problemas de amasado, de destrucción y deterioro superficial de la fibra por abrasión; la longitud utilizada para el proceso de premix está entre 6 y 24mm, siendo la de 12mm la de mejores prestaciones; en el proceso de proyección simultánea, la longitud ideal oscila entre los 30 y 45mm.

#### 2.1.4.2 Proceso de proyección simultánea

Los sistemas de proyección simultánea son utilizados cuando se requieren elementos de gran tamaño y resistencia; este proceso consiste en la proyección de capas compactadas entre sí hasta formar el espesor de la lámina o panel de GRC, generalmente entre 10 y 15mm, generando un refuerzo en forma bidireccional. La proyección se realiza de manera concéntrica, proporcionando mortero e hilos cortados simultáneamente desde un solo punto. Este proceso simultáneo puede ser: a) manual (figura 2.1.5), donde un operario dirige la pistola de proyección; b) automática (figura 2.1.6), donde la pistola se desplaza de lado a lado sobre los moldes; c) con proyección robotizada, donde las máquinas controlan por ordenador la velocidad y ciclos de proyección, la intensidad del bombeo, entre otros.

**Figura 2.1.5. Proceso de proyección simultánea manual [Elaboración propia].**



**Figura 2.1.6. Proceso de proyección simultánea automática [<https://fibretech.org/grc-guide/production-techniques/05/03/2020>].**

#### 2.1.4.3 Proceso de premezcla (premix)

El refuerzo de la fibra de vidrio actúa de forma tridimensional, pues las fibras se orientan en las tres direcciones de forma aleatoria. Para obtener una mezcla de óptima calidad se debe realizar en dos fases, la primera obtener un mortero homogéneo, lo que es fundamental para la incorporación uniforme del refuerzo y para conseguir la trabajabilidad necesaria, y la segunda consiste en la incorporación del refuerzo en forma de hilos cortados al mortero y su posterior amasado controlado para evitar el deterioro de la fibra.

En el proceso de fabricación se puede destacar las siguientes fases:

- Realización de la premezcla y colado en un molde.
- Vibrado del molde, se realiza a medida que se va vertiendo el mortero en el molde, con el vibrado se distribuye el mortero en el molde y se libera el aire atrapado permitiendo la compactación (figura 2.1.7).
- Desmoldado y posterior curado.



Figura 2.1.7. Colado y vibrado mortero preparado por el proceso de premezcla [<https://www.concretedecor.net/decorativeconcretearticles/cd-vol-10-num-6-august-september-20101/tools-concrete-mixers/05/03/2020>].

#### 2.1.4.4 Propiedades mecánicas, químicas y físicas

Los morteros de GRC fabricados por el proceso de premix presentan menores prestaciones mecánicas que los fabricados por el proceso de proyección simultánea, la aplicación de cada uno de ellos dependerá de los requerimientos mecánicos de los

elementos a fabricar y de las condiciones de fabricación y puesta en obra. A continuación, en la tabla 2.6, se muestran las características mecánicas que corresponden a una placa de GRC de espesor normal de 10mm, a los 28 días de fabricación, y con una relación arena/cemento comprendida entre 0,5 y 1.

**Tabla 2.1.6. Propiedades mecánicas GRC (10 mm de espesor, 28 días de fabricación) [13].**

Característica	Unidad	Mortero común	Proyección	Premezcla
Contenido de fibra	% peso	0	5	3
Módulo de rotura a flexión (MOR)	MPa	5-12	20-30	10-14
Límite elástico a flexión (LOP)	MPa	3-6	7-11	5-8
Módulo de rotura a tracción (MOR)	MPa	3-5	8-11	4-7
Límite elástico a tracción (LOP)	MPa	3-5	5-7	4-6
Resistencia a compresión	MPa	20-50	50-80	40-60
Resistencia al choque	kJ/m <sup>2</sup>	5-10	10-25	10-15
Módulo de elasticidad	GPa	9-15	10-20	10-20
Deformación a la rotura	%	0,1-0,2	0,6-1,2	0,1-0,2
Densidad del material	g/cm <sup>3</sup>	1,7-2,1	1,9-2,1	1,8-2,0

#### 2.1.4.5 Cualidades del GRC

Gracias a las cualidades de las fibras AR, los elementos fabricados con GRC presentan excelentes propiedades, convirtiéndose por su alto rendimiento y prestaciones en un refuerzo ideal para los materiales compuestos de cemento. Las principales características del GRC son [13]:

- Alta resistencia a la tracción y flexión.
- Gran resistencia al impacto.
- Impermeabilidad, aún en pequeños espesores.
- Resistencia a los agentes atmosféricos.
- Incombustibilidad, derivada de las características de sus componentes.
- Aptitud para reproducir variados acabados.
- Aptitud para ser moldeado.
- Gran resistencia a la fisuración.
- Reducción de la carga (peso) en los edificios.

#### 2.1.4.6 Limitaciones del GRC

La modificación de las propiedades de los compuestos de GRC con el tiempo de envejecimiento es un aspecto de este material que es de extrema importancia; se refleja directamente en una disminución importante de las propiedades mecánicas y especialmente de la pérdida de resistencia y tenacidad. Este aspecto se convierte en una limitación a la hora de aplicar los compuestos de GRC; por esta razón actualmente se