

ESTUDIO NUMÉRICO DE LA INFLUENCIA DE LA UNIÓN FIBRA-MATRIZ EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL GRC

A. Enfedaque, V. Sánchez Gálvez

Departamento de Ciencia de Materiales, E.T.S. de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, C/ Profesor Aranguren s/n,
28040 Madrid, España.
aenfedaque@mater.upm.es
vsanchez@mater.upm.es

RESUMEN

El uso de morteros reforzados con fibras de vidrio se ha visto limitado a usos no estructurales debido a la fragilización del material con el paso del tiempo. Para mejorar el material e impulsar su utilización con fines estructurales se deben conocer los comportamientos mecánicos y micromecánicos de fractura en este material. Se analizará el comportamiento del material sometido a tracción uniaxial, con un esquema de fibras largas alineadas en la dirección de la carga, mediante simulaciones numéricas. Con este esquema simplificado se ha conseguido obtener un comportamiento análogo al del material real cuando se utilizan leyes de ablandamiento de tipo exponencial para la simulación del proceso de fisuración en la matriz de cemento, se ha comprobado el valor de la energía de fractura de la intercara fibra-matriz tanto del material joven como envejecido y se ha probado la limitada influencia de la resistencia máxima a tracción de la intercara fibra-matriz en el comportamiento del material.

ABSTRACT

The use of glass fibre reinforced cement has been limited to non structural uses due to the material's fragilization as time goes. To improve the material properties and trying to use it in structures, macromechanical and micromechanical fracture behaviours must be well known. To achieve this we propose to analyse its behaviour by means of numerical simulation of models with long fibres aligned in load direction. With this model real material behaviour using exponential softening laws in the fracture process in cement has been achieved, it has been checked the validity of fracture energy values in the interface fibre-matrix not only for young material but also for aged material and it has been proved the limited influence of fibre-matrix's tensile strength in the behaviour of this material

PALABRAS CLAVE: GRC, intercara, fractura.

1. INTRODUCCIÓN

El GRC (glass fibre reinforced cement) es un material de construcción que está formado por la unión de dos materiales con propiedades muy diferentes: mortero de cemento y fibras de vidrio cortas proyectadas, de forma aleatoria en dos dimensiones, junto con el mortero [1]. Las propiedades mecánicas del mortero de cemento se caracterizan por su alta resistencia a compresión y su baja resistencia a tracción así como su baja ductilidad [2]. En el caso de las fibras de vidrio su mayor virtud es su alto módulo de elasticidad junto a su gran resistencia a tracción. Así pues mediante la configuración de un material compuesto surgido de la unión de ambos se tiene un material resistente a compresión, propiedad que da el mortero de cemento, y con una resistencia a tracción y ductilidad mucho más alta de lo que tenía el mortero solo, lo que se debe a las propiedades de las fibras cortas introducidas.

El empleo de este material en edificación y obra civil se ha restringido a su aplicación como elemento no portante (cerramiento de fachadas, encofrado perdido,

revestimiento de túneles, barreras acústicas etc.) ya que la evolución de sus propiedades resistentes con el paso del tiempo incluye una grave pérdida de ductilidad, acompañada por una pérdida de resistencia a tracción. Estos problemas se han empezado a solucionar mediante la adición de productos químicos a la pasta de cemento y debido a esto se ha comenzado a considerar la posibilidad de utilización de este material como elemento portante estructural [3,4,5].

Por las razones y características del material anteriormente descritas surge el interés de un estudio más profundo del comportamiento mecánico del material, tanto de sus propiedades estáticas como de sus propiedades dinámicas.

Debido a la gran complejidad que entraña la simulación de un material compuesto con fibras cortas dispuestas de manera aleatoria, se va a estudiar la posible aplicación de modelos de fibras largas alineadas como simplificación del problema real.

En el campo de los materiales compuestos, un problema clásico es el estudio de materiales reforzados con fibras largas y alineadas en la dirección de carga. Sin embargo

la aplicación que han tenido estas técnicas en la mayoría de los casos se han restringido a los compuestos de matrices poliméricas reforzados con fibras, tanto metálicas como de materiales cerámicos, de mejores propiedades mecánicas. El estudio del comportamiento de compuestos de matrices cementicias entraña una mayor dificultad debido a la variación de las propiedades de la matriz.

2. GENERACION DE LOS MODELOS

El material que se utiliza en construcción se fabrica en forma de paneles de dimensiones variables de un espesor aproximado de 10 mm. En general se trata de un material compuesto en el que el mortero de cemento se encuentra con una fracción volumétrica del 95%, a la que se suele incorporar algún aditivo, y por tanto el volumen de fibra de vidrio que se añade será del orden del 5%. Según la literatura [6] esta fracción volumétrica es también la que da mayores resistencias y mejores propiedades mecánicas.

La geometría de los modelos será rectangular ya que esta es la que se emplea más comúnmente en la industria y la más adecuada para los ensayos de tracción simple. Se realizará el estudio de modelos en dos dimensiones en el que las fibras se encuentran alineadas en la dirección de la carga y están dispuestas a distancias iguales y de modelos en los que las fibras se han dispuesto aleatoriamente.

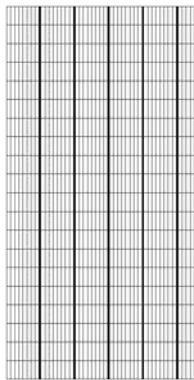


Figura 1. Modelo con 5 fibras distribuidas a distancias iguales.

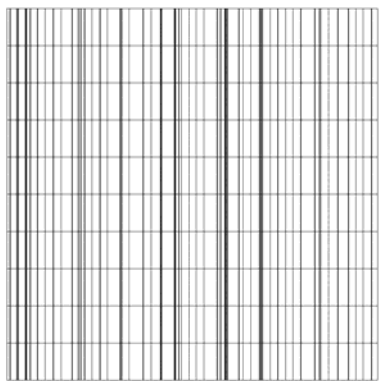


Figura 2. Modelo con 40 fibras distribuidas aleatoriamente.

3. ELEMENTOS DE INTERCARA

Para la simulación de los enlaces que se producen entre las fibras y la matriz de cemento se introducen elementos de intercara entre los distintos materiales. Esto también se realiza en el extremo inferior del modelo de manera que los elementos de intercara que se introducen tienen como función representar el proceso de fisuración de la matriz de mortero de cemento o bien de la rotura frágil de las fibras.

Los elementos de intercara usados son una modificación de elementos en 3D [7]. Se ha realizado una adaptación de los mismos a dos dimensiones.

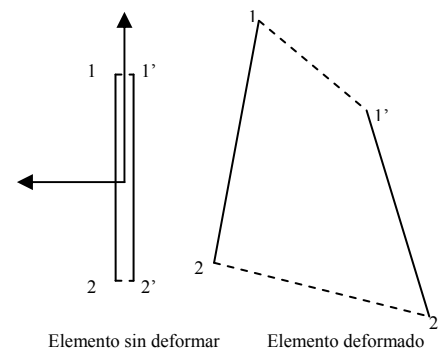


Figura 3. Esquema elemento intercara.

El comportamiento de estos elementos está caracterizado por sufrir daño en el caso que se produzcan aperturas en la dirección normal del elemento en sentido de la tracción o bien por apertura tangencial. Se tiene en cuenta un parámetro de daño que es el módulo de las aperturas (normal en sentido de la tracción y tangencial) que sufre el elemento. En el caso de que el elemento esté comprimido este se comportará con una gran rigidez que evitará que se deforme de forma apreciable y por tanto el elemento transmitirá las tensiones íntegras de un lado a otro de la intercara. En el caso de que el elemento alcance la resistencia máxima a tracción se iniciará la descarga del mismo según diferentes leyes de ablandamiento que han sido programadas como una modificación del elemento anteriormente citado.

4. LEYES DE ABLANDAMIENTO

Las leyes de ablandamiento con las que se simula la fisuración del mortero de cemento son cuatro: triangular, bilineal, ley CHR y ley ELT. La ley de ablandamiento triangular es la forma más sencilla que puede tener una ley de ablandamiento. La ley bilineal es una mejora de la ley de ablandamiento triangular que se adapta, a pesar de su sencillez, con bastante fiabilidad al comportamiento real. La ley CHR es una función de tipo exponencial. La ecuación que expresa matemáticamente la curva viene reflejada a continuación.

$$\sigma = (1 + 0.199 \cdot w^3) \cdot e^{1.35 \cdot w} \cdot 0.00533 \cdot w \quad (1)$$

La curva ELT (extra long tail) [8] se caracteriza por tener una rama de descarga muy larga y por tanto la influencia de las intercaras se prolonga más durante las simulaciones. La ecuación que refleja la forma de esta curva de ablandamiento es:

$$\sigma = 0.075 - 0.00652 \cdot w + 0.9250 \cdot e^{-1.614 \cdot w} \quad (2)$$

El aspecto que tienen estas curvas de ablandamiento se puede ver en la figura 4

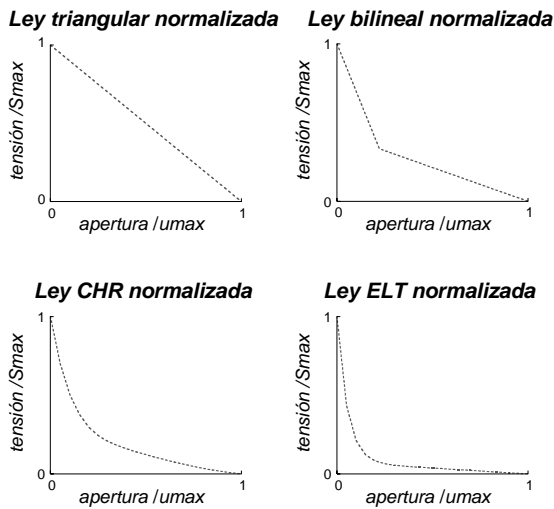


Figura 4. Curvas de ablandamiento.

Al variar las leyes de ablandamiento propuestas, no cambia la energía de fractura total del elemento sino que modificamos las tasas de disipación de energía en el interior del elemento para una energía de fractura dada, por lo tanto haremos que el elemento tenga un comportamiento más frágil o más dúctil.

Los datos disponibles de los enlaces que se forman entre las fibras y la matriz son escasos y de difícil predicción por lo que se limitó el uso de las leyes de ablandamiento al caso de la ley de ablandamiento triangular.

5. CONDICIONES DE CONTORNO

El modelo con disposición uniforme de las fibras tiene dos ejes de simetría, eje horizontal y eje vertical, estos coinciden con el lado inferior del modelo y con el lado derecho del mismo respectivamente. El eje de simetría horizontal tendrá coaccionado su movimiento en el sentido vertical. El eje de simetría vertical tendrá impedido el movimiento en sentido horizontal lo cual queda reflejado en el modelo con la imposición de desplazamiento horizontal cero para los nodos de la matriz que estén en contacto con dicho eje.

En el modelo con fibras distribuidas de manera aleatoria se han fijado como apoyos los nodos de la cara inferior de los elementos de intercara, los cuales están situados

en el eje de simetría, coaccionándolos para impedir el movimiento vertical de los mismos.

En ambos modelos se ha fijado como condición adicional, necesaria para simular un ensayo a tracción que todos los nodos del lado superior del modelo tengan el mismo desplazamiento vertical.

En el lado superior del modelo se impondrá un desplazamiento vertical que simulará el movimiento del extremo de la probeta durante el ensayo de tracción.

6. PROPIEDADES INTRODUCIDAS EN EL MODELO

Los materiales tanto de la matriz como de las fibras se han supuesto elásticos y lineales. Así pues los únicos parámetros que necesitamos introducir en el modelo son el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson.

Las propiedades de los materiales constituyentes del GRC relevantes para este trabajo se resumen en la tabla 1 [6]:

Tabla 1. Propiedades de los materiales

	Fibra de vidrio AR	Mortero de cemento Pórtland
Módulo de elasticidad (GPa)	75.5	20
Resistencia a tracción (MPa)	1600	2
Coefficiente Poisson	0.2	0.3

En el caso de las propiedades que se han de dar a los elementos que simulan las intercaras, los datos que necesitamos son la energía de fractura y la resistencia máxima a tracción. En el caso de la simulación de la fisuración del mortero de cemento se tomó como energía de fractura 10 J/m² y como resistencia máxima a tracción, la que posee el mortero, 2 MPa. En el caso de las propiedades de la intercara fibra-matriz, asignar unos valores no es sencillo puesto que con el paso del tiempo los productos de la hidratación del cemento se van introduciendo dentro de los haces de filamentos que forman las fibras [6]. Teniendo en cuenta esto se partió de una resistencia máxima a tracción de 1 MPa [9]. Dado que los productos de la hidratación son de naturaleza cementícea se ha tomado una energía de fractura de 10 J/m².

7. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES EN FUNCIÓN DE LA LEY DE ABLANDAMIENTO EMPLEADA EN LA FISURACIÓN DE LA MATRIZ

Los resultados que se han obtenido en los modelos que tienen una disposición de fibras uniforme se pueden ver en la figura 5.

El comportamiento de los modelos en la zona en la que se produce la fisuración de la matriz está gobernado por las características de los elementos de intercara. Estos elementos son totalmente rígidos hasta que alcanzan su tensión máxima; a partir de entonces se descargan según la ley de ablandamiento correspondiente.

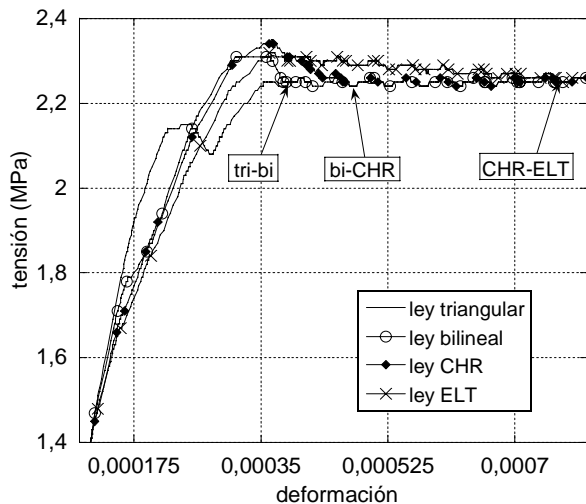


Figura 5. Comparación de comportamiento en modelos con fibras dispuestas a espacios iguales en función de la ley de ablandamiento empleada.

Las diferencias aparecen cuando la matriz se fisura puesto que es en esta zona en la que tiene influencia la pendiente de la curva de ablandamiento así como el valor de u_{max} . Se puede apreciar en la grafica tensión-deformación como a mayor u_{max} de la ley de ablandamiento, mayor zona de influencia de la fisuración de la matriz en el comportamiento del material. Así la influencia de las leyes de tipo exponencial como son la CHR y la ELT llega casi hasta la zona de comportamiento que está gobernada por la fracción volumétrica de fibras. Se destacan en la figura los puntos a partir de los cuales el comportamiento de los modelos es independiente de las leyes de ablandamiento adoptadas.

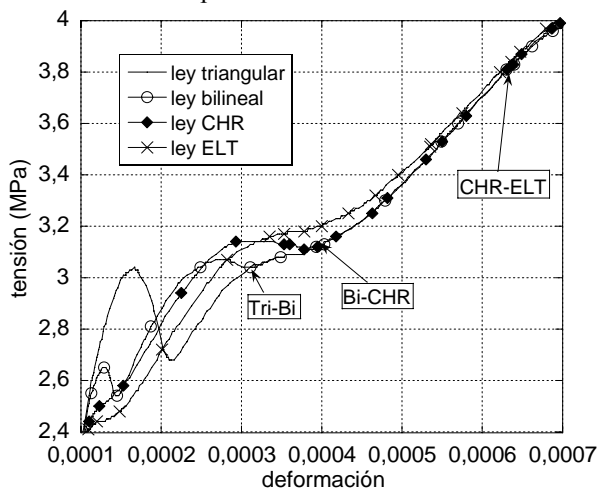


Figura 6. Comparación de comportamiento en modelos con fibras dispuestas aleatoriamente en función de la ley de ablandamiento empleada

El comportamiento de los modelos realizados con fibras dispuestas aleatoriamente se puede ver en la figura 6

Los resultados obtenidos son análogos a los que se consiguieron con los modelos con fibras distribuidas a distancias uniformes.

La influencia en ambos casos está limitada por el valor de u_{max} de los elementos de intercara (y por lo tanto por el tipo de ley usada) y no está influenciado por el tipo de modelo que utilizemos ya sea un modelo de fibras largas alineadas dispuestas de forma aleatoria o bien un modelo de fibras largas dispuestas a distancia constante. Se puede apreciar esto con claridad comparando los valores de la deformación para los cuales las leyes de ablandamiento dejan de tener influencia.

Hay que destacar que los resultados obtenidos en las simulaciones en las cuales se han utilizado fibras dispuestas aleatoriamente y leyes de ablandamiento de tipo exponencial dan resultados mucho más cercanos al comportamiento real del material que cuando se emplean fibras dispuestas a espacios iguales o leyes de ablandamiento no exponenciales.

8. COMPARACIÓN DE COMPORTAMIENTO DE MODELOS CON DISPOSICIÓN ALEATORIA DE FIBRAS E IGUAL NÚMERO DE FIBRAS

Para dar validez a los resultados que se obtienen en las simulaciones con este modelo simplificado, se ha de conocer como cambia el comportamiento del material compuesto según sea la disposición de las fibras dentro de la matriz. Compararemos el comportamiento de modelos con igual número de fibras sin variar la ley de ablandamiento que gobierna el comportamiento de los elementos de intercara de la matriz. En las simulaciones usaremos las leyes de ablandamiento de tipo exponencial, CHR y ELT, puesto que como se ha indicado en el epígrafe anterior son estas las que dan al modelo un comportamiento más cercano al del material real.

En el caso de las simulaciones con dos fibras los resultados obtenidos se ven en la figura 7.

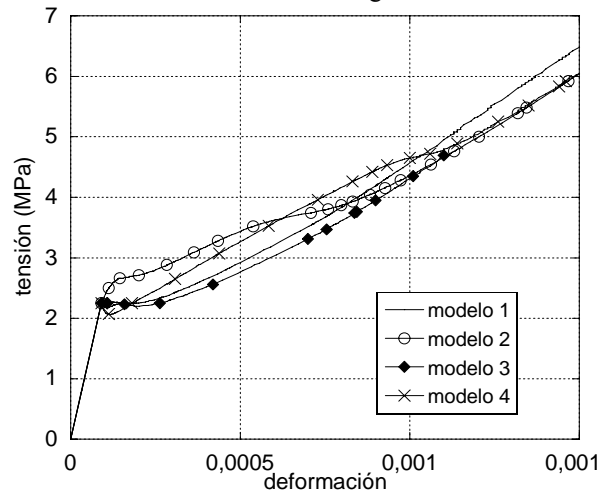


Figura 7. Comparación comportamiento de modelos con el mismo número de fibras

Las diferencias que se aprecian entre los distintos modelos, son pequeñas y se producen en los tramos en los que tienen influencia los elementos de intercara de la matriz ya que una vez que se ha producido la rotura total de estos el comportamiento queda gobernado por la fracción volumétrica de fibras. Esto implica que las diferencias que existen entre los distintos modelos se basan en las diferencias que surgen a causa de la distribución más o menos homogénea de las fibras en el modelo. Podemos afirmar entonces que la distribución de fibras más homogénea es la del modelo 2 mientras que en el resto de los casos las distribuciones son similares; lo que no significa que se encuentren en las mismas posiciones pero sí que los tramos de matriz que se encuentran sin reforzar tendrán longitudes análogas. Esto se puede apreciar en la figuras 8 y 9 donde se muestran las disposiciones de las fibras en los modelos.

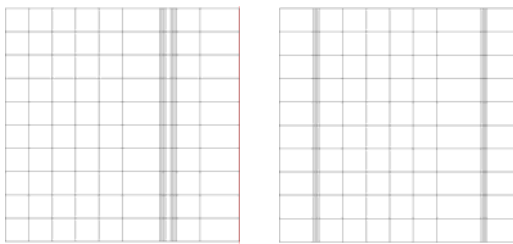


Figura 8. Modelos 1 y 2.

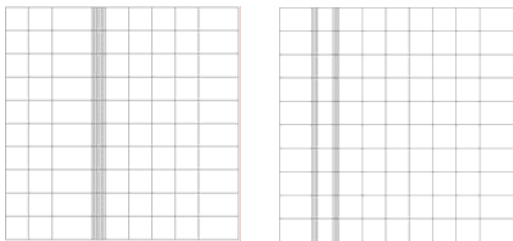


Figura 9. Modelos 3 y 4.

9. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL EN FUNCIÓN DE LA ENERGÍA DE FRACTURA DE LA INTERCARA FIBRA-MATRIZ

La energía de fractura de la intercara fibra-matriz se supuso igual a la que tienen en general los compuestos de cemento o sea, 10 J/m^2 . Debido a las características que tienen los enlaces fibras-matriz (dificultad de determinar el área de contacto, fragilidad del enlace químico fibra-matriz, carácter alcalino de la matriz, evolución de las características del enlace con el tiempo, etc.) este dato no puede darse por cierto sin realizar las comprobaciones pertinentes. Así pues se realizó un estudio del comportamiento de los modelos de fibras largas alineadas, dispuestas aleatoriamente, en los que se varió la energía de fractura de las intercara, manteniendo el valor de la resistencia máxima a tracción. Las variaciones de la energía estarán dentro de un intervalo que tendrá como máximo la energía de fractura del resto de la matriz de cemento y como mínimo el 25% de la misma. Teniendo en cuenta esto

las simulaciones se realizarán con las energías de fractura que se muestran en la tabla 2:

Tabla 2. Variación de la energía de fractura de la intercara fibra-matriz.

Γ_{\max}	10 J/m^2
$75\% \Gamma_{\max}$	7.5 J/m^2
$50\% \Gamma_{\max}$	5.0 J/m^2
$25\% \Gamma_{\max}$	2.5 J/m^2

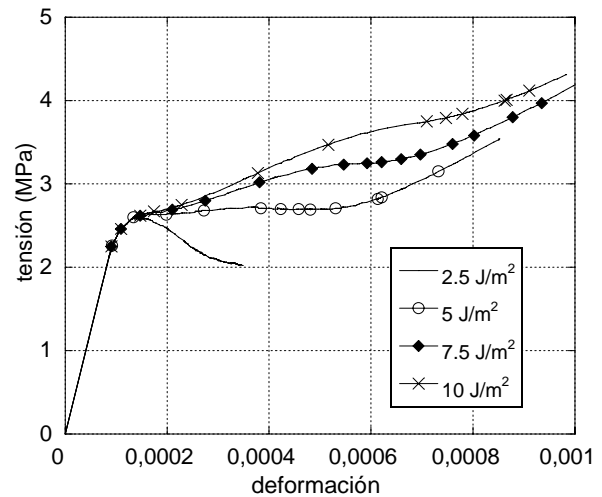


Figura 10. Comparación de comportamiento para un modelo G no constante.

En la figura 10 se puede ver cómo al reducir la energía de fractura de los elementos de intercara fibra-matriz hasta 2.5 J/m^2 el material una vez fisurado no es capaz de repartir la carga que soportaba la matriz antes de su fisuración y colapsa. En los demás casos las tensiones que tenía la matriz sí son transmitidas a las fibras a través de los enlaces fibra-matriz pero la zona de transición que une la rama de la curva elástica con la que está gobernada por el contenido volumétrico de fibras es sensiblemente más tendida según se reduce la energía de fractura. Por lo tanto se consigue reproducir el comportamiento del material envejecido caracterizado por la fragilización y por una acusada pérdida de ductilidad.

10. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA RESISTENCIA MÁXIMA A TRACCIÓN DE LA INTERCARA FIBRA-MATRIZ

Los resultados que obtuvieron en estudios experimentales sobre la resistencia máxima a tracción de los enlaces fibra-matriz [9,10] no son concluyentes en modo alguno. Esto se debe a la dificultad que entraña la realización de un ensayo de arrancamiento de una fibra no monolítica, formada por alrededor de unos 200 filamentos, que se encuentra embebida en el interior de la matriz de mortero de cemento. Puesto que tampoco existe una norma que regule este tipo de ensayos, en el caso de la fibra de vidrio, lo más prudente es comprobar

que los datos elegidos para las simulaciones dan resultados que se aproximen a la realidad.

Así pues se realizaron una serie de simulaciones en las que se emplearon modelos con fibras dispuestas aleatoriamente y en donde la resistencia máxima de la intercara varía manteniendo constante la energía de fractura de la intercara fibra-matriz. Los valores de las resistencias máximas a tracción de la intercara se pueden ver en la tabla 3.

Tabla 3. Variación de la tensión máxima de la intercara fibra-matriz.

S_{Purnell}	1 MPa
120% S_{Purnell}	1.2 MPa
80% S_{Purnell}	0.8 MPa

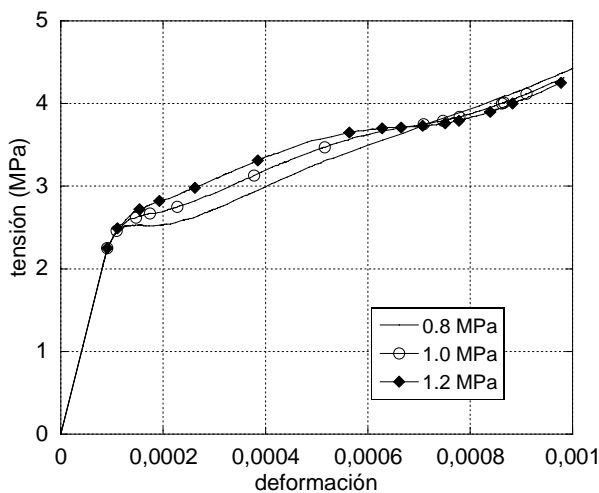


Figura 11. Comparación de comportamiento cambiando S_{max} con G constante;

En la figura 11 se ven los diferentes comportamientos que tienen los modelos y se aprecia como a mayor resistencia a tracción a mayor tensión se produce la transición entre la rama elástica y a la rama de transición; sin embargo puesto que la energía de fractura en estos casos es constante el variar la S_{max} provoca que el u_{max} varíe también; así a menor S_{max} , u_{max} será mayor y por lo tanto la rama de transición de la gráfica tensión-deformación será más larga. De cualquier forma las variaciones de comportamiento que se aprecian entre los distintos modelos son sutiles si se comparan con el efecto que tienen los cambios de energía de fractura en el comportamiento del modelo.

11. CONCLUSIONES

Mediante los modelos con fibras largas alineadas se pueden realizar cálculos que se aproximen al comportamiento real a tracción de un material de las características del GRC.

Se ha evidenciado la idoneidad de utilizar con leyes de ablandamiento de tipo exponencial para la simulación del proceso de fisuración en la matriz de cemento.

Se ha comprobado el valor de la energía de fractura de la intercara fibra-matriz y se tiene una herramienta para simular el comportamiento del material envejecido.

Se comprueba que la influencia en el comportamiento del modelo de la resistencia máxima a tracción de la intercara fibra-matriz no es demasiado acusada

12. REFERENCIAS

- [1] Sánchez Paradela L. y Sánchez-Gálvez V. *Los cementos reforzados con fibras de vidrio*, Hormigón y Acero, V.173, 4º trimestre 1989, pp.113-126.
- [2] Sánchez Paradela L. y Sánchez-Gálvez V. "Comportamiento a tracción de cementos reforzados con fibras de vidrio", Informes de la construcción, V.43, número 413, Mayo-Junio 1991 pp.77-89
- [3] Cian, D. y Della Bella, B., *Structural applications of GRC for Precast floors*, GRC Congress 2001.
- [4] Cian, D. y Della Bella. *GRC Precast elements for extralight self-supporting floors in offices and residential buildings*. Artículo número 12.Proc. del 12º congreso de la GRCA. Octubre 2003. Barcelona, España
- [5] Della Bella, M. y Cian, D. *Extra Light GRC sandwich elements for roofing in industrial buildings* Artículo número 8.Proc. del 12º congreso de la GRCA. Octubre 2003. Barcelona, España
- [6] Majumdar, A.J. y Laws, V. *Glass fibre reinforced cement*, BSP Professional Books, Oxford, 1991.
- [7] Segurado, J. y Llorca, J. "A new three dimensional interface finite element to simulate fracture in composites", International journal of solids and structures, 2004.
- [8] Planas, J. y Elices M. "Shrinkage eigenstresses and structural size-effect", Fracture mechanics of concrete structures, Z.P.Bazant, ed., Elsevier Applied science, 1992
- [9] Purnell, P. et al. *Accelerated ageing characteristics of glass fibre reinforced cement made with new cementitious matrices*, Composites 1999.
- [10]Bartos, P.J.M. *Assessment of interfacial microstructure and bond properties in aged GRC using a novel microindentation method*, Cement and concrete research 1997.