

ENERGÍA DE FRACTURA DE PANELES DE MORTERO DE CEMENTO REFORZADOS CON FIBRAS DE VIDRIO (GRC) SOMETIDOS A IMPACTOS DE BAJA VELOCIDAD

A. Enfedaque¹, V. Sánchez-Gálvez²

¹ Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, C/ Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid, España.
E-mail: alejandro.enfedaque@upm.es

² 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.
E-mail: vsanchez@mater.upm.es

RESUMEN

El uso de morteros reforzados con fibras cortas de vidrio (GRC) se ha generalizado durante años en el mundo de la construcción. Sus aplicaciones en edificación y en la industria de la construcción se benefician de sus excelentes propiedades mecánicas. Durante los últimos 40 años se han realizado numerosos trabajos que reflejan el comportamiento tanto a tracción como a flexión de este material. Sin embargo, las propiedades dinámicas del GRC no se han estudiado con anterioridad. Para caracterizar el comportamiento frente a los impactos se ha realizado una extensa campaña de ensayos de torre de caída. Los ensayos han mostrado que el comportamiento del GRC está determinado por el espesor de los paneles ensayados. Hay una relación lineal entre la energía absorbida por las placas y el espesor de las mismas. Se ha desarrollado un sistema de filtrado de datos que permite eliminar los efectos indeseables registrados durante el ensayo.

ABSTRACT

Glass fibre reinforced cement (GRC) has been used in many applications in the past. GRC great mechanical properties have been widely used in architecture and civil engineering applications. In the last 40 years tensile and bending behaviour of GRC has been thoroughly studied. However, GRC dynamic behaviour has never been studied before. A wide experimental programme has been carried out using a drop weight machine. Test results showed that GRC impact behaviour is mainly determined by GRC thickness. Energy absorbed by GRC plates is linearly related with thickness. Data has been filtered using a new approach that discard useless data registered during the tests.

KEY WORDS: GRC, impacto, fractura.

1. INTRODUCCION

El GRC es un material que está formado por la unión de dos materiales con propiedades totalmente diferentes: mortero de cemento y fibras de vidrio cortadas y proyectadas aleatoriamente junto con el mortero en dos dimensiones [1]. La unión de los dos materiales nos proporciona un material que reúne las mejores propiedades de ambos y que mejoran las propiedades individuales de cada uno. En el caso del mortero de cemento la inclusión de fibras de vidrio mejora la ductilidad del mismo y la resistencia a tracción; así como la presencia de mortero de cemento mejora los problemas de esbeltez que pueden aparecer cuando se comprimen las fibras de vidrio. Por lo tanto cuando tenemos la unión de ambos materiales lo que se obtiene es un material que tiene una resistencia a tracción y ductilidad mayor que el mortero de cemento y que tiene también una resistencia a compresión alta ya que la que

proporciona el mortero de cemento no se ve reducida por la inclusión de las fibras de vidrio.

Por lo tanto con la unión de estos materiales tenemos un compuesto de cemento el cual se caracteriza por las buenas propiedades mecánicas y que no necesita armaduras. Esto nos da un material que tiene una versatilidad de diseño enorme ya que se pueden lograr elementos con casi cualquier forma con espesores de alrededor de 10 mm.

A pesar de los problemas de fragilización que se ha comprobado que aparecen con el paso del tiempo [2-5], las aplicaciones del GRC en edificación y en la industria civil son numerosas [6].

El GRC es un material idóneo para la fabricación de paneles ligeros de fachada además de por las buenas propiedades ya citadas por su notable resistencia al fuego y a la corrosión.

Los paneles de GRC pueden sufrir impactos tan variados como son el lanzamiento piedras, impacto de granizo, caída de herramientas durante su construcción

o bien la proyección de elementos del mobiliario urbano (farolas, semáforos...) causada por tornados u otros fenómenos meteorológicos.

El interés principal de este trabajo es caracterizar el comportamiento del GRC frente a los impactos a bajas velocidades, puesto que no hay apenas referencias previas y en ocasiones adolecen de rigor científico.

Mediante una serie de ensayos de torre de caída se ha obtenido información sobre el comportamiento del GRC cuando está sometido a velocidades bajas de deformación.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

La torre de caída empleada en los ensayos es el modelo Dynatup 8250. Un esquema de la torre utilizada se puede ver en la figura 1.

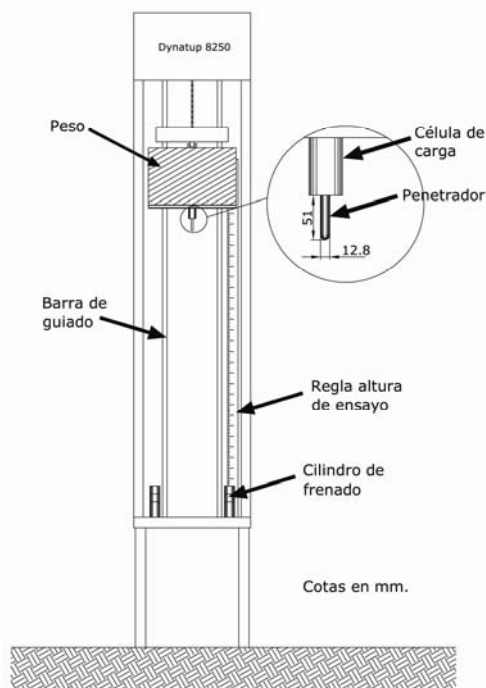


Figura 1. Torre de caída.

Esta torre de caída permite realizar ensayos desde diferentes alturas con pesos que varían desde los 2.21 kg hasta los 44.02 kg. Los pesos se colocan en un marco que, en su parte baja y unida a él, tiene una célula de carga que va conectada a un penetrador o impactador. Este impactador es un cilindro de 12.70 mm de diámetro rematado en su parte baja por una semiesfera del mismo diámetro fabricado en acero. La célula de carga, que está conectada al impactador, está a su vez conectada a un ordenador que dispone de un sistema de adquisición de datos. Este sistema de adquisición a través de los datos proporcionados por la célula de carga, da listados de velocidades, energías y cargas registradas durante el ensayo.

Las muestras que se desean ensayar se colocan en la parte inferior de la torre de caída donde se puede fijar un soporte sobre el que disponer las probetas. La torre de caída también dispone de un hueco en su parte

inferior que permite ensayar elementos cuyo tamaño es mayor que la distancia existente entre las barras que guían el conjunto de peso, célula de carga e impactador.

Para realizar los ensayos, se monta en el marco el peso deseado y posteriormente se eleva el mismo a la altura desde la que se dejará caer el conjunto peso, célula de carga e impactador. Posteriormente, se acciona el botón de disparo, el gancho que sujeta el peso se abre liberando el conjunto y dejándolo caer.

3. MATERIAL ENSAYADO

Se han realizado ensayos de impacto a baja velocidad sobre probetas de GRC realizado sin adiciones pero con plastificante para ayudar a dar docilidad al mortero fresco. Las cantidades que se han empleado son las que aparecen en la tabla 1.

Tabla 1. Formulación del mortero de cemento

Cemento	50 Kg.
Arena	50 Kg.
Agua	20 litros.
Plastificante	0.5 litros.

Se realizaron con la colaboración de PREINCO S.A. una serie de paneles de 1.2x1.2m y 10 mm de espesor. De estos paneles se desechó un marco de 5 cm alrededor del contorno para evitar las condiciones de contorno que surgen en la fabricación de los mismos. Una vez eliminada esta parte se realizó el corte de las probetas para los ensayos.

Se usaron probetas de dimensiones similares a la de los paneles reales en los ensayos realizados con la torre de caída para reproducir el efecto de la flexión en el comportamiento del material. Las dimensiones de las probetas fueron de 250x250 mm. Estas dimensiones no permiten colocar las placas en la parte superior de la torre de caída ya que el espacio que hay entre las barras de guiado del peso es menor. Hubo que colocar las probetas entre las patas de la torre. Para conseguir que se produzca el impacto sobre las muestras, el penetrador y célula de carga pasaban a través de un agujero en el suelo de la torre de caída. Los ensayos se han realizado a 28 días de edad del material aproximadamente.

El soporte de las probetas en los ensayos fue un marco de acero rígido. Este marco dispone de dos mitades entre las que se sitúa la muestra a impactar. Se usó un marco ya que se quería reproducir un empotramiento perfecto en los contornos de las muestras. Para conseguir un empotramiento lo más perfecto posible, se colocaron tornillos a cada lado del marco para presionar las probetas al apretar los mismos.

En la figura 2 se puede ver una sección del soporte una vez colocado en la posición en la que se realizan los ensayos y una vista de la planta del mismo. El marco y una de las probetas ensayadas se pueden ver en la figura 3.

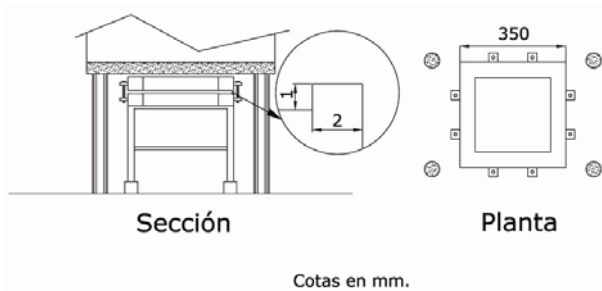


Figura 2. Colocación marco.

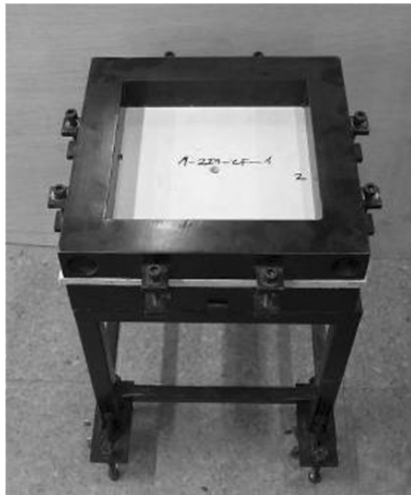


Figura 3. Marco fijación probeta.

Se colocó en el marco un peso de 11.72 kg para perforar las muestras. La altura desde la que se dejó caer el peso fue la máxima permitida por la torre de caída. Teniendo en cuenta que la muestra estaba colocada debajo del suelo de la torre, la distancia que existía entre el impactador y las muestras fue de 103 cm. Los impactos se realizaron en el centro de las placas. Antes de cada ensayo se bajó el conjunto formado por el peso, el impactador y la célula de carga hasta estar casi en contacto con las muestras para colocar la muestra y lograr que el impacto se produjese en el centro de las placas. Se elevó el conjunto de peso, célula de carga e impactador a la altura deseada y se realizó el ensayo.

4. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Los resultados de los ensayos con perforación se pueden ver en las gráficas que aparecen en la figura 4. En ellas se muestran los registros de cargas frente a la deflexión de la muestra. En la leyenda de cada una de ellas se detalla el espesor de cada placa en la zona de impacto.

Los resultados de los ensayos realizados sobre placas de GRC sin adiciones mostraron cierta dispersión. La carga máxima que soportaron las muestras varió desde los 3.45 kN hasta los 8.75 kN.

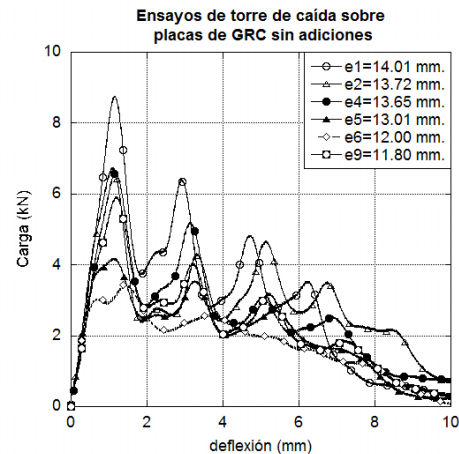


Figura 4. Ensayos torre caída sobre GRC.

Estas diferencias se produjeron, en la mayoría de los casos, debido a las diferencias de espesor que había entre las placas. Sin embargo, la placa de menor espesor en la zona impactada registró cargas mayores que otras muestras de mayor espesor. Por lo tanto, no se puede fijar una tendencia que relacione la carga máxima con el espesor de la muestra en la zona de impacto.

5. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Durante un ensayo de torre de caída la instrumentación registra una serie de medidas de la variación de la carga en el impactador. Con estas medidas, mediante la ecuación 1 se determina la energía perdida por el peso durante el impacto.

$$E = \frac{1}{2} m \left(v_i^2 - \left(v_i - \frac{1}{m} \int_0^t P dt \right)^2 \right) \quad (1)$$

Donde E es la pérdida de energía de la masa, m es la masa de caída, v_i es la velocidad de impacto y la integral de P con respecto al tiempo es el área debajo de la curva carga-tiempo. Puesto que la carga del impactador es proporcional a su aceleración, mediante una doble integración respecto del tiempo se puede obtener el desplazamiento del mismo. Será necesario evaluar la pérdida de energía del conjunto masa impactador y de otros mecanismos de disipación de energía para conocer la capacidad de absorción de carga de la muestra ensayada.

La relación que existe entre la tensión y la deformación de la muestra está encubierta por una serie de fenómenos que tienen lugar durante el ensayo. Los fenómenos que se registran y que no proporcionan información sobre el comportamiento del material tienen que ver con las oscilaciones armónicas y con las fuerzas de inercia.

Durante el impacto se producen oscilaciones en el penetrador y en la muestra ensayada. Estas vibraciones se producen a la frecuencia propia de cada uno de estos

elementos y quedan registradas junto con el comportamiento del material en los datos que se obtienen de la célula de carga. Para conseguir obtener datos sobre el comportamiento mecánico del material hay que determinar tanto los elementos que producen vibraciones como las frecuencias a las que se producen dichas vibraciones para poder realizar un filtrado que los elimine.

Los efectos de las inercias, que aparecen en los ensayos dinámicos de compuestos cementíceos, tienen gran importancia [7]. Las fuerzas de inercia aparecen durante el ensayo al acelerar la muestra ensayada desde el reposo hasta la velocidad de caída del conjunto formado por peso y penetrador. Las cargas inerciales se caracterizan por un tener un pico agudo, seguido normalmente por unas oscilaciones que se van atenuando al comienzo de las curvas carga-tiempo. La magnitud de estas cargas inerciales se puede considerar como proporcional a la velocidad de impacto, ya que la carga inercial, ejercida por la muestra en el penetrador, es igual al producto del peso y la aceleración de dicha masa.

En la parte inicial del impacto, se acelera la muestra y se induce una carga inercial que se añade a la carga que causa la flexión y la deformación local de la muestra ensayada. Como resultado de esto, la carga que se registra es notablemente mayor que la resistida por la muestra, siendo la resta de ambas el efecto de las inercias en el resultado del ensayo. Dichos efectos aparecen como oscilaciones en las curvas carga-tiempo obtenidas en el ensayo. La duración de este efecto inercial es breve [8]. Para que las medidas realizadas en ensayos de impacto tengan la precisión adecuada, el tiempo durante el que se produce el registro de las cargas debe ser, al menos, 3 veces superior al periodo de dicha oscilación inercial. Para tiempos superiores las medidas obtenidas corresponden a la flexión de la muestra durante el ensayo.

Hay que eliminar las oscilaciones del impactador y de la propia muestra. Para eliminar las oscilaciones del impactador, que aparecen en el registro tomado en el ensayo, se halló la frecuencia propia del impactador mediante ensayos en la torre de caída realizados sobre muestras de un material frágil. Se hicieron dos ensayos en torre de caída sobre placas de mortero de cemento obteniéndose los resultados que se ven en la figura 5.

A partir de los resultados de estos ensayos, se establecieron las curvas amplitud-frecuencia de las cargas registradas en el impactador y se escogió el intervalo de frecuencias más representativo mediante la utilización de las transformadas de Fourier.

Se realizaron las transformadas de Fourier de las gráficas que se ven en la figura 5 para determinar el rango de frecuencias dentro del cual se encuentra la frecuencia propia del impactador.

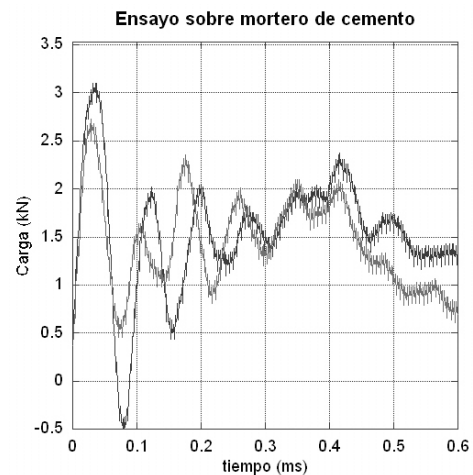


Figura 5. Carga frente a tiempo en mortero de cemento.

En la figura 6 se puede ver una parte de la gráfica de frecuencia-amplitud de la señal registrada. En la figura 6 se ve que el último pico de la amplitud que se ha registrado para ambos ensayos está en torno a los 20 kHz. Puesto que el registro que se obtiene en la célula de carga parte tan sólo de las vibraciones del penetrador, se realizó un filtrado de los datos obtenidos en los ensayos, descartando las medidas obtenidas a frecuencias mayores de 20 kHz.

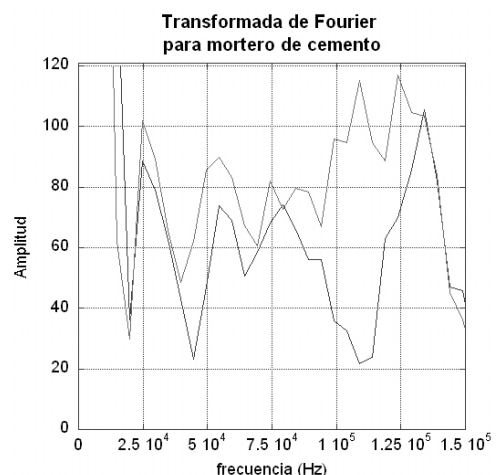


Figura 6. Transformadas de Fourier de la señal de carga.

Para hallar la frecuencia propia del GRC hay que realizar un ensayo sobre una placa circular de espesor homogéneo. Para realizar este ensayo el material debe ser isotrópico. Aunque no lo sea, el espectro de frecuencias obtenidas puede indicar el rango dentro del que se encuentra la frecuencia propia del material [9]. Esto fue realizado en los primeros estudios sobre el comportamiento del GRC [10] y se concluyó que las frecuencias propias de vibración del material están cerca de los 3.2 kHz. Sin embargo, un cambio de espesor provocará el cambio de las frecuencias propias del material porque estas son proporcionales al espesor de la muestra. Por lo tanto, si se produce un cambio del espesor, se producirá un cambio del espectro de frecuencias estudiadas. Las placas de GRC que se han

analizado en este estudio tienen un espesor variable y por lo tanto no se puede asegurar que la frecuencia propia del material sea la encontrada en la literatura.

Para eliminar la influencia de las vibraciones del material se realizó un análisis de la velocidad de las ondas en un material cementíceo con módulo de elasticidad 20 GPa. y con una densidad de 2200 kg/m³. Sabiendo que la velocidad de las ondas en un medio se halla mediante la ecuación 2, se concluyó que la frecuencia de vibración de las ondas en el material era de unos 100 kHz. Por tanto, mediante el filtrado realizado para eliminar las vibraciones debidas al penetrador, se eliminaron también las correspondientes al GRC.

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

Las vibraciones propias de la placa ensayada es otro de los efectos que se registran en los ensayos de torre de caída. Estas proceden de la perturbación introducida por el impactador al contactar con la muestra. Para saber la frecuencia de dichas oscilaciones se acudió a la solución analítica de las frecuencias de vibración de una placa isótropa y de espesor constante. Esta formulación se obtuvo de la literatura [11] y se muestra en la ecuación 3

$$\Omega = \sqrt{\frac{\rho}{D}} \omega a^2 \quad (3)$$

Donde Ω es la frecuencia natural de vibración, ρ es la densidad del material, ω es la frecuencia circular, a es el lado de la membrana cuadrada y D es la rigidez del material para una placa de espesor uniforme e isótropa que se expresa según el análisis de Love-Kirchoff en la ecuación 4.

$$D = \frac{Eh^2}{12(1-\nu^2)} \quad (4)$$

Donde D es la rigidez de la placa, E es el módulo de elasticidad del material, h es el espesor de la placa y ν es el coeficiente de Poisson el material. Tomando los datos que se muestran en la tabla 2, se halló que el periodo de vibración de una placa cuadrada, sometida a una perturbación introducida por el impactador, era de 2 ms. Las oscilaciones de carga que aparecieron en los ensayos tienen periodos de vibración similares.

Tabla 2. Propiedades material..

Frecuencia natural (Ω)	3.367
Densidad (ρ)	2200 kg/m ³
Dimensiones placa (a)	0.25 m.
Espesor placa (h)	0.01 m.
Modulo elasticidad (E)	20 GPa
Coficiente Poisson (ν)	0.3

Por lo tanto, para obtener datos del comportamiento del material se realizó un filtrado de las frecuencias que introdujo el penetrador y posteriormente se hizo un suavizado en el que la curva se aproximó a un polinomio de grado 8. Se empleó este tipo de suavizado porque eliminaba de manera clara y sin introducir distorsiones la vibración de la placa de los datos obtenidos. El resultado que se obtuvo para una de las muestras se puede observar en la figura 7.

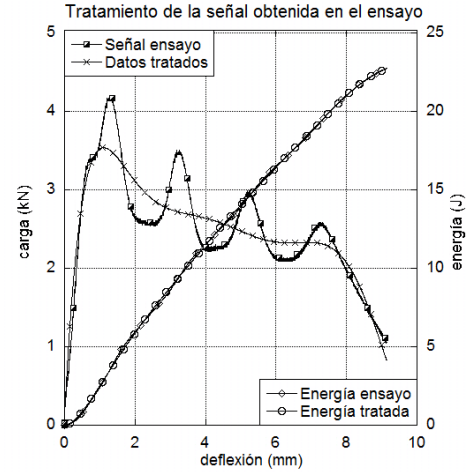


Figura 7. Filtrado y suavizado de los datos obtenidos en los ensayos.

Como se puede ver en la figura 7, se conservó la cantidad de energía absorbida en el ensayo. Esto prueba que, a pesar del tratamiento de señales realizado, no se produjeron modificaciones que falseen los datos registrados en los ensayos. Las curvas que se han obtenido después de estos procesos de suavizado y filtrado pueden ser interpretadas de manera más sencilla sin perder precisión en las medidas realizadas.

Las curvas obtenidas después de filtrar y suavizar las gráficas obtenidas en los ensayos se pueden ver en la figura 8. A pesar del proceso de filtrado el comportamiento de las muestras siguió siendo diferente.

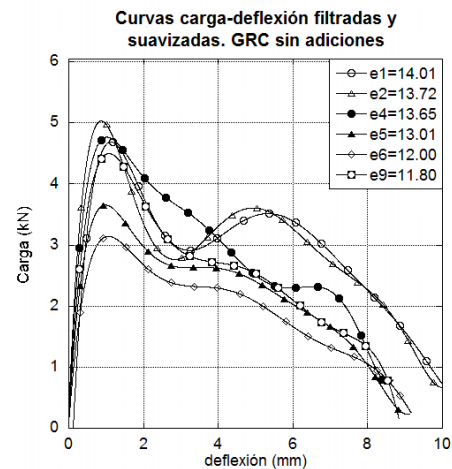


Figura 8 Ensayos torre caída sobre GRC con suavizado.

Aparecieron dos modos de fallo distintos debido a las diferencias de espesor de las muestras. En las placas más delgadas la penetración produjo la extracción de un tapón de material, mientras que en las placas de mayor espesor el GRC se abrió formando un cono de salida debajo del punto de impacto.

Es muy complicado encontrar una tendencia en la energía absorbida por las placas de GRC en el impacto debido a las diferencias en los modos de fallo del material.

A pesar de lo expuesto con anterioridad se relacionó la energía que absorben las probetas ensayadas con el espesor de las mismas. Las diferencias que se observaron en las medidas obtenidas en placas con espesores similares, fueron pequeñas y pueden ser atribuidas a la dispersión propia de los resultados y a las diferencias de sustentación de las mismas. Los cambios de espesor en las placas hizo que las placas no estuvieran empotradas en todo su contorno.

En la figura 8 se ve la relación existente entre la energía absorbida por la placa en el impacto y el espesor de la misma para una energía de impacto de 118J.

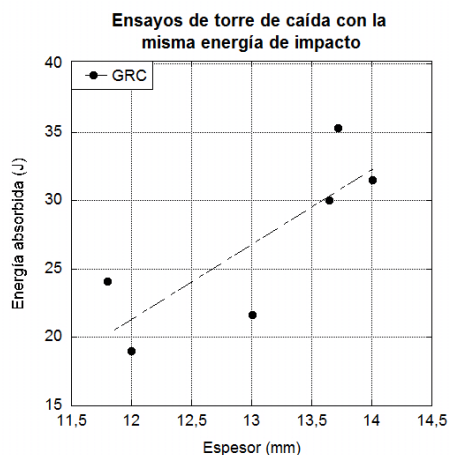


Figura 8. Relación entre espesor y energía absorbida.

La relación entre la absorción de energía en el impacto y el espesor de las placas para la formulación estudiada se muestra en la ecuación 5

$$E_{GRC} = -44.061 + 5.4471e \quad (5)$$

En esta ecuación E_{GRC} es la energía absorbida por la placa en el impacto y e es el espesor de la placa en mm. Esta ecuación es válida para una energía de impacto de 118 J.

6. CONCLUSIONES

Se ha llevado a cabo un programa experimental de ensayos de impacto a velocidades medias en torre de caída.

Las diferencias en los mecanismos de fallo en los ensayos de torre de caída, a igualdad de energía de

impacto, vienen determinados por el espesor de las placas ensayadas.

Parece que existe una relación lineal entre la energía absorbida y el espesor a igualdad de energía de impacto. Se ha desarrollado un sistema de filtrado de datos que permite eliminar los efectos indeseables registrados durante el ensayo

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Educación y Ciencia la financiación de este trabajo a través del proyecto BIA 2004-07336.

REFERENCIAS

- [1] L. Sánchez Paradela, V. Sánchez-Gálvez *Los cementos reforzados con fibras de vidrio*, Hormigón y Acero, V.173, 4º trimestre 1989, pp.113-126.
- [2] B. Mobasher, S.P. Shah, *ACI Mater. J.* 1989, n° 86 pp 448-458.
- [3] A.J. Majumdar, *Fibre reinforced cement and concrete*. Construction Press: Lancaster, PA (1975), pp 279-314.
- [4] S.P. Shah, D. Ludirdja, J.I: Daniel, B. Mobasher. *ACI Material Journal* (1988), número 85, pp. 352-360.
- [5] S.P. Shah, D. Ludirdja, J.I: Daniel. *Prestressed Concrete Inst.* (1987) numero 32, pp. 82-99.
- [6] Cian, D. y Della Bella, B., *Structural applications of GRC for Precast floors*, GRC Proceedings 2001.
- [7] Suaris, W. y Shah, S. P. (1983). *Properties of concrete subjected to impact*. Journal of Structural Engineering, Vol. 109: pp. 1727-1741.
- [8] Server, W. L., Wullaert, R. A. y Sheckhard, J. W. *Evaluation of current procederes for dynamic fracture toughness testing*. Flaw Growth and Fracture, 1977 pp. 446-461.
- [9] Liew, K. M. *Frequency solutions for circular plates with internal supports and discontinuous boundaries*. International Journal of Mechanical Sciences, 1992 Vol. 34, n°7: pp. 511-520.
- [10] Glinicki, M. A., Vautrin, A., Soukatchoff, P. y Francois-Brazier, J. *Plate impact testing method for GRC materials*. Cement and Concrete Composites, 1994. Vol. 16, n° 4:pp. 241-251.
- [11] Felix, D. H., Rossit, C. A., Laura, P. A. A. y Bambill, D. V. (2005). *Mecánica computacional* Vol. XXIV.