

Caracterización mecánica del comportamiento a fractura del tapial.

Mechanical characterization of rammed earth fracture behavior

Rafael Gallego Sevilla^{*, a}, María Esther Puertas García^b, Héctor Cifuentes Bulté^c,

Fernando Martínez Soto^d, Ignacio Arto Torres^e.

^a Prof. Dr. Department of Structural Mechanics. University of Granada. gallego@ugr.es

^b Prof. Dr. Department of Structural Mechanics. University of Granada. epuertas@ugr.es

^c Prof. Dr. Department of Mechanics of Continuous Means and Theory Structures. University of Sevilla. bulte@us.es

^d Researcher Dr. Department of Structural Mechanics. University of Granada. frms79@ugr.es

^e Researcher. Department of Structural Mechanics. University of Granada. ignacioarto@correo.ugr.es

RESUMEN

Las estructuras ejecutadas con la técnica del tapial están presentes en un gran número de edificaciones residenciales y patrimoniales por todo el mundo. Muchas de ellas además están situadas en localizaciones con una peligrosidad sísmica muy alta, lo que las convierte en muy vulnerables. El conocimiento de las capacidades mecánicas remanentes en el material una vez fracturado nos permite valorar los niveles de seguridad de las estructuras dañadas. Los datos aportados por los ensayos nos indican que el comportamiento en fractura del tapial es el correspondiente a un material cuasi-frágil, que responde al modelo de grieta ficticia de Hillerborg.

ABSTRACT

Rammed earth structures are present in a large number of residential and heritage buildings, all over the world. Many of them are also located in countries with a very high seismic risk, which makes them very vulnerable. The knowledge of the mechanical capabilities remaining in the material once fractured allows us to assess the safety levels of damaged structures. The data provided by the trials indicate that the fracture behavior of rammed earth corresponds to that of a quasi-brittle material, according to the fictitious crack model of Hillerborg.

PALABRAS CLAVE: tapial, daño estructural, energía de fractura.

KEYWORDS: rammed earth, structural damage, fracture energy.

1. Aspectos generales de las edificaciones de tapial.

1.1 Cultural

La técnica del tapial es un sistema de construcción a base de estructuras de muros de carga muy extendido por todo el planeta. Muchas culturas lo han utilizado en sus edificaciones residenciales y patrimoniales incorporando soluciones locales y tradicionales que convierten estas estructuras en elementos de arquitectura vernácula. Estas edificaciones tienen un destacado puesto en el listado de los bienes declarados por la UNESCO como Patrimonio Cultural de la Humanidad, en el que un 17% de dichos bienes son estructuras ejecutadas con tapial [1]. Se pueden citar ejemplos tan singulares y emblemáticos como que el centro histórico de la ciudad de Lyon, los palacios de Lasha en Tíbet, la Gran Muralla China, la Alhambra de Granada o la ciudadela de Bam en Irán. Esta última agrupaba la mayor densidad de edificaciones ejecutadas con tierra del mundo, hasta que un terremoto de magnitud 8.1 ocurrido el 26 de diciembre de 2003 destruyó el 80% de sus estructuras.

1.2 Medioambiental

La construcción con tapial apenas genera huella de carbono durante su vida útil debido a varias singularidades presentes en el propio sistema constructivo y en el material utilizado. La tierra es un material abundante y fácil de obtener, disponible en el mismo lugar donde se pretende levantar la edificación, por lo que no es necesario su transporte a grandes distancias. Además la tecnología y los medios auxiliares empleados para levantar los muros de tapial son muy simples, reutilizables y contruidos a su vez con materiales naturales, ya que son simples tableros de madera a modo de encofrados y un pisón también de madera o de piedra.

A esto se puede unir que una vez cumplido su periodo de vida útil las estructuras de tapial son fácilmente desmontables, devolviendo los muros al terreno. Tampoco se utilizan materiales tóxicos o contaminantes durante su ejecución por lo que no se generan residuos peligrosos.

Finalmente se puede indicar que el espesor de los muros de tapial, unido a la baja conductividad térmica de la tierra, hacen que las edificaciones contruidas con esta técnica mantengan unas condiciones térmicas interiores muy estables. Este motivo hace que estas viviendas requieran muy poco aporte energético para conseguir unos niveles de confort térmico adecuados, reduciendo una vez más su impacto medioambiental.

1.3 Socio-económico

Las edificaciones domésticas ejecutadas con tapial, pese a su gran utilización, presentan un cariz particular unido a la pobreza, ya que en muchas ocasiones su uso ha estado ligado a una escasez de medios materiales o económicos. Por otro lado queda claro al ver muchas edificaciones patrimoniales que las estructuras de tapial pueden tener una vida útil muy larga, si están bien contruidas y mantenidas. Por tanto, para una mayor aceptación social de este tipo materiales, se hace necesario explicar sus ventajas medioambientales y económicas a medio plazo, y estudiar sus debilidades a nivel mecánico para mejorarlas y lograr estructuras más resistentes.

Además, el conocimiento sobre las capacidades reales remanentes de las estructuras existentes se hace imprescindible para analizar el riesgo sobre el patrimonio edificado, expuesto a sollicitaciones sísmicas o de otra naturaleza. Por lo tanto, la caracterización del comportamiento a fractura se convierte en uno de los campos a

desarrollar sobre este tipo de materiales con mayor recorrido.

2. Ejecución de probetas.

Para realizar los ensayos que nos aporten datos sobre la energía de fractura del material se han ejecutado doce probetas prismáticas de 440x100x100 mm, utilizando un encofrado desmontable de madera y un sistema de compactación manual (figura 1). Este sistema de compactación podría suponer inicialmente una dificultad a la hora de comparar los resultados, si bien, los resultados de densidad de todas las probetas está en torno a los 2.00 gr/cm³, con desviaciones inferiores al 1.5%, por lo que la compactación ha tenido un nivel de homogeneidad muy alto. La fecha de ejecución, proporciones tierra:cal y cantidad de agua de amasado aparecen resumidas en la tabla 1. La granulometría del material de tierra utilizado aparece en la figura 2, habiendo limitado mediante cribado el tamaño superior del árido a 10 mm. De esta manera se evita la presencia de concentraciones puntuales de áridos de gran tamaño dentro de la probeta, lo que provocaría piezas poco homogéneas con el consiguiente riesgo de fallo durante los ensayos.



La tierra utilizada se ha mezclado en proporciones 3:1 y 4:1 con cal, utilizada como conglomerante. Se evita el uso de cementos por los problemas de incompatibilidad molecular con las arcillas y por alejarnos de soluciones y

materiales tradicionales [2]. Durante el amasado se utilizan cantidades de agua que hagan que el porcentaje en la probeta esté siempre cercano al 13%, cuya evaporación posterior se controla mediante pesado para conocer su valor residual final, así como su tiempo de secado. Las probetas se han mantenido en condiciones normales de laboratorio durante cinco meses.

Tabla 1. Resumen datos de probetas.

Probeta	Fecha ejecución	Proporción tierra:cal	Agua amasado (cm ³)	% agua en probeta
01	26-06-19	3:1	175	13%
02	15-05-19	3:1	175	13%
03	13-05-19	3:1	175	13%
04	16-05-19	4:1	220	13%
05	03-06-19	4:1	220	13%
06	03-06-19	4:1	220	13%
07	04-06-19	3:1	175	13%
08	04-06-19	3:1	175	13%
09	06-06-19	3:1	175	13%
10	06-06-19	4:1	220	13%
11	07-06-19	4:1	220	13%
12	07-06-19	4:1	220	13%

De forma paralela se ha utilizado la técnica de medición mediante ultrasonidos para obtener datos de relación entre la velocidad de propagación dentro del material con el aumento de la resistencia, ligado a distintos grados de densidad y de fraguado o carbonatación de la cal existente en la masa. Para ello se han realizado mediciones con los transductores colocados de manera enfrentada, midiendo el tiempo transcurrido en el sentido longitudinal de la probeta.

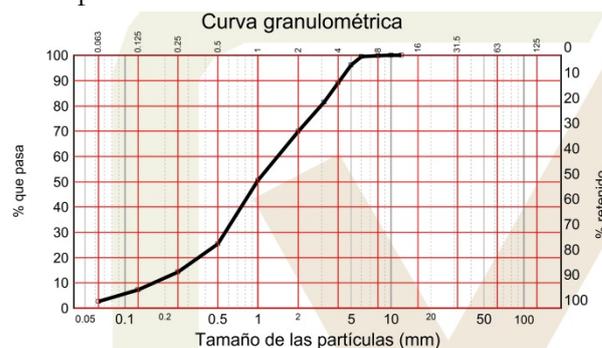


Figura 2. Curva granulométrica del material.

Mediante estas dos técnicas de control se han podido establecer los plazos a partir de los cuales las propiedades de las probetas se consideran estables. Los procesos de carbonatación de la cal se estudian a partir de las piezas una vez que han sido utilizadas y fracturadas en la prensa, ya que es necesario acceder al interior de la masa para medir los frentes de carbonatación. Para ello se utiliza un indicador de pH con fenolftaleína al 1% en etanol 95° (figura 3).



Figura 3. Medida del frente carbonatado.

3. Resultados de los controles previos.

Como se ha indicado previamente, sobre todas las probetas se ha realizado un control para

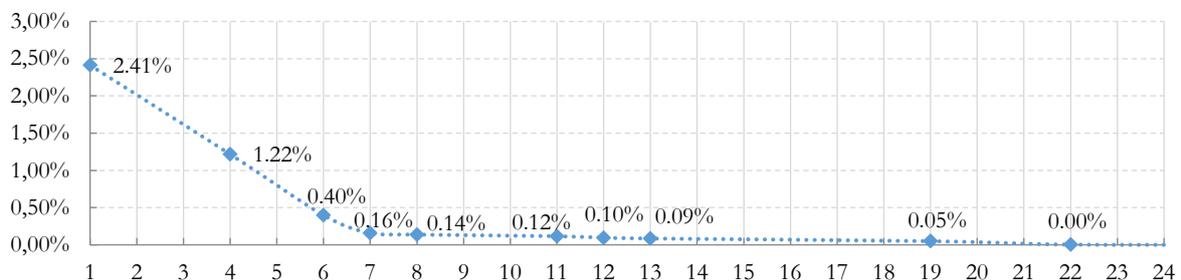


Figura 4. Evolución de humedad relativa (% en peso) con el tiempo (días).

poder establecer el punto de estabilización de las mismas antes de ser sometidas a los ensayos de fractura. A continuación se exponen los resultados de los dos procedimientos utilizados.

3.1 Humedad interior

Mediante el pesado de las probetas se ha ido analizando la velocidad en la pérdida de humedad interior, encontrando un patrón similar en las doce probetas. Tal y como se puede observar en la figura 4, donde se relaciona la evolución de la humedad relativa (como porcentaje del peso) con el tiempo en días, a partir de la semana de su fabricación la pérdida de humedad es muy baja, con valores en torno al 0,14%, llegando a valores inferiores al 0,01% a partir de la semana tercera.

Si se toman estos datos como la pérdida de peso total de la probeta, se observa que de forma general en el octavo día desde su fabricación la probeta ha perdido un 7,00% de su peso con una pérdida final de un 7,78% al alcanzar el día 22. A partir de ese momento, prácticamente todas las probetas, presentan un comportamiento asintótico. De forma gráfica los resultados aparecen en la figura 5.

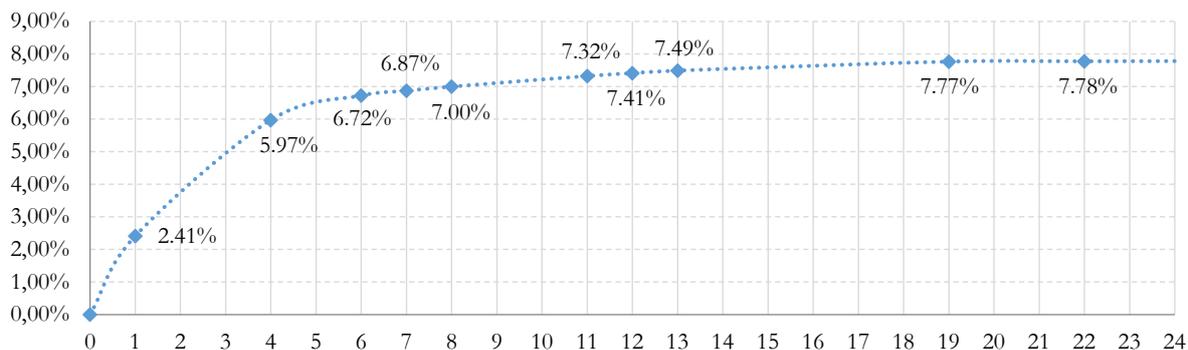


Figura 5. Evolución del peso de la probeta (en %) con el tiempo (días).

3.2 Ultrasonidos

Como se ha indicado previamente, todas las probetas se han sometido también a un control de su densidad y fraguado mediante ultrasonidos, para conocer el momento a partir del cual sus propiedades serán más estables. La

figura 6 resume los resultados obtenidos sobre el total de las probetas analizadas. Se aprecia como existe un aumento de la velocidad media durante las dos primeras semanas, estabilizándose las medidas a partir de ese momento en valores en torno a los 1900 m/s.

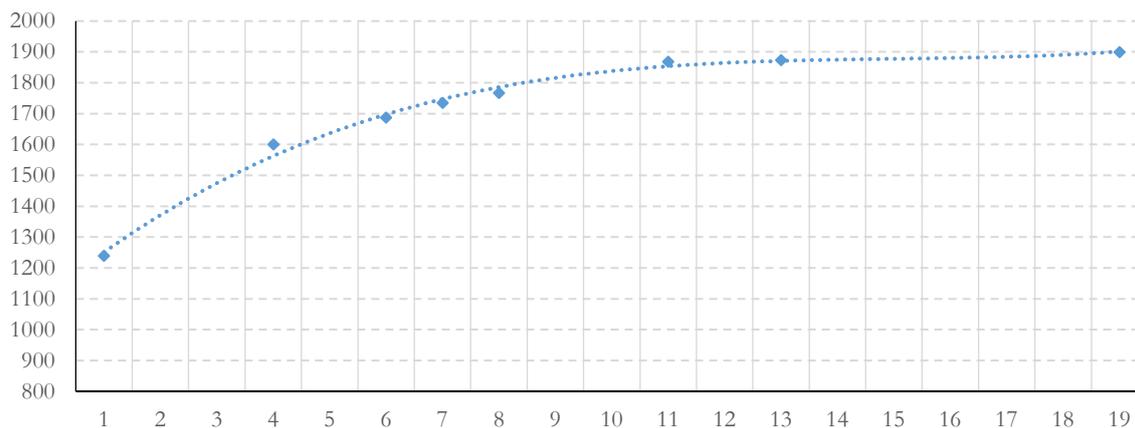


Figura 6. Evolución de la velocidad de propagación de las ondas (m/s) con el tiempo (días).

Con estos datos se puede entender que a partir de las tres semanas desde su fabricación, las probetas son estables, no presentan modificaciones en relación a su contenido en agua. El parámetro que no es posible determinar a priori es la carbonatación, que necesita ser medido a partir de las probetas ya fracturadas.

4. Comportamiento en fractura.

4.1 Energía de fractura

Para la determinación de la energía de fractura se han realizado ensayos a flexión en tres puntos sobre probetas entalladas. Las probetas son prismáticas de $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}^3$. La profundidad de la entalla prevista es de $1/6$ del canto de la probeta. Dicha entalla se ha realizado mediante corte con sierra de disco. En la Tabla 2 se muestran las dimensiones reales de

la sección central de las probetas medidas tras los ensayos.

El procedimiento seguido para la obtención de la energía específica ha sido el método del trabajo de fractura RILEM [3], con las correcciones propuestas por Elices et al [4-6].

El ensayo se ha realizado mediante control de la apertura de la boca de la grieta a través de un transductor de pinza. Además, se ha medido el desplazamiento vertical de la sección transversal de la probeta mediante un transductor lineal inductivo, montado sobre un marco rígido acoplado a la probeta. Los apoyos y el sistema de aplicación de la carga son antitorsión, con el objetivo de evitar torsiones parásitas. En la Figura 7 se muestra una fotografía de uno de los ensayos realizados. Como se aprecia, se ha realizado la compensación del peso propio de la probeta mediante la colocación de gomas elásticas.



Figura 7. Ensayo a flexión en tres puntos.

En la Tabla 2 se muestran los resultados del ensayo y los valores obtenidos de la energía de fractura específica para cada una de las probetas, excepto las probetas 02, 07 y 08 que se rompieron durante su manipulación o durante la realización de la entalla. Concretamente, se muestran los valores del ancho de la probeta (B), canto (D), profundidad de entalla (a_0), área de la ligadura (A_{lig}) como área de material resultante al realizar la entalla, trabajo de fractura W_F , incluyendo el trabajo de fractura medido sobre la curva carga-

desplazamiento y el trabajo de fractura no medido, obtenido mediante el procedimiento del ajuste de la cola de la curva y la energía específica de fractura (G_F). En la Figura 8 se muestra la curva carga-desplazamiento obtenida para la probeta 01, donde se aprecia que la forma de la curva es cualitativamente similar a la de un hormigón en masa.

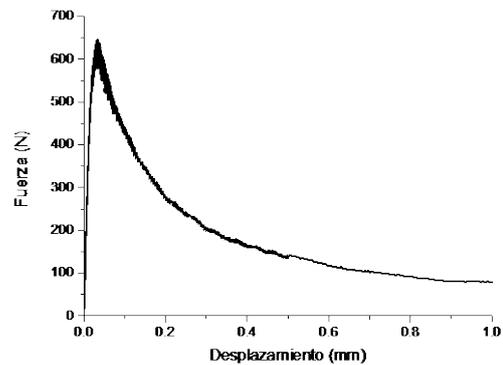


Figura 8. Curva carga-desplazamiento (probeta 01).

Tabla 2. Valores de energía de fractura.

Prob.	B (mm)	D (mm)	a_0 (mm)	A_{lig} (mm ²)	W_F (Nm)	G_F (N/m)
01	102	102	35	6834	0.215	31
03	104	104	37	6968	0.257	37
04	104	104	34	7210	0.180	25
05	103	103	34	7038	0.083	12
06	102	102	34	6936	0.148	21
09	105	103	32	7455	0.238	32
10	103	102	33	7107	0.152	21
11	103	102	34	7004	0.153	22
12	104	102	34	7072	0.185	26

Como se observa, existe una dispersión elevada entre los distintos valores, si bien se observan valores cercanos en función de la dosificación tierra:cal. Debido a que existen diferencias entre los materiales de las distintas probetas, ha preferido mostrarse los resultados de cada una de las probetas ensayadas. No obstante, el valor medio de la energía de fractura es de 25 N/m con una variación de ± 7 N/m, que equivale a un coeficiente de variación de $\pm 30\%$.

Si se agrupan los resultados en función de la relación tierra:cal de las muestras, se puede obtener la energía de fractura para las probetas 01, 02, 03, 07, 08 y 09, con un valor de:

$$G_{F_{3:1}} = 33 \text{ N/m} \pm 9\%$$

Asimismo, obteniendo la energía de fractura para las probetas 04, 05, 06, 10, 11 y 12:

$$G_{F_{4:1}} = 21 \text{ N/m} \pm 23\%$$

Como se observa, la relación tierra:cal influye sobre la energía de fractura, siendo mayor cuanto menor es dicha relación.

4.2 Ley de ablandamiento bilineal

De acuerdo con el modelo de grieta discreta de Hillerborg, se ha obtenido la ley de las tensiones cohesivas en el vértice de la grieta mediante el modelo de bisagra [7]. La ley considerada es bilineal, tal y como la definida en la Figura 9.

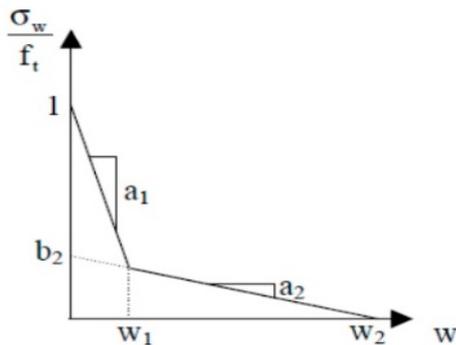


Figura 9. Ley de ablandamiento bilineal.

En la Figura 10 se muestra a modo de ejemplo el ajuste obtenido para la probeta 09. En la Tabla 3 se muestran los principales parámetros de la ley de ablandamiento bilineal obtenida para cada una de las probetas ensayadas.

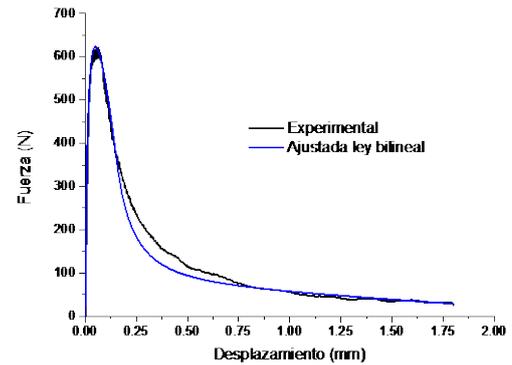


Tabla 3. Valores de ley de ablandamiento.

Probeta	f_t (MPa)	σ_1 (MPa)	a_1 (mm ⁻¹)	a_2 (mm ⁻¹)
01	0.50	0.06	12	0.041
03	0.50	0.05	11	0.047
04	0.35	0.05	12	0.060
05	0.31	0.03	13	0.062
06	0.45	0.05	15	0.058
09	0.46	0.06	10	0.067
10	0.39	0.05	15	0.060
11	0.46	0.05	15	0.042
12	0.56	0.05	15	0.042

Como se desprende de los resultados, el comportamiento del tapial analizado se ajusta muy bien al modelo de grieta discreta de Hillerborg, por lo que puede considerarse que tiene un comportamiento cuasi-frágil similar, desde el punto de vista cualitativo, al hormigón en masa. En este caso, la desviación de los resultados respecto a su valor medio no es excesivamente elevada, siendo el mayor coeficiente de variación obtenido del 18%.

Realizando un análisis sobre la influencia de la relación tierra:cal en los valores de la ley de ablandamiento, se obtienen los valores siguientes para una relación 3:1:

$$f_{t_{3:1}} = 0.49 \text{ MPa} \pm 5\%$$

$$\sigma_{1_{3:1}} = 0.06 \text{ MPa} \pm 10\%$$

$$a_{1_{3:1}} = 11 \text{ mm} \pm 9\%$$

$$a_{2_{3:1}} = 0.05 \text{ mm} \pm 26\%$$

Para una relación de 4:1 los valores son los siguientes:

$$f_{t,4:1} = 0.42 \text{ MPa} \pm 21\%$$

$$\sigma_{1,4:1} = 0.05 \text{ MPa} \pm 17\%$$

$$a_{1,4:1} = 14 \text{ mm} \pm 9\%$$

$$a_{2,4:1} = 0.05 \text{ mm} \pm 17\%$$

Como se observa, se produce una disminución de la resistencia a tracción del tapial, para un aumento de la relación tierra:cal. Este parámetro, responde de idéntica forma que la energía de fractura, estando ambos relacionados con la mayor cantidad de agua de amasado necesaria para su fabricación. La mayor cantidad de agua genera una mayor microfisuración en la matriz del tapial, que está en consonancia con el aumento de la pendiente inicial a_1 de la ley cohesiva bilineal [7].

5. Conclusiones.

De los resultados obtenidos se extraen las siguientes conclusiones:

- El comportamiento en fractura del tapial es totalmente similar, desde un punto de vista cualitativo, al del hormigón en masa. Por lo que se puede considerar el tapial como un material causi-frágil que responde al modelo de grieta discreta de Hillerborg. La ley de ablandamiento del tapial se ajusta de forma muy aceptable a una curva bilineal.
- Existe una influencia de la relación tierra:cal empleada en su fabricación, sobre su comportamiento en fractura.

Referencias

- [1] Gandreau, D., L. Delboy, and T. Joffroy. "UNESCO World heritage inventory of earthen architecture." (2012).
- [2] Ontiveros Ortega, E., I. Valverde Espinosa, and E. Sebastián Pardo. "Técnicas de análisis aplicadas al estudio de los tapiales de las

murallas de Granada." Actas del III Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación. Granada: CICOP, International Centre for the Preservation of Architectural Heritage, 1996.

- [3] RILEM, "TCM-85: Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams," Mater. Struct., vol. 18, no. 106, pp. 287–290, 1985.
- [4] G. V Guinea, J. Planas, and M. Elices, "Measurement of the fracture energy using three-point bend tests: Part 1—Influence of experimental procedures," Mater. Struct., vol. 25, no. 4, pp. 212–218, 1992.
- [5] J. Planas, M. Elices, G. V Guinea, and J. Planas, "Measurement of the fracture energy using three-point bend tests: Part 2 - Influence of bulk energy dissipation," Mater. Struct., vol. 25, pp. 305–312, 1992.
- [6] M. Elices, G. V Guinea, and J. Planas, "Measurement of the fracture energy using three-point bend tests: Part 3 - Influence of cutting the P-d tail," Mater. Struct., vol. 25, pp. 327–334, 1992.
- [7] H Cifuentes, J.D. Ríos and E.J. Gómez, "Effect of mix design on the size-independent fracture energy of normal- and high-strength self-compacting concrete" *Materiales de Construcción*, vol. 68, e144, 2018.