

Comportamiento de hormigón con partículas cerámicas reforzadas o no con películas de resina de epoxi.

M^a Eugenia Parrón-Rubio¹, Francisca Pérez-García², José Manuel García-Manrique³, Antonio Gonzalez-Herrera³ M^a Dolores Rubio-Cintas⁴

¹ARHENE – TEP 951, Universidad de Cádiz, España. mariaeugenia.parron@gm.uca.es

²ARHENE – TEP 951, Ingeniería civil de materiales y fabricación, Universidad de Málaga, España, perez@uma.es

³Ingeniería civil de materiales y fabricación, Universidad de Málaga, España, josegmo@uma.es.

³Ingeniería civil de materiales y fabricación, Universidad de Málaga, España, aghumaes@gmail.com

⁴ARHENE – TEP 951, Ingeniería Industrial y Civil, Universidad de Cádiz, España. Mariadolores.rubio@uca.es

Resumen

El creciente interés por el estudio de nuevos materiales resistentes a diferentes solicitaciones hace del análisis de nuevas mezclas de componentes para la obtención de mayor resistencia dentro del campo de los materiales compuesto y en nuestro caso para el hormigón. El carburo de silicio se utiliza generalmente como blindaje en determinados vehículos militares, por ser la cerámica un material que presenta propiedades mecánicas muy interesantes tanto de dureza como alta resistencia a la compresión. En este estudio se han utilizado partículas de cerámica en las que se ha creado alrededor una película con una resina de epoxi de alta resistencia para incorporarlas al hormigón en su fabricación. Pretende desarrollar un hormigón tanto resistente a los esfuerzos de tracción como los esfuerzos de compresión. Estos ensayos realizados muestran un comportamiento mejorado del hormigón caracterizado por la inclusión de partículas cerámicas en diferentes tamaños con y sin película de resina. El comportamiento abrasivo de estos materiales frente al fuego y al impacto puede ser mejorado para diferentes necesidades con su estudio de resistencia.

Palabras clave: Hormigón, partículas cerámicas, resinas de epoxi y resistencia.

Abstract

The growing interest in the study of new materials resistant to different stresses makes the analysis of new mixtures of components to obtain greater resistance within the field of composite materials and in our case for concrete. Silicon carbide is generally used as armor in certain military vehicles, as ceramic is a material that has very interesting mechanical properties, both in terms of hardness and high resistance to compression. In this study, ceramic particles have been used in which a film has been created around them with a high-resistance epoxy resin and incorporated into the concrete in its manufacture. It aims to develop a concrete that is both resistant to tensile and compression stresses. These tests carried out show an improved behavior of the concrete characterized by the inclusion of ceramic particles in different sizes with and without a resin film. The abrasive behavior of these materials against fire and impact can be improved for different needs with their resistance study.

Keywords: Concrete, ceramic particles, epoxy resins and resistance

1. Introducción

Desde la época de las construcciones del Imperio de Roma como en las edificaciones e infraestructuras de la cultura Islámica, diferentes tipos de materiales se han utilizado en la composición y dosificación del

hormigón en su concepción ancestral, en su uso en la ingeniería y arquitectura.

El hormigón contemporáneo es un tipo de material heterogéneo compuesto por cemento y una cierta proporción de otros materiales como el árido y agua, que solidifica y endurece por un proceso químico. Las propiedades mecánicas macroscópicas del hormigón

son más complejas que la de otros materiales debido a que el cambio en el gradiente del árido grueso y mortero de cemento endurecido puede tener diferentes comportamientos mecánicos[1], así como una mayor resistencia al impacto. Los diferentes tamaños utilizados en las dosificaciones del hormigón generan un problema dentro de la ciencia de los materiales afectando a la proporción de la mezcla, así como al grado de resistencia del hormigón.

Estudios recientes de los profesores Lu e Heidari [2,3], sobre materiales de partículas cerámicas incluidos en el hormigón, encuentran una aparente mejora en la resistencia tanto a la resistencia a tracción como la de compresión mecánica y sollicitud dinámica.

Una característica en el hormigón es la influencia de la rugosidad y el tipo de árido utilizado que infliere las propiedades precisas a la unión de la zona interfacial de la matriz de cementosa, mejorando la unión en función de la rugosidad del mismo. Si las propiedades macroscópicas del hormigón eran complejas tendremos que comentar las propiedades del hormigón cuando nos planteamos su estudio microscópico, es decir, esta etapa superficial entre los distintos elementos que intervienen en su dosificación, siendo fundamental la relación agua/cemento. El nexo de unión entre partículas se produce en este interfaz conocido científicamente como ITZ y sobre al que se vinculan la mayoría de propiedades de la *célula* cementosa y formulamos *célula* y no *matriz*, en este caso, por producirse esta unión en una zona límite entre partículas y superficies de áridos. De aquí la importancia en la dosificación propuesta en este artículo con la incorporación de partículas cerámicas recubiertas por resina epoxi, se pretende relacionar este efecto de mayor resistencia mecánica en este hormigón a minorar los espacios intersticiales justificados entre distintos tipos de tamaño de partículas y su absorción elemental.

La alta resistencia a compresión y la baja densidad de los materiales cerámicos lo hacen particularmente atractivo como material resistente a impactos.

Otra de las características en las propiedades mecánicas es la mejora de la resistencia a compresión optimizando la distribución granulométrica, y reduciendo el contenido de agua en el hormigón.

Las nanopartículas a su vez mejoran la estructura del hormigón acelerando la formación de gel C-S-H así como las propiedades mecánicas y de durabilidad del mismo[4]. Estas nanopartículas tienen alcances importantes en la hidratación y microestructura de la pasta como el aumento en la hidratación inicial a través de la reacción puzolánica, que reduce la porosidad [5]. Por otro lado el mortero de resina de epoxi puede tener diferentes usos en el hormigón [6,7] como conexión de materiales de hormigón, refuerzos de estructuras, por ser un material aglutinante químico fuerte. El rendimiento y la durabilidad a largo plazo de estos compuestos es importante garantizando la fiabilidad y

sostenibilidad en infraestructuras civiles durante su vida útil[8].

Investigadores han realizado adiciones de este tipo de resinas a morteros conjuntamente con cenizas volates para evitar el ataque químico o bien como refuerzo en estructuras [9,10].

Una de las características de este material es la resistencia a la compresión simple, por tanto, el estudio del comportamiento mecánico del hormigón en términos de compactación para definir la disminución inelástica del volumen a alta presión, mediante el cierre de oclusiones que puedan existir en el interior del mismo, es un factor a considerar. Este material es usado con mayor frecuencia como adhesivo de uniones o bien como matrices de polímeros, generando fallas en el hormigón en ambientes húmedos ya que dependen principalmente de la unión entre la epoxi y las partículas circundantes, en la primera fase de aglutinamiento[11].

Por otro lado, se considera que la relación agua/cemento es importante en la realización de los morteros ya que cuanto mayor es la proporción de agua con respecto del cemento, mayor es el aumento de compactación del mortero, sabiendo que existe una estrecha relación entre la micro estructura de los hormigones y el comportamiento a compresión y flexión dentro de este parámetro fundamental (relación agua/cemento).

Este trabajo tiene por objeto utilizar partículas cerámicas de diferentes tamaños pelicularizando algunos tamaños de las partículas cerámicas con resinas de epoxi realizándose ensayos a compresión simple con diferentes tipos de hormigón y ensayos a flexión en tres puntos para conocer la capacidad resistente en diferentes estudios y observando cual es el comportamiento de la resistencia a la tracción, así como la resistencia a la compresión con otras dosificaciones en la sustitución de los áridos tanto gruesos como finos para ver el comportamiento mecánico de los mismos.

2. Metodología

2.1. Materiales

En lo referente a los materiales se han utilizado partículas cerámicas de diferentes tamaños que varían desde 0,2 mm hasta 10 mm de diámetro con una desviación de 0,1 mm en esta horquilla. Para estudiar el efecto de forma de las partículas sobre la cohesión entre la matriz y dichas partículas se usaron dos formas de partícula, una de circular (4mm de diámetro) y otra de forma angular obtenida por sinterización y posterior trituración de la misma (0,2 y 3 mm, 3 y 6 mm y 5 y 10 mm) y simular el efecto *célula* en la matriz cementosa. Otras características mecánicas de este tipo de partículas es la densidad cuyo valor se encuentra entre 3500/3700 kg/m³, y el módulo elástico E es 290 GPa.

La composición de las partículas cerámicas en la alúmina sinterizada son las siguientes:

Tabla 1. Composición de la alúmina

Al ₂ O ₃	Na ₂ O	SiO ₂	Fe ₂
99.5 %	0.4 %	0.09 %	0.02 %

Por otro lado, la resina de epoxi que se utilizó para pelicularizar las partículas fue el Nitoflor FC-130, este material es una resina al agua con una densidad de 1,39 g/cm³ a 20°C.

El árido utilizado fue piedra caliza triturada procedente de plantas de fabricación comercial ubicadas en el Campo de Gibraltar. La proporción de árido utilizado fue de 50% arena de 0,2 y 0,4 mm y 50% de grava de 0,1-16 mm. La granulometría de cada árido utilizado fue según UNE-EN 933-10.

Para cumplir con los requisitos de trabajabilidad del hormigón se utilizó un aditivo superplastificante: Glenium ACE-324, fabricado por BASF. Se utilizó agua corriente doméstica.

El cemento utilizado para el desarrollo de las probetas fue cemento Portland ordinario con las siguientes características: tipo CEM I 52.5 R con una densidad de 3.1 g/cm³. Los componentes del cemento fueron según el fabricante. Se utilizó este tipo de cemento por no contener ningún tipo de aditivo que enmascare los resultados obtenidos.

2.2. Dosificación de los materiales

Para la preparación de las muestras se prepararon morteros con distintas sustituciones de áridos por partículas cerámicas que se describen a continuación.

Para la dosificación de los materiales se dividieron según el diámetro de partícula, la pelicularización de las de mayor diámetro y el porcentaje que se utilizó para cada uno de ellos. La descripción de las amasadas para que resulte más fácil su identificación se han realizado en función de la cantidad de las partículas pelicularizadas o no y dosificación en cada uno de los morteros realizados.

Las amasadas se definieron como:

- OPC: Hormigón Portland de Control
- HCPE1: Sustitución del árido grueso al 50 % por partículas cerámicas con película de resina epoxi (esféricas).
- HCPE2: Sustitución del árido grueso al 100 % por partículas cerámicas con película de resina epoxi (esféricas).
- HSPE3: Sustitución del árido grueso e intermedio al 50 % por partículas cerámicas sin película de resina epoxi.
- HSPE4: Sustitución del 100% árido grueso por partículas cerámicas sin película de resina de epoxi.

- HSPE5: Sustitución del árido intermedio al 50 % por partículas cerámicas sin película de resina epoxi.
- HSPE6: Sustitución del árido intermedio y fino al 100 % por partículas cerámicas sin película de resina epoxi.
- HSPE7: Sustitución del árido fino al 50 % por partículas cerámicas sin película de resina epoxi.
- HSPE8: Sustitución del árido fino al 100 % por partículas cerámicas sin película de resina epoxi.

Para la pelicularización de las partículas cerámicas con resina epoxi, se lavaron previamente y secaron para posteriormente introducirlas dentro de la mezcla. Para eliminar el exceso de resina y que la partícula quedase perfectamente homogeneizada, se centrifugaron y posteriormente se secaron durante 24 horas sobre una superficie plana quedando separadas entre sí.

El hormigón se preparó con una mezcladora de 20 litros que posteriormente se vertieron en moldes de plástico duro, vibrándolos hasta su homogeneización. Las probetas se cubrieron con plástico durante 24 horas y posteriormente se desmoldaron y se llevaron a una cámara húmeda para su curado a una humedad relativa no inferior al 95% y una temperatura de 20 ± 2 °C. Finalmente las probetas se extruyeron según norma UNE-EN 12390-4.

En cuanto al ratio relación agua cemento que se utilizó para la compactación del material es;

$$a/c=0,5$$

Realizado la prueba de consistencia según normativa UNE-EN 12390-2, obteniendo una consistencia blanda de 7,1 mm según normativa.

3. Resultados y discusión

3.1. Pruebas de compresión uniaxial

Para la realización del ensayo se utilizaron 6 probetas para cada amasada/día, utilizando testigos de probetas con unas dimensiones de diámetro Ø 45 mm y 90 mm de altura, refrentando las superficies para que quedaran perfectamente planas según exige la normativa UNE-EN 12504-1:2020 [12] y considerando su desviación típica de 1,95 a 1, si el árido grueso no excede de 20 mm de diámetro. De igual manera se realizaron también ensayos con probetas cúbicas de 40 mm × 40 mm procedentes de la rotura a flexión ya que según Neville[13] la resistencia de la probeta modificada sería un 5% superior a la probeta cúbica normal del mismo tamaño, debido a la contención lateral por excesos en relación al cubo. Se obtuvo la relación promedio utilizando las dos secciones de la probeta de los especímenes ensayados en flexión. Las roturas se realizaron a 7 y 28 días según norma UNE-EN 12390-4:2020 [14] siendo los resultados los que se muestran en la tabla 2. Para la rotura de los especímenes se

utilizó una máquina hidráulica que dispone de dos platos aplicando una carga de forma continua y sin choques bruscos. Las desviaciones propuestas por las especificaciones de la máquina no superan el 1%.

Tabla 2. Resultados de la compresión uniaxial correspondiente a las pruebas propuestas de partículas cerámicas sustituidas

Tipo de hormigón	Rotura 7 días cúbica (MPa)	Rotura 28 días cúbica (MPa)	Rotura 7 días cilíndrica (MPa)	Rotura 28 días cilíndrica (MPa)
OPC	21,07	60,04	20,55	65,54
HCPE1	20,66	61,90	22,73	63,08
HCPE2	26,14	72,32	27,72	80,47
HSPC3	24,25	68,28	27,03	73,14
HSPE4	22,89	66,81	26,52	69,87
HSPE5	18,29	52,14	20,20	54,49
HSPE6	30,13	82,25	27,21	88,34
HSPE7	24,03	73,96	32,65	75,22
HSPE8	22,91	68,35	25,56	69,25

Como se comentó anteriormente se parte de un hormigón convencional OPC para realizar una comparativa con el hormigón con diferentes adiciones de partículas cerámicas.

En la tabla 2 anterior, se observa que prácticamente todos los resultados son similares a 7 días con respecto al hormigón de control. Se nota que el hormigón HCPE1 con la sustitución del 50% con película de resina es muy similar al hormigón de control, con una desviación inferior al 2% de resistencia mecánica. Reseñar que según Tuakta[15] el contenido de humedad en la resina epoxi no recupera la propiedad mecánica inicial durante el fraguado, atribuyéndose a la pérdida de densidad por hinchazón permanente debido a la presencia de agua. En el HSPC6 con un 100% de sustitución de árido fino e intermedio se advierte un incremento de resistencia importante en este estadio inicial que perdura hasta su etapa final, ello hace suponer la conjetura anticipada de relleno en los espacios intersticiales de los áridos mayores con el que se sustituyó tanto el árido fino como el intermedio, generando una mejor y mayor unión en cada célula cementosa de las superficies, siendo en el resto de las probetas cúbicas muy similar. Se apunta que estas partículas cerámicas no están recubiertas de resina epoxi.

De igual manera en las probetas cilíndricas existe un incremento de resistencia a compresión del 22,7% en la HCPE2, la diferencia puede ser la extracción de los testigos que en algún punto contenga una cantidad mayor de alumina pelicularizada. Análogamente el HSPE6 presenta un incremento de resistencia a la compresión uniaxial entre el 29 y el 32% con respecto al hormigón convencional. Este aumento igualmente, es debido a que las partículas más pequeñas se introducen en los espacios intersticiales generando

menor cantidad de poros y por lo tanto impidiendo que se generen huecos en el hormigón. El resto de las mezclas son similares al hormigón de control con incrementos poco reseñables.

Hay que especificar que en algunas de las probetas aparecieron oclusiones o poros en el material, generándose la rotura en las porosidades más grandes conduciendo con una mayor rapidez a la rotura del espécimen. Esto nos lleva a concebir en la necesidad de un estudio, análisis y seguimiento de los procedimientos, ejecución y estructura de las pruebas y comprobar la bondad de las mismas para posteriormente y con el beneplacito de lo desarrollado, investigar esta hipótesis mediante análisis de microscopía electrónica que verifique este supuesto.

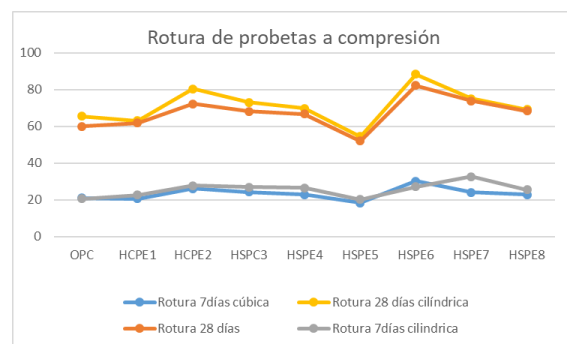


Figura 1. Gráfica de roturas de compresión

En la gráfica de la figura 1 se observa con más detalle cual es la variación de las roturas tanto a 7 como a 28 días, tanto para las probetas cilíndricas como cúbicas observado que la variación que se produce en ambas secciones es muy similares en cuanto a la capacidad resistente de las mismas.

3.2. Rotura en flexión

En el estudio en rotura en flexión se realizaron 2 pruebas por cada uno de los ensayos a 28 días. Las probetas se fabricaron en moldes paralelepípedos rectangulares cuyas dimensiones son 40×40×160 mm dando una relación de $\frac{L_s}{h} = 4$ suficiente para garantizar el predominio de las tensiones internas en el estudio en flexión, permitiendo obtener un nivel de resistencia última para un volumen efectivo en el estudio realizado ya que el tamaño de partícula es el óptimo. Las pruebas de flexión se realizaron según norma UNE-EN-12390-5:2020[16], siendo el sistema de rotura de tres puntos sin entalla y utilizando una máquina de ensayos que cumple con las características de sistemas de regulación de aplicación de cargas así como de elementos de transmisión para la aplicación de fuerzas perpendiculares a la cara de la probeta estando formado por dos rodillos interiores en los que se apoya la

probeta y un rodillo de aplicación de carga. Mediante este a su vez, se conservaron las probetas sin perder humedad antes de la rotura.



Figura 2. Rotura flexotracción

Tabla 3. Resultados rotura en flexotracción correspondiente a las pruebas propuestas de partículas cerámicas sustituidas

Referencia	Resistencia (MPa)
OPC	16,56
HCPE1	13,465
HCPE2	19,425
HSPE3	13,81
HSPE4	16,76
HSPE5	16,57
HSPE6	18,02
HSPE7	19,57
HSPE8	19,395

En la discusión de los resultados correspondiente a esta tabla número 3, se observa que HCP1y HSPE3 están alrededor del 16% por debajo del hormigón de control, es debido a la que unión de las partículas cerámicas no ha sido la correcta o bien el tamaño de partícula haya influido en los enlaces de unión como muestra la figura. Igualmente se manifiesta la necesidad de un estudio, análisis y seguimiento de los programaciones, actuación y organización de las pruebas y comprobar la satisfacción de las mismas para continuar esta investigación.

Figura 3. Rotura probeta HCPE1



Se observa que la unión de los materiales no ha sido la esperada como ocurrió en los ensayos de compresión, quedando muchos huecos intermedios que hacen más frágil el material realizado.

Por el contrario, se repara en que las pruebas el resto de los especímenes se encuentran por encima del hormigón de control llegando hasta un 17,3% en la sustitución del 100% de las partículas cerámicas con películas de resina de epoxi por el árido grueso. De igual manera sufre un incremento prácticamente igual en la sustitución de las partículas cerámicas intermedias como finas.



Figura 4. Rotura de probeta HSPE6

En la figura 4 se observa que la homogeneidad en el material es mayor en partículas cerámicas intermedias y finas que con un diámetro mayor. Esta es la probeta modelo que se debe estandarizar en la continuación de este trabajo de investigación haciendo intervenir en el modelado distintas relaciones agua/cemento y no sólo estudiar su resistencia mecánica marcada por el Código Estructural o por el Eurocódigo, sino dar un salto cualitativo en este tipo de materiales analizando la mecánica de la fractura del material que permita un uso más racional del mismo,

4. Conclusiones y líneas de investigación futuras

El objetivo principal del análisis fue estudiar la resistencia mecánica del hormigón con partículas cerámicas con y sin película de resinas de epoxi.

El principal resultado es una mayor resistencia tanto a la compresión como a la flexotracción en el hormigón con sustitución de partículas cerámicas.

Las conclusiones más destacadas se muestran a continuación.

- Las pruebas realizadas tanto de compresión uniaxial como flexotracción muestran un comportamiento quebradizo del hormigón básicamente en algunos de los especímenes estudiados.
- A excepción del hormigón en los que se sustituye árido fino e intermedio por alúmina HSPE6 se obtiene un valor más elevado que en el resto de las combinaciones.
- Las probetas con películas de resina de epoxi HCPE1 tienen una disminución de la capacidad resistente básicamente en aquellas que se sustituyó el 50% del árido grueso por las partículas cerámicas del mismo tamaño.
- El comportamiento en los cuales se sustituyó el 100% del árido intermedio y fino se obtuvo una resistencia del 40% sobre el hormigón convencional, tanto en el resultado de compresión como de flexotracción, es decir como conclusión principal de este trabajo se advierte, un incremento de resistencia importante en este estadio inicial que perdura hasta su etapa final, ello hace suponer la teoría anticipada de relleno en los espacios intersticiales de los áridos mayores con el que se sustituyó tanto el árido fino como el intermedio, generan una mejor y mayor unión en cada célula cementosa de las superficies, y se presupone una minoración de las fisuraciones y poros que tanto perjudican al hormigón.
- En cuanto a la desviación de los resultados obtenidos es cambiante y variable, pero dentro del control de la Norma. Esto es debido a factores, que como se expone en la discusión de los resultados, o bien de la metodología novedosa empleada o por falta de especificaciones técnicas de estos materiales de sustitución en un material tan complejo como es el hormigón.

Hay que destacar en esta investigación que el aumento de resistencia que se produce en el hormigón es beneficioso para cualquier estructura, pero fundamentalmente la capacidad resistente que tiene al impacto y a la alta temperatura que puede soportar dicho material que será cuestión de estudio en otros artículos.

Tanto en la discusión de los resultados de resistencia a la compresión como los resultados de la resistencia a flexión se hacen dos propuestas que se resumen a continuación como planificación futura:

- La necesidad de un estudio, análisis y seguimiento de los procedimientos, ejecución y estructura de las pruebas y comprobar la bondad de las mismas.
- Establecer la probeta modelo que normalice la continuación de este trabajo de investigación y no sólo estudiar su resistencia mecánica marcada por el Código Estructuras, UNE o por el Eurocódigo 2, sino dar un salto cualitativo en este tipo de materiales analizando su mecánica de la fractura y permitir un uso más racional del mismo, sobre todo en estos tiempos que corren donde el encarecimiento de la construcción debido a la falta de materiales básicos hace concebir un uso magnificado de estos.

5. Referencias

- [1] L. JIN, W. YU, X. DU, S. ZHANG, D. LI, Meso-scale modelling of the size effect on dynamic compressive failure of concrete under different strain rates, *Int. J. Impact Eng.* 125 (2019) 1–12. <https://doi.org/10.1016/J.IJIMPENG.2018.10.011>.
- [2] Y.B. Lu, Q.M. Li, About the dynamic uniaxial tensile strength of concrete-like materials, *Int. J. Impact Eng.* 38 (2011) 171–180. <https://doi.org/10.1016/J.IJIMPENG.2010.10.028>.
- [3] A. Heidari, D. Tavakoli, A study of the mechanical properties of ground ceramic powder concrete incorporating nano-SiO₂ particles, *Constr. Build. Mater.* 38 (2013) 255–264. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.07.110>.
- [4] E. Dişçi, R. Polat, The influence of nano-CaO and nano-Al₂O₃ and curing conditions on perlite based geopolymers concrete produced by the one-part mixing method, *Constr. Build. Mater.* 346 (2022) 128484. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.128484>.
- [5] A.M. Rashad, A synopsis about the effect of nano-Al₂O₃, nano-Fe₂O₃, nano-Fe₃O₄ and nano-clay on some properties of cementitious materials – A short guide for Civil Engineer, *Mater. Des.* 52 (2013) 143–157. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2013.05.0>

- 35.
- [6] H. Huang, J. Hao, B. Zhao, X. Zhao, M. Li, J. Li, J. Liu, Experimental Study on Low Temperature Tensile Properties of Epoxy Mortar in Hydropower Project, *Energy Procedia*. 105 (2017) 1205–1210. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.03.414>.
- [7] H. Nordin, B. Täljsten, Testing of hybrid FRP composite beams in bending, *Compos. Part B Eng.* 35 (2004) 27–33. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2003.08.010>.
- [8] A. Manalo, O. Alajarmeh, W. Ferdous, B. Benmokrane, C.D. Sorbello, A. Gerdes, Effect of simulated hygrothermal environment on the flexural and interlaminar shear strength of particulate-filled epoxy-coated GFRP composites, *Constr. Build. Mater.* 339 (2022) 127687. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127687>.
- [9] W. Tahri, Z. Abdollahnejad, J. Mendes, F. Pacheco-Torgal, J.B. de Aguiar, Cost efficiency and resistance to chemical attack of a fly ash geopolymetric mortar versus epoxy resin and acrylic paint coatings, <https://doi.org/10.1080/19648189.2015.1134674>. 21 (2016) 555–571. <https://doi.org/10.1080/19648189.2015.1134674>.
- [10] X.H. Wang, B. Chen, P. Tang, Experimental and analytical study on bond strength of normal uncoated and epoxy-coated reinforcing bars, *Constr. Build. Mater.* 189 (2018) 612–628. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.09.010>.
- [11] M.F. Kai, W.M. Ji, J.G. Dai, Atomistic insights into the debonding of Epoxy–Concrete interface with water presence, *Eng. Fract. Mech.* 271 (2022) 108668. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFRACTMECH.2022.108668>.
- [12] UNE-EN 12390-2, Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia., AENOR Asoc. Española Norm. y Certificación. (2001).
- [13] A. Neville, *Properties of concrete*, (1995). <https://www.academia.edu/download/52236036/properties-of-concrete-by-am-neville.pdf> (accessed January 28, 2022).
- [14] UNE-EN-12390-3, Norma Española Parte 3 : Determinación de la resistencia a compresión de probetas, (2020) 24.
- [15] C. Tuakta, O. Büyüköztürk, Deterioration of FRP/concrete bond system under variable moisture conditions quantified by fracture mechanics, *Compos. Part B Eng.* 42 (2011) 145–154. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2010.11.002>.
- [16] N.E. En, N. Une, española, (2014).