

C. Rodríguez^a, J.M. Ortega^b, M. Hernández^a,
M. Iniesta-Castillo^a, I. Sánchez^b

^a Departamento de Materiales de Construcción, Centro Tecnológico de la Construcción, Alcantarilla, Murcia, España
^b Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Alicante, España

Cementos ternarios como alternativa sostenible para la Ingeniería Civil

RESUMEN

Historia del artículo:

Recibido 3 de Junio 2019

En la versión revisada 15 de Junio 2019

Aceptado 5 de Julio 2019

Accesible online 15 de Julio de 2020

Palabras clave:

Cementos ternarios

Sostenibilidad

Adiciones

Durabilidad

Propiedades mecánicas

La industria de la construcción es una de las más contaminantes, principalmente debido a las emisiones de carbono que se producen durante la fabricación del cemento Portland. En este sentido la industria se ha ocupado de incorporar subproductos de otros procesos industriales que contribuyen a producir un material más sostenible, ya que disminuyen el consumo de materias primas, eliminan residuos de forma segura y mejoran las propiedades del cemento producido, incluyendo la durabilidad de las estructuras. El principal problema que presentan es que las propiedades del cemento son peores a corto plazo.

En este sentido en los últimos años se está trabajando en la incorporación de dos o más adiciones que producen efectos sinérgicos en la mejora de las propiedades del mortero o del hormigón producido. Este tipo de cementos es lo que se ha venido llamando cementos ternarios.

En este trabajo se han producido cementos ternarios con combinaciones de tres diferentes adiciones: escoria de alto horno, y ceniza volante como adiciones activas y un filler calizo como adición inactiva. La suma del total de adiciones se limita al 35% del contenido de cemento, tal y como establece la EHE-08 para la adición de ceniza volante al cemento portland ordinario.

Se han estudiado a edades cortas la resistencia a compresión y parámetros de durabilidad en morteros de cementos ternarios, comparados con cementos con una sola adición. Los resultados muestran un buen comportamiento de este tipo de cementos, lo cual podría permitir su uso en obra real.

Ternary cements as a sustainable alternative in Civil Engineering

ABSTRACT

Keywords:

Ternary cements

Sustainability

Additions

Durability

Mechanical properties

Construction industry is among the most polluting human activities, mainly due to CO₂ emissions produced during portland cement manufacture. The cement production industry has incorporated byproducts of other industries, to produce a more sustainable material. This would be due to the decrease of raw materials, treat byproducts in a safe way, and improve the properties of the cement manufactured. The durability of the structures would also be improved. The main problem is that the properties are not good in the short term.

In the last years there have been many efforts regarding the incorporation of two or more additions, because they produce a synergic effect that improve the properties of concrete or mortars. This type of cements has been called ternary cements

In this work ternary cements have been produced using three different additions: ground granulated blast furnace slag, and fly ashes, as active additions, and limestone filler as a non-active addition. The total amount of addition is limited to a 35% maximum, for all of them together, as it is stated in the instruction for structural concrete, EHE-08. 35% is the maximum addition allowed for concrete production, and always added to ordinary portland cement.

Mechanical properties and some durability parameters have been studied in the short terms for both a ternary cement and the results have been compared with a binary cement. The results are promising, and show a good behavior, what means that these cements could be safely used in real structures.

1 Introducción

La industria de la construcción es una de las industrias más contaminantes que utilizan materiales compuestos. Son bien conocidas las emisiones de gases efecto invernadero que se producen en la fabricación del cemento [1], principal componente del hormigón. En este sentido se han hecho importantes avances. Son ya un clásico los cementos con adiciones, que se encuentran ya incluidos en la normativa actual y se permite su uso incluso en hormigones estructurales [2], y esta instrucción fomenta el uso de cementos sostenibles mediante el índice de contribución a la sostenibilidad de las estructuras. En los últimos años se ha hecho un gran esfuerzo por el desarrollo de los materiales activados alcalinamente, que se fabrican a partir de residuos, sin necesidad del proceso de fabricación de cemento [3], y en la fabricación de hormigones también se está incluyendo en la actualidad árido reciclado procedente de residuos de demolición [4]. Todos estos esfuerzos pretenden hacer de la construcción una industria más sostenible. Un paso intermedio entre los cementos con adiciones clásicas, y los materiales activados alcalinamente son los cementos ternarios. En estos cementos se mezcla clínker con dos adiciones que muestran un comportamiento sinérgico en general mejorando las propiedades que tendría el cemento con cada una de las adiciones [5–7]. Las mezclas de adiciones no han de ser necesariamente activas, si no que se pueden realizar mezclas de adiciones activas e inactivas, habitualmente filler calizo, que producen buenos resultados, tanto desde el punto de vista de las propiedades mecánicas [8,9] como desde el punto de vista de la durabilidad [10,11]. Este aspecto de la durabilidad es muy relevante también desde el punto de vista de la sostenibilidad, ya que un material más durable será un material sostenible, ya que los posibles impactos ambientales que se hayan producido en su fabricación se amortizarán a lo largo de los años en los que se pueda utilizar la estructura sin necesidad de reparar, y por tanto sin nuevos impactos ambientales. La mayoría de los estudios que se realizan sobre estos materiales, que se están empezando a utilizar en todo el mundo, versan sobre las resistencias mecánicas, y son minoritarios los que tratan temas de durabilidad de estos materiales, pero los ensayos se realizan mayoritariamente en ambiente óptimo de laboratorio. En la mayoría de los trabajos publicados los materiales se almacenan a una temperatura intermedia, y con una humedad relativa alta, en cámaras de humedad, donde la humedad relativa está entre el 95 y el 100%. Trabajos previos de nuestro grupo han estudiado la influencia de ambientes no óptimos de laboratorio en cementos con adiciones, y también de ambientes de exposición reales en cementos de bajo contenido en clínker. Estos trabajos han demostrado que todos los cementos tienen una influencia importante del ambiente, incluyendo los cementos portland ordinarios [12]. Los cementos con escoria siderúrgica de alto horno suelen ser más sensibles a los cambios de temperatura, y los cementos con cenizas volantes a los cambios en la humedad relativa. No obstante en el medio o largo plazo estos cementos pueden alcanzar propiedades similares a los cementos portland ordinarios, mucho menos sostenibles. Sería interesante, dada la carencia de resultados, estudiar como se comportan los cementos terciarios en ambientes no óptimos, inicialmente de laboratorio, a fin de conocer si estas mezclas ternarias son eficientes cuando se plantea su uso en estructuras reales que no endurecen en ambientes de temperatura y

humedad relativa óptimos, si no en ambientes más similares a los reales. Se tratará de comprobar si el efecto sinérgico que se da al utilizar dos adiciones se mantiene incluso en ambientes similares a los reales, o si el uso de estos materiales solo se debería recomendar para prefabricados, lo cual limitaría las opciones de estas mezclas.

2 Experimental

La experimentación se ha desarrollado en dos etapas. En la etapa inicial se ensayaron diferentes mezclas binarias o ternarias producidas en laboratorio. El criterio de selección utilizado fue la ganancia de resistencia a compresión a las 24 horas con respecto al cemento portland ordinario utilizado como referencia.

2.1 Materiales

Se han preparado morteros siguiendo la norma UNE EN 196-1 [13]. En la primera etapa de la experimentación se utilizó como referencia del comportamiento un cemento portland ordinario, CEM I 42,5 R SR, al que se adicionaron una ceniza volante silicea (V), una escoria de alto horno (S), y un filler calizo (L) en diferentes porcentajes. Todos los materiales fueron provistos por Cementos Molins. Las mezclas utilizadas para preparar morteros se encuentran recogidas en la Tabla 1, en porcentaje. Estos cementos se amasaron con una relación a:c 0.5 y una relación árido:cemento 3:1 como indica la norma UNE EN 196-1.

Tabla 1: porcentaje de materiales usados para preparar los diferentes morteros de la primera fase

#	CEM	S	V	L
1	100%			
2	65%	35%		
3	70%	30%		
4	65%	28%		7%
5	70%	20%		10%
6	65%	25%	10%	
7	65%	30%	5%	
8	65%		35%	
9	70%		30%	
10	65%		28%	7%
11	70%		20%	10%

2.1.1 Materiales para la segunda fase

Para la segunda fase se seleccionó una mezcla binaria y una ternaria que pasaron a la segunda fase donde se hizo un estudio más completo de los materiales. El criterio de selección fue aquellos materiales que mayor ganancia de resistencia produjeron a las 24 horas de amasados.

2.2 Procedimientos experimentales

Los morteros preparados se ensayaron a flexión y a compresión a las edades de 1, 2, 7 y 28 días, ampliando las edades



obligatorias según la norma UNE EN 196-1. Los materiales de la fase dos se conservaron en dos ambientes diferentes. Una serie de probetas se conservó en una cámara de humedad con un 95% de humedad relativa y 20 grados. Para el segundo conjunto de materiales se simuló una condición más próxima al uso en condiciones reales, y por tanto se replicaron las condiciones climatológicas promedio de la zona en la que se realizó el estudio, es decir 20°C y una humedad relativa del 65%. Estas condiciones permitirán estudiar si los materiales se pueden utilizar con garantías en situaciones más reales. Estos estudios se han realizado con profundidad en materiales comerciales que incluyen una única adición y se ha visto la influencia notable del entorno en el que se fraguan y endurecen los materiales como ya se comentó en la introducción.

Por último, se determinó la succión capilar de los morteros preparados. Esta propiedad está relacionada esencialmente con la durabilidad de los morteros, ya que el espacio accesible por agua será el espacio accesible por agresivos. Se realizaron las medidas utilizando una ligera modificación sobre la norma UNE-EN 1015-18 [14]. Se han determinado el volumen de poros accesible por agua, y el coeficiente de succión capilar. Las probetas se secaron hasta masa estable, se protegieron por el lateral para asegurar un ingreso unidireccional de agua y se puso la superficie en contacto con una lámina de agua. Se registró el peso en función del tiempo transcurrido, y se mide la absorción por unidad de superficie. Los ensayos se realizaron en probetas normalizadas de 4x4x16 cm³, y la superficie expuesta a la lámina de agua fue de 4x4 cm².

Todos los ensayos se realizaron por triplicado.

3 Resultados y discusión

3.1 Primera fase

Los resultados de la resistencia a flexión y compresión a 24 horas de las muestras preparadas se muestran en las figuras 1 (flexión) y 2 (compresión). Como se puede comprobar en ambas figuras la resistencia a flexión de los morteros decrece drásticamente, comparado con la referencia, ya que el resto de muestras solamente tienen entre un 65 y un 70% de clínquer, con lo cual la cantidad de productos de hidratación disponibles a las 24 horas es baja y la cohesión de la muestra será mala. Los valores de resistencia a compresión también decrecen con respecto al valor del control, pero no tanto como en el caso de la resistencia a flexión. Se observa que las muestras que menores disminuciones de resistencia presentan son las muestras 5 y 11, que alcanzan respectivamente un 50,86 y 54,60 del valor de resistencia a compresión del material de referencia. La muestra 5, como se puede ver en la tabla 1 tiene como adiciones un 20% de escoria de alto horno y un 10% de filler calizo. El mejor resultado lo da la muestra 11 que contiene un 20% de ceniza volante silicea y un 10% de filler calizo. A pesar de que el filler es una adición inactiva ya se han encontrado resultados muy buenos con respecto a su uso en mezclas ternarias, ya que el filler calizo puede actuar como agente de nucleación.

Tal y como se indicó en la sección experimental a la segunda fase se pasaron una mezcla binaria y una mezcla ternaria. Con el fin de establecer adecuadamente la influencia de tener dos adiciones juntas se decidió pasar a la fase dos la mezcla 11,

que era la que mejor resultado había dado en la fase 1, compuesta por un 70% de cemento tipo I, un 20% de ceniza volante y un 10% de filler calizo, y se optó también por la mezcla 9, que incluye el mismo contenido de cemento portland y un 30% de ceniza volante. De ese modo se pueden comprobar los efectos beneficiosos, o no de incluir la adición inactiva y si el efecto de centro de nucleación se prolonga en el tiempo o no.

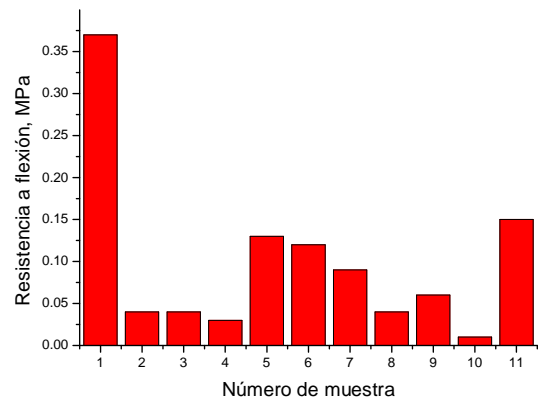


Figura 1. Resistencia a flexión obtenida a 24 horas para todas las mezclas ensayadas en la primera fase

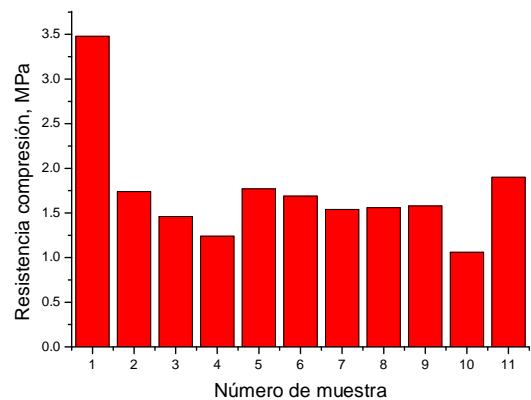


Figura 2. Resistencia a compresión obtenida a 24 horas para todas las mezclas ensayadas en la primera fase

3.2 Segunda fase

En la segunda fase de ensayos se realizaron sobre probetas de mortero o pasta de cemento de las muestras seleccionadas en la fase 1. Se realizó un seguimiento con la edad de la resistencia a compresión y a flexión para cada una de las mezclas estudiadas y se realizaron medidas para determinar la red de poros y algunas medidas dedicadas a estudiar la durabilidad de estos materiales, ya que como se estableció en la introducción un material sostenible ha de ser forzosamente durable, ya que así se amortizan con el tiempo los posibles impactos producidos en su fabricación.

3.2.1 Propiedades mecánicas

Se determinaron las resistencias a flexión y compresión de los materiales a las edades indicadas en la sección experimental. Los resultados se muestran en las figuras 3 y 4. Como se puede apreciar en ambas figuras hay una influencia clara sobre todo



del ambiente en los resultados tanto de flexión como de compresión.

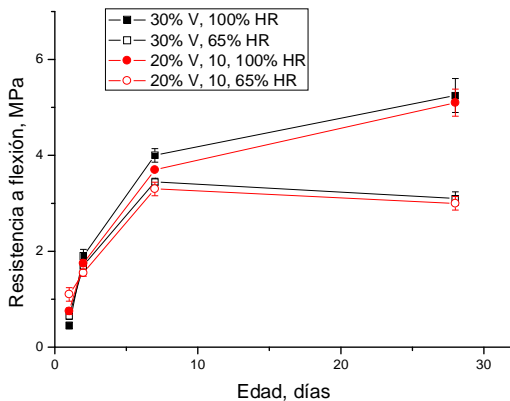


Figura 3. Evolución de la resistencia a flexión con el tiempo para los materiales ensayados en la segunda fase

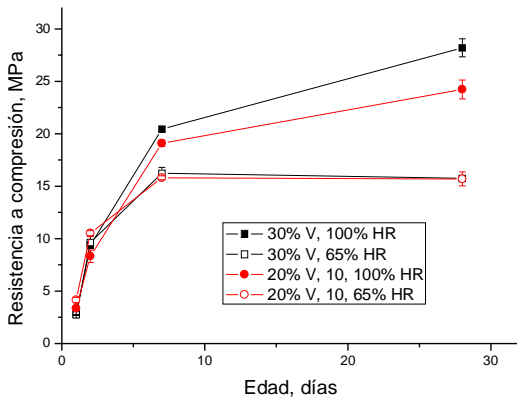


Figura 4. Evolución de la resistencia a compresión con el tiempo para los materiales ensayados en la segunda fase

Los resultados de resistencia a flexión muestran una pequeña diferencia entre las mezclas binarias y ternarias, y siempre es superior el valor de resistencia de la mezcla binaria. Se aprecia también claramente una influencia del ambiente en el que mantienen los materiales. Un ambiente de alta humedad, relativa implica una mayor resistencia a flexotracción de los materiales preparados, mientras que un ambiente menos húmedo hace que esta resistencia disminuya, posiblemente debido a la menor presencia de agua tanto para la hidratación del clínquer como para la reacción puzolánica de la ceniza volante. Se puede constatar también que con respecto a la resistencia a flexión el ambiente de curado tiene la misma influencia para la mezcla binaria o ternaria, 2,15 y 2,1 MPa respectivamente. Es decir el hecho de utilizar un elemento no reactivo en la mezcla ternaria no implica una mayor pérdida de resistencia a flexión.

En el caso de la resistencia a compresión de los materiales, parámetro que se usa para su caracterización con mayor frecuencia, se da un patrón similar. Los valores de resistencia a compresión son más altos para los materiales que se mantienen en un ambiente tradicional de laboratorio que para los

materiales que se mantuvieron en un ambiente que simula las condiciones promedio del ambiente. En este caso se observó que en condiciones óptimas de laboratorio la mezcla binaria dio una resistencia superior a la ternaria, con una diferencia de 3.1 MPa. Otros trabajos recientes en este campo comprobaron que la adición de caliza no era perjudicial tanto de forma experimental [15,16] como numérica [6]. Esta diferencia con la mayoría de la literatura existente se puede deber al diferente origen de los materiales que componen la mezcla, especialmente.

Sin embargo si los materiales endurecen en un ambiente que simula el real promedio en la zona donde se realizó el trabajo, se puede ver que los valores de resistencia a compresión a 28 días son iguales para las muestras preparadas con la mezcla binaria y la ternaria. Es decir, el ambiente de menor humedad relativa tienen un efecto menos perjudicial para los materiales que se han preparado con la mezcla ternaria, ya que la mezcla ternaria pierde 3.1 MPa menos que la binaria. Este resultado es de gran importancia, ya que según estos resultados sería factible utilizar mezclas ternarias (más sostenibles [6]) en estructuras que se hormigonan in situ. Para el caso de prefabricados sería más recomendable utilizar mezclas binarias, aunque a corto plazo la que mejores resultados mostró fue la ternaria (fase 1).

3.2.2 Durabilidad: absorción capilar de agua

Para estudiar la durabilidad de los materiales que se han pasado a la segunda fase de ensayo se determinó la succión capilar de los morteros preparados. Se realizaron ensayos a los 7 y 28 días para cada tipo de material y ambiente en el que se mantuvieron. Los resultados se muestran en las figuras 5 y 6.

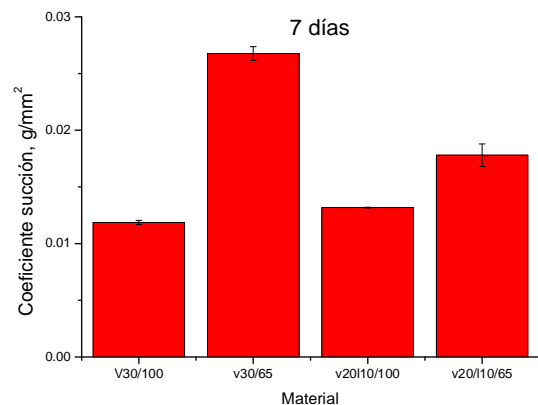


Figura 5. Coeficiente de succión capilar en función de la mezcla la humedad relativa para los 7 días.

Como se puede observar, a los 7 días los coeficientes de succión capilar son menores para los materiales que se mantienen en ambientes de mayor humedad relativa. Estos resultados coinciden con los que se observaron para los valores de resistencia a compresión y flexión. Se observó un valor ligeramente mayor de resistencia para los materiales que se mantuvieron al 100% de humedad relativa, comparado con los materiales que se endurecieron al 65% de humedad relativa. Para los materiales mantenidos al 100% de humedad relativa la mezcla binaria mostraba un valor de resistencia ligeramente superior a la mezcla ternaria, y por tanto la mezcla binaria



exhibe un coeficiente de succión capilar ligeramente inferior. Los materiales que se habían mantenido a un 65% de humedad relativa exhibían valores de resistencia mecánica similares, y sin embargo desde el punto de vista de la durabilidad la muestra ternaria presenta un valor de coeficiente de succión capilar inferior. Este efecto se puede deber al efecto filler que las adiciones inactivas hacen siempre en el cemento, bloqueando el acceso a poros, y por tanto mejorando la durabilidad de los materiales preparados con ellas [17]. Esta mejora no se había observado cuando se estudia la durabilidad relacionada con el ingreso de cloruros [11], cuestión totalmente esperable, ya que el filler calizo no hará nunca un efecto de retención química de cloruros, como si hacen las adiciones activas. El aspecto tratado en este artículo es novedoso y muy interesante con vistas a potenciar el uso de cementos ternarios, ya que contribuirán a la sostenibilidad no solo bajando la huella de CO₂ de la mezcla, si no que, a priori, extenderán la vida útil de la estructura, haciéndola también más sostenible.

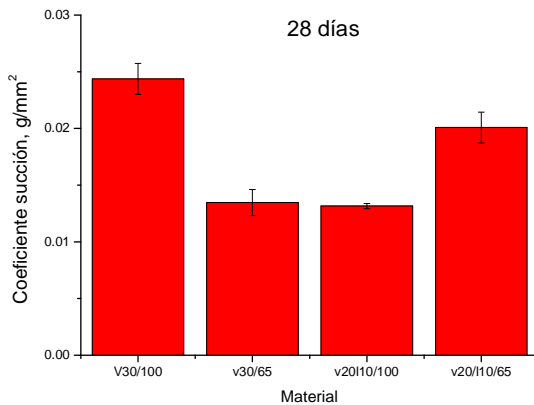


Figura 6. Coeficiente de succión capilar en función de la mezcla la humedad relativa para los 28 días

Con respecto a los resultados a 28 días, se puede decir lo mismo con respecto a las mezclas ternarias, señalando que la durabilidad, teniendo en cuenta la succión capilar, en el ambiente de mayor humedad relativa mejora, mientras que para las muestras que se mantuvieron a un 65% de humedad relativa mantienen el resultado obtenido a los 7 días. Llama poderosamente la atención la aparente pérdida de durabilidad de la mezcla binaria que se curó a un 100% de humedad relativa, ya que los resultados de resistencia mecánica discrepan con los resultados obtenidos en este ensayo. El mal resultado no se podría asignar a un fallo experimental ya que como se puede ver en la figura la desviación estándar de los datos obtenidos no es demasiado grande, y muy similar al del resto de muestras ensayadas. En los materiales preparados con la mezcla binaria y ensayados a 28 días si que se aprecia una mejora de la durabilidad, tal y como se podría esperar de los resultados de los ensayos mecánicos.

Existen algunos datos de difícil justificación con la experimentación realizada, que necesitarán estudio más en profundidad de la evolución de la red de poros, por ejemplo mediante porosimetría de intrusión de mercurio, que se podría acompañar de resultados de calorimetría de barrido diferencial para ver el avance de las reacciones para las dos mezclas en los dos ambientes seleccionados. También parece imprescindible, antes de recomendar el uso de estas mezclas

ternarias, extender la campaña experimental que ya está en marcha.

No obstante los resultados son prometedores y se puede pensar que los cementos ternarios serán una alternativa eficiente para mejorar la sostenibilidad de la industria de la construcción.

4 Conclusiones

A partir de la experimentación desarrollada, los resultados obtenidos, y el análisis de los mismos comparándolos con la literatura existente se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Se ha determinado que con los materiales disponibles para la experimentación la mezcla que mejores resultados da a 24 horas es una mezcla ternaria formada por cemento portland, ceniza volante silicea, y filler calizo. Estos resultados están de acuerdo con la bibliografía que describe un efecto de nucleación de los productos de hidratación sobre las partículas de la adición inactiva.

- La resistencia mecánica estudiada hasta los 28 días de las mezclas binarias es ligeramente superior a las mezclas ternarias si el endurecimiento tiene lugar en condiciones óptimas de laboratorio. Si los materiales se mantienen en condiciones de humedad relativa que simula la real la diferencia de comportamiento entre mezcla binaria y ternaria es menor, o incluso se igualan los valores de la resistencia a compresión a los 28 días para ambos tipos de mezcla.

- La succión de agua por capilaridad es menor en general para las muestras que se mantienen en condiciones de alta humedad relativa. Sin embargo a 7 días para las muestras mantenidas en el ambiente que simula el real la mezcla ternaria se comporta de forma ligeramente mejor a la binaria, quizá debido al efecto oclisor de poros que presentan las adiciones inactivas.

- Aunque se necesita más experimentación se puede concluir que los cementos ternarios presentan una alternativa sostenible para la ingeniería civil, y que se podrán usar tanto para prefabricados como para estructuras que se hormigonan in situ, dado su excelente comportamiento en ambientes que simulan los reales.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al Instituto de Fomento de la Región de Murcia por la financiación del proyecto "MEZCLAS TERNARIAS PARA LA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE MATERIALES BASE CEMENTO DE BAJO IMPACTO AMBIENTAL" dentro del programa de ayudas dirigidas a centros tecnológicos de la Región de Murcia destinadas a la realización de actividades de I+D de carácter no económico 2018, cofinanciado en un 80% por FEDER.

Referencias

- [1] M.A. Chinchón, J.S.; Sanjuan, El cemento portland. Fabricación y expedición, Publicaciones Universidad de Alicante, Alicante, 2004.
- [2] P. comission for Concrete, Instrucción de hormigón estructural EHE-08(Structural Concrete Instruction, EHE-08), (2008).



- [3] J.L. Provis, A. Palomo, C. Shi, Advances in understanding alkali-activated materials, *Cem. Concr. Res.* **78** (2015) 110–125. [doi:10.1016/j.cemconres.2015.04.013](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.013).
- [4] C. Rodríguez, I. Sánchez, I. Miñano, F. Benito, M. Cabeza, C. Parra, On the Possibility of Using Recycled Mixed Aggregates and GICC Thermal Plant Wastes in Non-Structural Concrete Elements, *Sustainability*. **11** (2019) 633. [doi:10.3390/su11030633](https://doi.org/10.3390/su11030633).
- [5] G. Bolte, M. Zajac, J. Skocek, M. Ben Haha, Development of composite cements characterized by low environmental footprint, *J. Clean. Prod.* **226** (2019) 503–514. [doi:10.1016/j.jclepro.2019.04.050](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.050).
- [6] R. Gettu, R.G. Pillai, M. Santhanam, A.S. Basavaraj, S. Rathnarajan, B.S. Dhanya, Sustainability-based decision support framework for choosing concrete mixture proportions, *Mater. Struct. Constr.* **51** (2018) 1–16. [doi:10.1617/s11527-018-1291-z](https://doi.org/10.1617/s11527-018-1291-z).
- [7] A. Pal, Developing Low-Clinker Ternary Blends for Indian Cement Industry, *J. Inst. Eng. Ser. A.* **99** (2018) 433–447. [doi:10.1007/s40030-018-0309-4](https://doi.org/10.1007/s40030-018-0309-4).
- [8] T. Boubekeur, B. Boulekbache, K. Aoudjane, K. Ezziane, E.H. Kadri, Prediction of the durability performance of ternary cement containing limestone powder and ground granulated blast furnace slag, *Constr. Build. Mater.* **209** (2019) 215–221. [doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.120](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.120).
- [9] J. Li, W. Zhang, C. Li, P.J.M. Monteiro, Green concrete containing diatomaceous earth and limestone: Workability, mechanical properties, and life-cycle assessment, *J. Clean. Prod.* **223** (2019) 662–679. [doi:10.1016/J.JCLEPRO.2019.03.077](https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.03.077).
- [10] M.C. Alonso, F.J. Luna, M. Criado, Corrosion behavior of duplex stainless steel reinforcement in ternary binder concrete exposed to natural chloride penetration, *Constr. Build. Mater.* **199** (2019) 385–395. [doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.12.036](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.036).
- [11] F.J. Luna, Á. Fernández, M.C. Alonso, The influence of curing and aging on chloride transport through ternary blended cement concrete, *Mater. Construcción*. **68** (2018) 171. [doi:10.3989/mc.2018.11917](https://doi.org/10.3989/mc.2018.11917).
- [12] J.M. Ortega, I. Sánchez, M.A. Climent, Influencia de diferentes condiciones de curado en la estructura porosa y en las propiedades a edades tempranas de morteros que contienen ceniza volante y escoria de alto horno, *Mater. Construcción*. **63** (2012) 219–234. [doi:10.3989/mc.2012.06111](https://doi.org/10.3989/mc.2012.06111).
- [13] AENOR, UNE-EN 196-1:2018. Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas, (2018).
- [14] AENOR, UNE-EN 1015-18:2003. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido, (2003).
- [15] X.Y. Wang, Analysis of hydration and strength optimization of cement-fly ash-limestone ternary blended concrete, *Constr. Build. Mater.* **166** (2018) 130–140. [doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.01.058](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.058).
- [16] M. Bambuchova, D. Pytlík, Research of siliceous fly ash after denitrification utilisation in ternary binders, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **385** (2018). [doi:10.1088/1757-899X/385/1/012003](https://doi.org/10.1088/1757-899X/385/1/012003).
- [17] J.M. Ortega, V. Letelier, C. Solas, G. Moriconi, M.Á. Climent, I. Sánchez, Long-term effects of waste brick powder addition in the microstructure and service properties of mortars, *Constr. Build. Mater.* **182** (2018) 691–702. [doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.06.161](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.161).

