

Durabilidad del hormigón reciclado autocompactante para la fabricación de vía en placa

Durability of self-compacting recycled concrete for slab track manufacturing

Jose A. Sainz-Aja Guerra^{*, a}, Isidro A. Carrascal Vaquero^b, Juan A. Polanco

Madrazo^c, Carlos Thomas García^d, Israel Sosa^e

LADICIM (Laboratorio de Ciencia e Ingeniería de los Materiales), Universidad de Cantabria.

E.T.S. de Ing. de Caminos, Canales y Puertos, Av/Los Castros 44, 39005 Santander, España.

RESUMEN

En la actualidad la vía en placa se plantea como una alternativa a la vía balastada. En este trabajo se propone que, una vez que la vía balastada haya terminado su vida útil, se recoja el balasto y las traviesas fuera de uso, se trituren y se utilicen como árido para la fabricación de vía en placa. Para validar esta idea, se fabricaron 3 tipos de hormigón reciclado. Sobre estos hormigones se realizaron ensayos tanto en estado fresco como endurecido. Los ensayos en estado endurecido se dividieron a su vez en ensayos mecánicos y de durabilidad. Concluyendo que los hormigones diseñados cumplen con todos los requisitos de trabajabilidad, propiedades mecánicas y durabilidad exigibles a los hormigones usados en la fabricación de vía en placa.

ABSTRACT

Ballastless track is considered as an alternative to ballasted track. In this work it is proposed that, once the ballasted track has finished its useful life, the ballast and sleepers out of use should be collected, crushed and used as aggregate for the manufacture of slab track. To validate this idea, 3 types of recycled concrete were manufactured. On these concretes, both fresh and hardened tests were carried out. Hardened tests were divided into mechanical and durability tests. Concluding that the concretes designed meet all the workability, mechanical and durability requirements for concretes used in the manufacture of slab tracks.

PALABRAS CLAVE: Hormigón reciclado, durabilidad, vía en placa, autocompactante, hielo-deshielo.

KEYWORDS: Recycled concrete, durability, slab track, self-compacting, freeze-thaw.

1. Introducción

En la actualidad, la tipología de superestructura ferroviaria formada por traviesas y balasto conocida como vía abalastada está siendo sustituida, especialmente en tramos de alta velocidad, por otra tipología de vía conocida como vía en placa. Esta nueva tipología de vía

consiste en sustituir las traviesas y el balasto por una losa de hormigón que será la encargada de transmitir las cargas al terreno. La principal ventaja que deriva de esta tipología de vía frente a la vía abalastada es que supone un ahorro significativo en mantenimiento. Según estudios

previos [1] este ahorro que supone implantar vía en placa en vez de vía abalastada puede amortizar el sobre coste derivado de la construcción en un periodo de entre 2 y 6 años debido al ahorro en el mantenimiento. En este estudio se plantea la posibilidad de, en aquellos tramos donde se decida realizar esta transición de vía abalastada a vía en placa, valorizar los residuos generados durante el desguarnecido de la vía, concretamente el balasto y las traviesas. Esta valorización consistirá en triturar las traviesas y el balasto, generando áridos reciclados y utilizándolos para la fabricación de la vía en placa. Esta valorización significaría utilizar los elementos de la vía obsoleta para fabricar la nueva vía, lo que cerraría el ciclo de vida de los materiales. De igual manera, esta valorización permitiría reducir al mínimo los gastos logísticos en la fabricación de la vía dado que ya se dispondría de ellos en el sitio donde se pretende utilizarlos.

El uso de áridos reciclados es una necesidad hoy en día [2], además, existe un amplio número de estudios que abalan la bondad de este tipo de árido, habiendo sido posible obtener hormigones reciclados con buenas propiedades tanto a nivel mecánico como de durabilidad [3–6]. Si bien es verdad que se han obtenido buenos resultados tanto en propiedades mecánicas como en durabilidad, es bien sabido que las propiedades del hormigón reciclado dependerán en gran medida de las propiedades de los áridos reciclados utilizados [7,8]. En este trabajo se plantea utilizar dos tipos de áridos reciclados, uno proveniente de balasto triturado y otro proveniente de traviesas de hormigón, lo que a priori son áridos que la EHE-08 permitiría un reemplazo de hasta un 20% del árido grueso natural.

En el proceso de trituración de los áridos reciclados se generan no solo áridos gruesos, sino que también se generan áridos finos, los cuales la EHE-08 no recomienda. En este estudio se plantea la posibilidad de valorizar la mayor cantidad de residuos posible, por lo que

se planea la utilización de árido reciclado tanto grueso como fino. En un primer momento, se comprobó que el uso de áridos finos reciclados podía comprometer las propiedades tanto en estado fresco como endurecido del hormigón reciclado, ya que esta fracción tiene una mayor absorción y, además, puede contener un mayor porcentaje de contaminantes [9,10]. Estudios más recientes han demostrado que la combinación de áridos finos reciclados con aditivos superplastificantes puede corregir estos problemas derivados del uso de los áridos finos reciclados [3,11,12]. Por esta razón y para reducir los plazos de ejecución se ha optado por el diseño de hormigones autocompactantes para este trabajo.

En este trabajo se analiza la durabilidad de 3 hormigones reciclados autocompactantes fabricados con áridos procedentes de elementos de la superestructura ferroviaria fuera de uso.

2. Materiales

2.1 Áridos reciclados

Los áridos reciclados utilizados para la fabricación de los hormigones caracterizados se obtuvieron de la trituración de balasto (RA-B) y traviesas fuera de uso (RA-S). Tras la trituración de estos materiales se obtuvieron 3 fracciones granulométricas de cada uno de estos residuos, véase Tabla 1 y Figura 2. En la Figura 1 se puede ver la granulometría de las 6 fracciones granulométricas. De manera adicional, en la Tabla 1 se pueden ver los resultados de densidad relativa de las gravillas, las densidades reales de las arenas. También se determinó el índice de lajas de las dos gravillas, obteniendo un valor de un 14 [%] en el caso del RA-B-CA y de un 5 [%] para el caso RA-S-CA.

Tabla 1. Propiedades de los áridos.

Codigo	Descripción	Tamaño (mm)	Densidad (g/cm ³)
RA-B-CA	Árido grueso balasto	5-12	2.5
RA-S-CA	Árido grueso traviesa	5-12	2.3
RA-B-LS	Arena gruesa balasto	2-5	2.7
RA-S-LS	Arena gruesa traviesa	2-5	2.4
RA-B-FS	Arena fina balasto	0-2	2.8
RA-S-FS	Arena fina traviesa	0-2	2.5

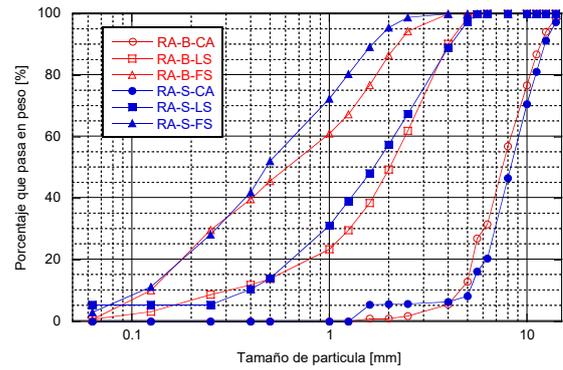


Figura 1. Curvas granulométricas de los áridos.



2.2 Cemento

Se utilizó un cemento tipo CEM IV (V) 32.5 N según la norma EN 197-1 [13], proporcionado por cementos Alfa [14], con una densidad de 2.85 g/cm³ determinada según la norma UNE 80103 [15] y una superficie específica Blaine de 3885 cm²/g obtenida según la norma EN 196-6 [16].

2.3 Dosificación

Con los áridos reciclados provenientes de elementos de vía fuera de uso se dosificaron 3 hormigones reciclados autocompactantes, el primero, exclusivamente con RA-B, denominado RC-B, el segundo exclusivamente con RA-S, denominado RC-S y, por último, un tercer hormigón con ambos tipos de áridos en la proporción en la que se encuentran estos residuos en vía abalastada, denominado RC-M. En la Tabla 2 se pueden ver las 3 dosificaciones.

Tabla 2. Dosificación.

Material	RC-B	RC-S	RC-M
Agua	225	200	221
Cemento	500	500	500
Aditivo SP	10	10	10
RA-FBS	790	-	677
RA-BS	320	-	274
RA-BCA	522	-	447
RA-FSS	-	690	98
RA-SS	-	283	40
RA-SCA	-	587	83

Cabe destacar que, las dosificaciones se realizaron definiendo como criterios de dosificación que los 3 hormigones autocompactantes tuviesen un comportamiento en estado fresco similar, por lo que, al tener los RA-B-CA una geometría notoriamente más lajosa que los RA-S-CA, fue preciso aumentar la cantidad de agua para lograr la misma trabajabilidad.

3. Métodos

3.1 Propiedades mecánicas

Se determinó la resistencia a compresión según las normas EN 12390-3 y EN 13290-3/AC [17,18] utilizando probetas cúbicas de 100 mm de lado a las edades de 1, 2, 3, 5, 7, 28, 90 y 180 días. El módulo elástico estabilizado se determinó según la norma EN 12390-13 [19] utilizando probetas cilíndricas de 200 mm de altura y 100 de diámetro a las edades de 7, 28, 90 y 180 días.

3.2 Permeabilidad al oxígeno

El procedimiento seguido para el acondicionamiento de las probetas del ensayo de permeabilidad al oxígeno es el descrito en la norma UNE 83966 [20], mientras que en el ensayo se realizó según la norma UNE 83981 [21,22], véase Figura 3. Este ensayo se realizó midiendo el caudal de oxígeno que atravesaba la

probeta para tres presiones distintas, 0.5, 1 y 1.5 bar.

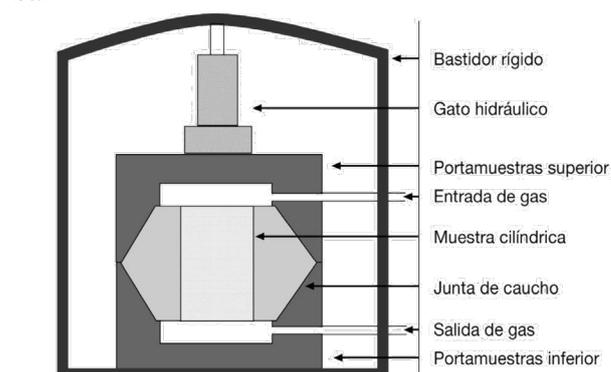


Figura 3. Ensayo de permeabilidad al oxígeno [23].

3.3 Ciclos de hielo-deshielo

Los ensayos de hielo-deshielo se han realizado según el procedimiento descrito en la norma UNE-CEM/TS 12390-9EX [24]. Particularmente, se optó por la alternativa que consiste en someter las probetas cúbicas a ciclos de hielo-deshielo sumergidas en una disolución al 3% de cloruro sódico (NaCl). La resistencia a los ciclos hielo-deshielo se evalúa registrando la pérdida de masa sufrida por los cubos.

El procedimiento operacional de este ensayo consiste, primeramente, en determinar la masa de cada una de las probetas antes de comenzar el ensayo para, posteriormente, comparar la pérdida de masa sufrida por las mismas. Una vez determinada la masa de las probetas, la norma define que el ensayo se ha de realizar sobre dos pares de probetas por material, que se introducirán junto con la disolución de cloruro sódico en un recipiente metálico que se cerrará de manera hermética, véase Figura 4. Según la norma UNE-CEM/TS 12390-9EX [24], las probetas han de permanecer durante 16 horas en una cámara a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, pero tras registrar mediante una sonda la temperatura de congelación de las probetas, se vio que con las 16 horas el congelador no era capaz de alcanzar esos $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo que se amplió dicho tiempo de congelación hasta 40 h. Tras esas 40 h a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, se trasladaban los moldes a un baño de agua a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, véase Figura 5.

Para analizar la evolución de las probetas a lo largo de estos ciclos de hielo-deshielo, de manera semanal, se abrían los recipientes herméticos y se separaba la probeta de la parte desprendida de la misma. La parte desprendida, se introducía en estufa a 110 °C hasta alcanzar peso constante, momento en el que se pesaba y registraba la pérdida de masa sufrida en los siete ciclos transcurridos. La parte no desprendida de la probeta, se vuelve a introducir junto con una nueva disolución de cloruro sódico al 3% en los moldes metálicos, se cierra herméticamente y se vuelve a colocar en el congelador para continuar con los ciclos de hielo-deshielo.



Figura 4. Ensayo de hielo-deshielo.



Figura 5. Baño a 25°C para el ensayo de hielo-deshielo.

3.4 Ciclos de humedad-sequedad

Al no existir una norma explícita de ciclos de choque térmico para probetas de hormigón, se adaptó la norma EN 14066 [25], definida para caracterizar muestras de piedra natural.

Este ensayo se realizó sobre cuatro probetas cúbicas de 100 mm de arista de cada una de las dosificaciones, y consistió en aplicar 100 ciclos de 18 horas en estufa a 70°C seguidos de 6 horas de inmersión en agua en un recipiente que se encontraba en la cámara de curado, donde

se garantiza una temperatura constante. En la Figura 6, se pueden ver las probetas inmersas en agua y, en la Figura 7 en la estufa.

Durante los ciclos, se registraba, cada tres días al salir de la estufa, tanto la masa de las probetas como la velocidad de los impulsos ultrasónicos, mediante el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 12504-4 [26]. Al terminar los 100 ciclos, las probetas se ensayaron a compresión para determinar la pérdida de resistencia mecánica sufrida tras 100 ciclos de choque térmico.



Figura 6. Probetas inmersas en agua, ensayo choque térmico.



Figura 7. Probetas en estufa, ensayo choque térmico. Resultados

4.1 Propiedades mecánicas

En la Figura 8 se puede observar la evolución de la resistencia a compresión en función del tiempo, por su parte, en la Figura 9 se puede ver la evolución del módulo elástico en función del tiempo de los distintos hormigones.

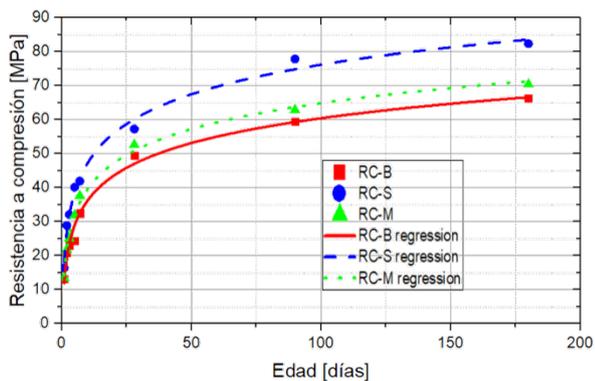


Figura 8. Evolución de la resistencia a compresión.

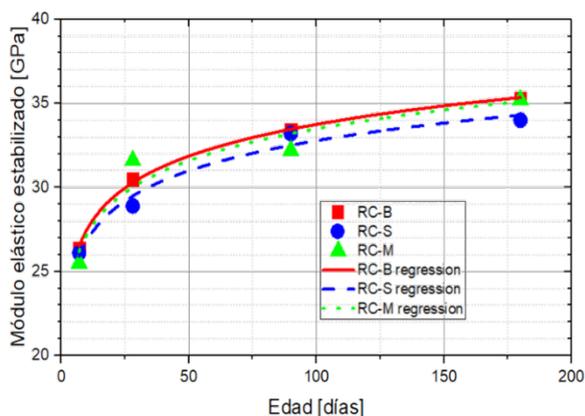


Figura 9. Evolución del módulo elástico.

Se puede observar la gran influencia de la relación w/c en la resistencia a compresión del RC-S. Por su parte, el RC-B es el hormigón en el que se obtienen las menores resistencias a compresión, el RC-M se encuentra en un punto intermedio entre los otros dos hormigones.

En el caso del módulo elástico, si bien la pasta RC-S es de mejor calidad que el del RC-B, la notablemente menor rigidez del mortero adherido a los áridos naturales que conforman los RA-S, hacen que el módulo elástico del RC-S sea menor que el del RC-B. Al igual que en el caso de la resistencia a compresión, en todos los casos el RC-M se encuentra entre los hormigones RC-B y RC-S.

4.2 Permeabilidad al oxígeno

El parámetro que mayor información puede aportar sobre la durabilidad de un hormigón es su permeabilidad. Esto es debido a que aquellos hormigones muy poco permeables impedirán que los agentes potencialmente dañinos

penetren en el interior de su masa. Por esta razón, el primer ensayo de caracterización de la durabilidad del hormigón ha sido determinar su permeabilidad al oxígeno. Los resultados de 9 muestras por dosificación están representados en la Figura 10. Los valores más pequeños de permeabilidad implican que el material es más impermeable y, en principio, que tendrá una respuesta mejor frente al ataque de agentes externos agresivos.

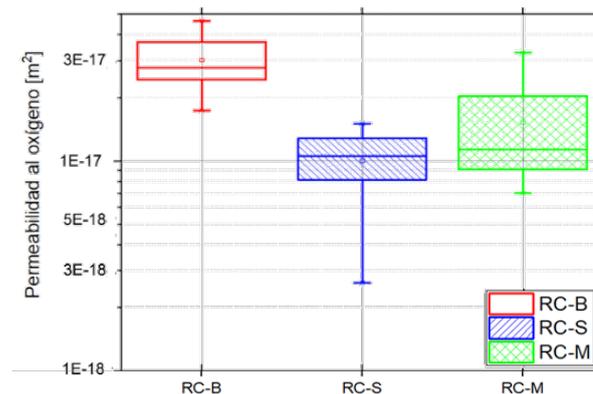


Figura 10. Resultados permeabilidad al oxígeno.

Los resultados obtenidos para las tres dosificaciones analizadas sitúan a los hormigones dentro de la categoría de impermeables. Comparativamente, el RC-S presenta los valores más bajos de permeabilidad al oxígeno, siendo, como era de esperar, los del RC-M intermedios entre los del RC-S y los del RC-B. Este hecho no resulta sorprendente, ya que la permeabilidad de un hormigón depende, principalmente, de la permeabilidad de la pasta, dado que es por ésta por la que penetran los agentes externos en el hormigón. Es bien sabido, que la pasta de mortero es tanto más permeable cuando mayor sea la relación w/c . Por esta razón, se puede entender que generalmente, la presencia de RA no modifica significativamente la permeabilidad del hormigón [11]. Además, también es ampliamente conocido que la presencia de CV en el hormigón reduce la permeabilidad de los mismos [27].

4.3 Ciclos de hielo-deshielo

En la Figura 11, se presenta la evolución de la masa remanente de las probetas sometidas a ciclos de hielo-deshielo.

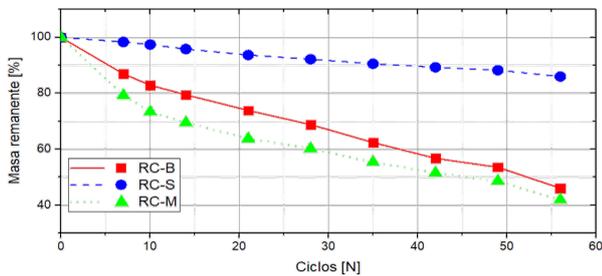


Figura 11. Masa remanente de probetas sometidas a ciclos de hielo-deshielo.

En la experimentación llevada a cabo, se aprecian dos fases de daño. En la primera, hasta que se consigue la geometría esférica, la velocidad de pérdida de masa es mayor que en la segunda. El punto de cambio de pendiente, se produce cuando la probeta ha disminuido en un 20% su masa.

Comparativamente, el comportamiento del RC-S es mejor que el de las otras dos dosificaciones. Tras ser sometido a 56 ciclos, aún se encuentra en la primera fase de degradación, manifestando una pérdida de masa de aproximadamente un 15%.

En el caso del RC-B y del RC-M existen las dos fases de daño: una fuerte caída hasta el ciclo 10, alcanzando el 20% de pérdida de masa y una continuación, más lenta pero imparable, que supone disponer de menos del 50% de la probeta completados los 56 ciclos.

En la Figura 13, se puede ver el aspecto exterior de los tres tipos de hormigón tras los 56 ciclos de hielo-deshielo. En estas probetas se aprecia que el RC-B ha sufrido un daño importante, llegando incluso a perder su geometría original cubica. Por su parte, el RC-S, tras 56 ciclos de hielo-deshielo sigue manteniendo su geometría cubica, aunque ha sufrido un descascarillado superficial. El RC-M, ha sido el material que mayor daño ha sufrido, con un daño ligeramente superior al del RC-B. Puede no resultar esperable que un hormigón con una dosificación intermedia entre el RC-B y

el RC-S sufra un daño mayor que cualquiera de los dos por separado. Esto se justifica debido a que este RC-M combina la parte débil del RC-B su pasta porosa que permite que el agua penetre en el hormigón, y los áridos más absorbentes del RC-S. Esto hace que el agua tenga una mayor capacidad de fluir por el RC-M que por el RC-S, y que en la probeta se almacene una mayor cantidad de agua, que cuando se congela y aumenta el volumen daña el mortero. Se aprecia en la Figura 12, que la geometría hacia la que tiende la probeta tras los ciclos de hielo-deshielo es la esfera, esto es debido a que la esfera es la figura geométrica que menor área por unidad de volumen tiene.

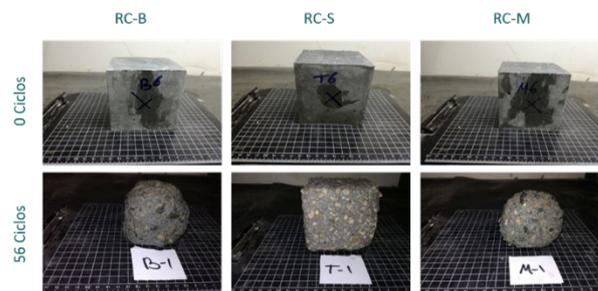


Figura 12. Aspecto de las probetas antes de comenzar el ensayo (parte superior) y tras 56 ciclos de hielo-deshielo (parte inferior).

4.4 Ciclos de humedad-sequedad

En la Figura 13, se puede ver la variación de aspecto superficial que han sufrido las probetas tras ser sometidas a 100 ciclos de humedad-sequedad. Se puede apreciar que las probetas han sufrido una cierta decoloración y, también, la aparición de una pequeña fisuración superficial, que no afecta a la geometría cúbica de partida.

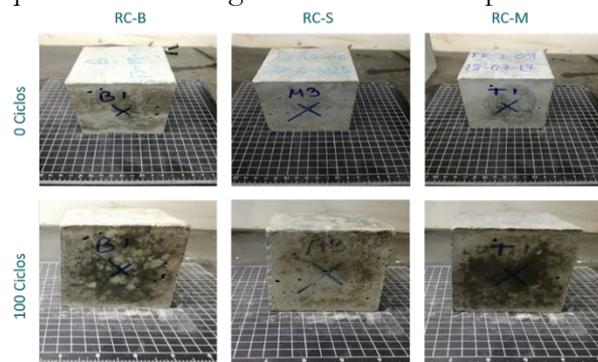


Figura 13. Aspecto de las probetas antes de comenzar el ensayo (parte superior) y tras 100 ciclos de humedad-sequedad (parte inferior).

Tabla 3. Valores de resistencia tras 100 ciclos de choque térmico.

Material	Referencia [MPa]	Resistencia remanente [MPa]	Pérdida de resistencia a compresión [%]
RC-B	59.43	52.74	11.26
RC-S	77.80	62.31	19.91
RC-M	62.30	53.63	13.91

4. Conclusiones

Si bien el hormigón es un material que habitualmente se caracteriza mediante sus propiedades mecánicas, resulta indudable que existen ciertos agentes que lo pueden dañar y, por lo tanto, precisan de ser caracterizadas respecto a su durabilidad. En el presente trabajo se han caracterizado la durabilidad de 3 tipos de hormigón. De los resultados obtenidos pueden observarse las siguientes conclusiones:

- Los valores de permeabilidad al oxígeno obtenidos durante los ensayos, sitúan a los tres hormigones dentro de la categoría de impermeables.
- En los ciclos de hielo-deshielo, se ha comprobado que el RC-B, tras la exposición a 56 ciclos, ha sufrido un daño importante, llegando las probetas a perder su geometría original cúbica. Por su parte, el RC-S, mantiene su integridad, si bien se aprecia un descascarillado superficial de las muestras. El RC-M es el material que mayor deterioro manifiesta, incluso ligeramente superior al del RC-B. Este resultado inesperado se justifica debido a que en el RC-M se combina la pasta porosa del RC-B que permite que el agua penetre en el hormigón, con los áridos más absorbentes del RC-S. Esto hace que el agua tenga una mayor capacidad de fluir por el RC-M que por el RC-S, y que en la probeta se almacene una mayor cantidad de agua, que cuando se congela y aumenta el volumen afecta a la integridad de la probeta.
- Tras los 100 ciclos de choque térmico, se puede apreciar que las probetas han sufrido una cierta decoloración y también la aparición de una pequeña fisuración

superficial, que no afecta a la geometría cúbica de partida. Estos 100 ciclos de choque térmico suponen una reducción en la resistencia a compresión de un 20%, para el RC-S, de un 14% para el RC-M, y del 11% para el RC-B.

- Los hormigones diseñados cumplen con los requisitos de durabilidad exigibles a los hormigones usados en la fabricación de vía en placa.

Referencias

- [1] K. Ando, Development of Slab T racks for Hokuriku Shinkansen Line Tracks, 42 (2001) 35–41.
- [2] C.-S. Poon, D. Chan, The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong, Resour. Conserv. Recycl. 50 (2007) 293–305.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.06.005>.
- [3] S.C.C. Kou, C.S.S. Poon, Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates, Cem. Concr. Compos. 31 (2009) 622–627.
<https://doi.org/10.1016/J.CEMCONC.OMP.2009.06.005>.
- [4] D. Pedro, J. de Brito, L. Evangelista, Mechanical characterization of high performance concrete prepared with recycled aggregates and silica fume from precast industry, J. Clean. Prod. 164 (2017) 939–949.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.249>.
- [5] J. Sainz-Aja, I. Carrascal, J.A. Polanco, C. Thomas, I. Sosa, J. Casado, S. Diego, Self-compacting recycled aggregate concrete using out-of-service railway superstructure wastes, J. Clean. Prod. 230 (2019) 945–955.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.386>.
- [6] C. Thomas, J. Setién, J.A. Polanco, P. Alaejos, M.S. De Juan, M. Sánchez de Juan, Durability of recycled aggregate concrete, Constr. Build. Mater. 40 (2013) 1054–1065.

- <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILD MAT.2012.11.106>.
- [7] A.K. Padmini, K. Ramamurthy, M.S. Mathews, Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 829–836.
- [8] A. Akbarnezhad, K.C.G. Ong, C.T. Tam, M.H. Zhang, Effects of the parent concrete properties and crushing procedure on the properties of coarse recycled concrete aggregates, *J. Mater. Civ. Eng.* 25 (2013) 1795–1802. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000789](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000789).
- [9] L. Evangelista, J. de Brito, Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cem. Concr. Compos.* 32 (2010) 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.09.005>.
- [10] R.S. Ravindrarajah, Y.H. Loo, C.T. Tam, Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete, *Mag. Concr. Res.* 39 (1987) 214–220.
- [11] L.A. Pereira-De-Oliveira, M.C.S. Nepomuceno, J.P. Castro-Gomes, M.F.C. Vila, Permeability properties of self-Compacting concrete with coarse recycled aggregates, *Constr. Build. Mater.* 51 (2014) 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.061>.
- [12] J.A. Sainz-Aja, Slab track manufacture using out of service railways wastes, University of Cantabria, 2019.
- [13] CEN, EN 197-1 Cement Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements, (2011). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.64.88>.
- [14] C. Alfa, Ficha técnica EN 197-1 CEM IV/B (V) 32,5 N, (n.d.).
- [15] CEN, EN 80103:2013 Test methods of cements. Physical analysis. Actual density determination, (2013).
- [16] E.N. 196-6:2010, Methods of testing cement - Part 6: Determination of fineness, (2010).
- [17] CEN, EN 12390-3 Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens, (2009).
- [18] CEN, EN-12390-3/AC Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens, (2011).
- [19] CEN, EN-12390-13 Testing hardened concrete - Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression, (2014).
- [20] U.N.E. 83966:2008, Concrete durability. Test methods. Conditioning of concrete test pieces for the purpose of gas permeability and capilar suction tests., (2008).
- [21] U.N.E. 83981:2008, Concrete durability. Test methods. Determination to gas permeability of hardened concrete., (2008).
- [22] U.N.E. 83981:2008 ERRATUM:2011, Concrete durability. Test methods. Determination to gas permeability of hardened concrete., (2011).
- [23] C. Thomas García, HORMIGÓN RECICLADO DE APLICACIÓN ESTRUCTURAL, 2012.
- [24] C. 12390-9:2006, Testing hardened concrete - Part 9: Freeze-thaw resistance - Scaling, (2008).
- [25] E.N. 14066, Natural stone test methods - Determination of resistance to ageing by thermal shock, (2014).
- [26] AEN/CTN 83, UNE-EN 12504-4. Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos, AENOR. (2006).
- [27] S.C.S.S.C. Kou, C.S.S. Poon, Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate, *Constr. Build. Mater.* 35 (2012) 69–76. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILD MAT.2012.02.032>.