



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Departamento de Tecnología de la Construcción

Tesis doctoral

Desarrollo de nueva metodología para la estimación de propiedades mecánicas de eco-hormigones, mediante ensayos no destructivos en función de la temperatura

Autora

M^a Mirian Velay Lizancos

Directores

**M^a Isabel Martínez Lage
Miguel Ângelo Dias Azenha**

A Coruña, mayo de 2016



Universidade da Coruña



E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Departamento de Tecnología de la Construcción

Tesis doctoral

Desarrollo de nueva metodología
para la estimación de propiedades mecánicas de
eco-hormigones, mediante ensayos no
destructivos en función de la temperatura

Autora

M^a Mirian Velay Lizancos

Directores

M^a Isabel Martínez Lage

Miguel Ângelo Dias Azenha

A Coruña, mayo de 2016

Programa oficial de Doctorado en Ingeniería Civil. R.D. 99/2011



Universidade da Coruña



E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Departamento de Tecnología de la Construcción

Memoria presentada por M^a Mirian Velay Lizancos, bajo la dirección de los Doctores M^a Isabel Martínez Lage y Miguel Ângelo Dias Azenha

M^a Mirian Velay Lizancos

Dra. M^a Isabel Martínez Lage

MIGUEL
ÂNGELO DIAS
AZENHA

Digitally signed by
MIGUEL ÂNGELO DIAS
AZENHA
Date: 2016.05.03
18:52:25 +01'00'

Dr. Miguel Angelo Dias Azenha

A Coruña, mayo de 2016

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis directores de tesis, Isabel y Miguel, el tiempo que me han dedicado y todo lo que he aprendido con ellos; gracias a su inestimable ayuda, apoyo y dedicación, hoy puedo depositar mi tesis doctoral. Estoy muy orgullosa de poder entregar mi tesis doctoral con dos directores que además de grandes profesionales, son grandes personas.

Doy las gracias a las entidades que han financiado las investigaciones en las que se basa la presente tesis. Esta investigación ha sido desarrollada, principalmente, con la financiación de dos proyectos del Programa FEDER-INNTERCONECTA, concedido por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI), dependiente del Ministerio de Economía y competitividad y co-financiado con Fondos FEDER. Estos proyectos son:

Proyecto ITC-20133075 “Aplicación de los residuos de la industria del papel y de neumáticos fuera de uso para la construcción de terraplenes ecológicos aligerados y otros materiales de construcción” (PANTERA). Quiero agradecer a las compañías del consorcio de este proyecto: SACYR Construcción S.A.U., ENCE Energía y Celulosa, S.A., CYE Control y Estudios, S.L., and Xiloga S.L, su trabajo y su apoyo.

Proyecto ITC-20113055, “Desarrollo de tecnologías para la valorización de residuos de construcción y demolición en aplicaciones innovadoras” (TECNOVAL). Quiero mostrar mi agradecimiento por su trabajo y su apoyo en esta investigación a las empresas del consorcio que han participado en este proyecto: SACYR Construcción S.A.U., Castelo Soluciones Estructurales Sociedad de Responsabilidad and CIMARQ Consultora de Ingeniería, Medio Ambiente y Arquitectura S.L., Prefabricados Faro.

También quiero agradecer a las entidades que han financiado mis estancias de investigación internacionales:

Muchas gracias a la *European Cooperation in Science and Technology* que financió una de mis estancias internacionales de investigación, mediante la concesión de una beca competitiva de concurrencia pública “Short Term Scientific Missions (STSM)” en el marco de la COST Action TU1404 “Towards the next generation of standards for service life of cement-based materials and structures”.

Agradecer también a la Agrupación Europea de Cooperación Territorial Galicia-Norte de Portugal, la financiación de una de mis estancias internacionales de investigación, mediante la concesión de una beca competitiva de concurrencia pública del Programa Iacobus.

Pese a todos los escollos que he encontrado a lo largo estos años, estas páginas se quedan muy cortas para poder expresar toda la gratitud y reconocimiento a todas aquellas personas que durante estos años me han ayudado y apoyado. El camino hacia esta tesis comienza el primer día que pisé la escuela, por ello, no quiero olvidarme de agradecer a mis profesores durante la carrera; recuerdo perfectamente y con mucho cariño las clases de Jaime, Gonzalo, Julia, Belén, Fermín, Manolo, Fernando, Quique, Ignasi, Creus, Pablo, y un largo etcétera.

Agradecer a la dirección de la Escuela su apoyo y su gran trabajo. Me siento orgullosa de formar parte de esta gran Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Quiero mostrar mi gratitud al grupo de investigación gCons, al que pertenezco. Gracias, Fernando, por todo tu apoyo y por tus grandes consejos. También quiero hacer especial

mención a Juan Luis y a Ana, gracias por estar siempre ahí para ayudar a todo el mundo, siempre sonrientes.

Por la ayuda prestada durante el desarrollo de mis campañas experimentales, quiero dar las gracias a María, a Natalia y a todo el equipo técnico de los Laboratorios de la Escuela y del CITEEC, así como al equipo técnico del LEST (Laboratorio de estructuras, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Minho) y al Profesor José Sena Cruz. Gracias también a todos mis compañeros de la Universidad de Minho, Granja, Andrea, Patricia, Silvia, Luis, Lucía, Christoph, Pedro, Mateus, etc., que me acogieron y me ayudaron durante mis estancias de investigación en Portugal. También dar las gracias a Wim Stenfert, por haber prestado, de forma desinteresada, el equipo del CONSENSOR para el desarrollo de la investigación así como por su asesoramiento técnico.

Quiero dar las gracias a los becarios y compañeros que nos han ayudado durante la ejecución de los proyectos en los que he participado durante estos años: Pablo, Marcos, Cris, Lidia, Jorge, Conchi, Sara, Xacobe, Andrea y Eva. Dar gracias también al personal de CIMARQ y, en especial, a mi compañero Fede y al CEO de la empresa, Gustavo Vázquez.

No puedo dejar de agradecer cada uno de los días compartidos con Ángela. Durante gran parte de mi doctorado, ella ha celebrado conmigo cada una de mis alegrías y me ha apoyado en cada uno de los días malos, que también los hay. Ha sido un gran apoyo y nunca me olvidaré de ello.

Tengo mucho que agradecer a mis compañeros de despacho y de comida, que además de compañeros, son amigos: Alba, Adrián, Hugo, Miguel, Guille V., Guille L., Carles, Gemma, Antonio, Rubén, Ibuki, Jiangping, Jesús, Ismael, Emilio, Ana... y, en especial, a Pablo. Él ha sido y siempre será mi gran compañero de trabajo y, sobre todo, gran amigo. Durante todos estos años, tanto en los buenos momentos como en los malos, siempre hemos sido un equipo unido, y siempre podrás contar conmigo.

Quiero agradecer el ánimo y el apoyo constante de todos mis amigos. En especial, además de los que ya he nombrado anteriormente, quiero dar las gracias a Melanie, Cris, Lucía, Tamara y a mi gran amiga y compañera de mil aventuras desde hace más 10 años, Laura, por estar siempre ahí.

Quiero darle las gracias a Héctor, por estar a mi lado, por apoyarme y por aguantarme en esta etapa final de mi tesis. Estos últimos dos años, durante la redacción de mi tesis, he pasado por momentos duros, que han sido un poco menos duros gracias a ti.

Aunque ya te he dado las gracias, quiero volver a dártelas, Isabel. Gracias, y mil veces gracias. No solo has sido una gran profesora, una gran directora de tesis y una gran jefa, has sido además una gran amiga y siempre podrás contar conmigo para lo que haga falta. He aprendido mucho contigo, no solo en el plano profesional, sino también de la vida. Lo más positivo que me llevo de todos estos años de trabajo son todos los momentos compartidos contigo y con Pablo.

Por último, quiero darle las gracias a toda mi familia, ya que gracias a ellos hoy soy quien soy. Gracias a mis hermanas, a mis cuñados, a mi ahijada Valeria, a mis sobrinos Adriana y Mateo, a mis padrinos, a mis tíos, a mis primos, a mis abuelos y a Juan Cruz, Mari, Germán y Sole. Gracias, Carmiña, por haberme ayudado siempre como una madre y por haberme animado constantemente a hacer la tesis doctoral. Por último, quiero expresar mi eterna gratitud a mis padres: Gracias a vuestro esfuerzo, a vuestro cariño y a vuestro apoyo incondicional, hoy, estoy aquí.

María Mirian Velay Lizancos

Resumen breve

La utilización de las cenizas de biomasa como adición del cemento o la utilización del árido reciclado fino y grueso de hormigón como sustitución parcial del árido natural en la fabricación del hormigón, son dos ejemplos de valorización de residuos, que pasan a ser subproductos. Esto reduce el impacto ambiental de la fabricación del hormigón.

Con el fin de contribuir al avance de las normativas hacia una regulación más sostenible, en esta tesis se estudia la influencia de estos eco-materiales en la evolución de propiedades mecánicas del hormigón y en sus correlaciones con los resultados de ensayos no destructivos, en función de la temperatura de curado. Se observa que la temperatura de curado influye en el efecto que tienen los eco-materiales en la evolución de las propiedades mecánicas, y afecta también a sus correlaciones con ensayos no destructivos, sobre todo, a edades tempranas.

Se proponen modelos de estimación de la resistencia a compresión mediante combinación de ensayos no destructivos que mejoran los resultados de los modelos utilizados habitualmente. Por último, se realiza una propuesta de nuevo procedimiento para mejora del control de calidad, que podría conllevar grandes ventajas tanto a corto plazo, como a largo plazo.

Short abstract

The use of biomass ashes as an additive to cement or the utilization of fine and coarse recycled aggregate for concrete as a partial substitution of natural aggregate in concrete fabrication, constitute two examples of waste recovery, as the wastes eventually become by-products. This reduces the environmental impact of concrete fabrication.

With the goal of contributing to the advancement of standards toward more sustainable protocols, this Thesis studies the influence of these eco-materials on the evolution of the mechanical properties of concrete and on the correlations with the results of non-destructive tests, as a function of the curing temperature. It is observed that curing temperature has an impact on the effect of these eco-materials on the evolution of the mechanical properties and also affects their correlations with non-destructive tests, especially at early ages.

Estimation models of the compressive strength are proposed by combining non-destructive tests. The proposed models achieve better results than those usually utilized. Finally, a new procedure for the improvement of quality control is proposed. This may lead to significant advantages both on the short- and the long-term time scales.

Resumo breve

A utilización das cinzas de biomasa como adición do cemento ou a utilización do árido reciclado fino e groso de formigón como substitución parcial do árido natural na fabricación do formigón, son dous exemplos de valorización de residuos que pasan a ser subprodutos. Isto reduce o impacto ambiental da fabricación do formigón.

Co el fin de contribuír ao avance das normativas cara unha regulación máis sostible, nesta tese se estudia a influencia destes eco-materiais na evolución de propiedades mecánicas do formigón e nas súas correlacións cos resultados de ensaios non destrutivos, en función da temperatura de curado. Observase que a temperatura de curado inflúe no efecto que teñen os eco-materiais na evolución das propiedades mecánicas e afecta tamén a súas correlacións con ensaios non destrutivos, sobre todo, a idades temperás.

Propóñense modelos de estimación da resistencia a compresión mediante combinación de ensaios non destrutivos que melloran os resultados dos modelos utilizados habitualmente. Por último, realízase unha proposta de novo procedemento para mellora do control de calidade, que podería implicar grandes vantaxes tanto a curto prazo, como a longo prazo.

Resumen

La protección y preservación del medioambiente son claves para el futuro de la humanidad y de la vida en nuestro planeta. En los últimos años se ha desarrollado una mayor concienciación sobre ello y en muchos países han desarrollado políticas que promueven un desarrollo sostenible, que incluyen, la reducción de las emisiones del CO₂, el avance hacia un uso eficiente de los recursos naturales y una mejora en la gestión de los residuos.

En la presente tesis se estudia la influencia de la utilización de las cenizas de biomasa y árido reciclado fino y grueso de hormigón, en las propiedades mecánicas de los hormigones. Las cenizas de biomasa utilizadas en este estudio como adición, son un residuo procedente de la industria papelera y no ha sido necesario ningún tratamiento posterior para su uso. La utilización conjunta de áridos reciclados finos y gruesos es muy interesante desde el punto de vista de la sostenibilidad, ya que utiliza todo el producto resultante del tratamiento, por lo que no se genera un nuevo residuo y se evita su tamizado final.

Debido al desconocimiento de los efectos de los mismos sobre las propiedades del hormigón, la utilización de estos eco-materiales está prohibida para la fabricación de hormigón estructural por múltiples normativas internacionales.

Con el fin de contribuir al avance de las normativas hacia una regulación más sostenible y permisiva, sin que esto suponga un riesgo estructural, se ha desarrollado una investigación sobre la influencia de estos eco-materiales en la evolución de las propiedades mecánicas del hormigón y en las correlaciones de las mismas con los resultados de distintos ensayos no destructivos, en función de la temperatura de curado. Se observa que la temperatura influye en el efecto que tienen los eco-materiales en la evolución de las propiedades mecánicas. Además, tiene un fuerte efecto en las correlaciones entre ensayos no destructivos y las propiedades mecánicas del hormigón, sobre todo, a edades tempranas.

Se pretende también avanzar en la mejora de los modelos de estimación de la resistencia a compresión mediante combinación de ensayos no destructivos, estudiando la influencia de diversos factores en las correlaciones y proponiendo nuevos modelos que tengan en cuenta dichas influencias. Se desarrolla una formulación para la estimación de la resistencia a compresión que ha sido validada mediante el método de ensayo y test. Sus resultados han sido comparados con los resultados obtenidos con otros modelos de estimación habituales.

La madurez del hormigón y la temperatura de curado son dos factores propuestos en los nuevos modelos de estimación. Estos dos factores no son tenidos en cuenta en los modelos de estimación de la resistencia a compresión mediante combinación de ensayos no destructivos habituales. Para que las correlaciones sean aplicables a hormigones con distintos porcentajes de árido reciclado, otra variable de interés es la densidad del hormigón. La relación agua/cemento y la cantidad de adiciones en función de la temperatura también son factores del nuevo modelo de estimación. Aplicando Programación Genética, se ha hallado una ecuación de estimación segura de la resistencia que predice con muy buena precisión la resistencia a compresión y, a un mismo tiempo, consigue que dicha estimación esté del lado de la seguridad o con una sobreestimación mínima, casi despreciable.

Por último, teniendo en cuenta todo lo desarrollado en la tesis, se realiza una propuesta de nuevo procedimiento para mejora del control de calidad para grandes obras, que podría conllevar grandes ventajas tanto a corto plazo, como a largo plazo.

Resumo

A protección e a preservación do medioambiente son claves para o futuro da humanidade e da vida no noso planeta. Nos derradeiros anos desenvolveuse unha maior concienciación e en moitos países desenrolaron políticas que promoven un desenvolvemento sostible, que inclúen, a redución das emisións de CO₂, un uso eficiente dos recursos naturais e unha mellora na xestión dos residuos.

Na presente tese, estúdase a influencia da utilización de cinzas de biomasa e áridos reciclados finos de grosos de formigón, nas propiedades mecánicas dos formigóns. As cinzas de biomasa utilizadas neste estudo como adición, son un residuo procedente da industria papeleira e non foi preciso ningún tratamento posterior para o seu uso. A utilización conxunta de áridos reciclados finos e grosos é moi interesante dende o punto de vista da sustentabilidade, xa que utiliza todo o produto resultante do tratamento, polo que non se xera un novo residuo e evítase o seu peneirado final.

Debido ao descoñecemento dos seus efectos sobre as propiedades do formigón, a utilización destes eco-materiais está prohibida para a fabricación de formigón estrutural por múltiples normativas internacionais e nacionais.

Co fin de contribuír ao avance das normativas cara unha regulación mais sustentábel e permisiva, sen que isto supoña un risco estrutura, desenrolouse unha investigación sobre a influencia destes eco-materiais na evolución das propiedades mecánicas dos formigóns e nas correlacións das mesmas cos resultados de distintos ensaios nos destrutivos, en función da temperatura de curado. Observase que a temperatura inflúe no efecto que teñen os eco-materiais na evolución das propiedades mecánicas. Ademais, ten un forte efecto nas correlación entre ensaios non destrutivos e as propiedades mecánicas do formigón, sobre todo, a idades temperás.

Preténdese tamén avanzar na mellora dos modelos de estimación da resistencia a compresión mediante a combinación de ensaios non destrutivos, estudando a influencia de diversos factores nas correlación e propoñendo novos modelos que teñan en conta estas influencias. Desenrolase una formulación para a estimación de resistencia a compresión que foi validada mediante o método de adestramento e test. Os seus resultados foron comparados cos obtidos con modelos habituais de estimación. A madurez do formigón e a temperatura de curado son dous factores propostos nos novos modelos de estimación. Estes dous factores non son tidos en conta nos modelos de estimación da resistencia a compresión habituais. Para que as correccións sexan aplicables a formigóns con árido reciclado, outra variable de interese é a densidade de formigón. A relación auga/cemento e a cantidade de adicións en función da temperatura tamén son factores do novo modelos de estimación. Aplicando Programación Xenética, atopouse unha ecuación de estimación segura, que predí con moi boa precisión a resistencia a compresión e, ao mesmo tempo, consegue que dita estimación se encuentre do lado da seguridade ou cunha sobreestimación mínima, case desprezable.

Por último, tendo en conta todo lo desenvolvido na tese, realizase unha proposta de novo procedemento para a mellora do control de calidade para grandes obras, que podería traducirse en grandes vantaxes tanto a corto prazo, como a largo prazo.

Summary

The protection and preservation of the environment are key elements for the future of humankind and life in our planet. In the last few years the awareness about this issue has risen and a number of countries are developing policies that promote sustainable development, including, the reduction of CO₂ emissions, the advancement toward an efficient use of natural resources and the improvement of waste management.

In this dissertation, I study the influence of the use of biomass ashes as well as fine and coarse recycled aggregates on the mechanical properties of concrete. The biomass ashes that we use in this thesis as additive are wastes of the paper industry. No treatment was needed to use the biomass ashes. The combined use of fine and coarse recycled aggregates, *in lieu* of the use of the coarse fraction only, is very interesting from the viewpoint of sustainability, because it uses the entire output of the treatment, so that no additional waste is generated and the final sieving is avoided.

Due to the lack of knowledge about the effect of the above-mentioned eco-materials on the properties of concrete, their use is forbidden by the international standards.

With the ultimate goal of contributing to the advancement toward more sustainable and flexible standards, without assuming any structural risk, I have studied the influence of eco-materials on the evolution of the mechanical properties of concrete and their correlation with the results of different non-destructive tests, as a function of the curing temperature. I have observed that temperature has a significant impact on the effect of eco-materials on the evolution of the mechanical properties. In addition, temperature has a strong impact on the correlation of non-destructive tests and the mechanical properties of concrete, particularly at early stages.

I have also tried to improve the models that estimate the compressive strength through a combination of non-destructive tests. To accomplish this, I have studied the influence of different factors in the correlations and I have proposed new models that account for those factors. The results have been compared with those obtained by usual estimation methods.

The concrete's maturity and the curing temperature are two proposed factors in the new estimation models. These two factors are not taken into account in the usual estimation models for compressive strength through the combination of non-destructive tests. For the correlations to be applicable to concretes with different percentages of recycled aggregates, another variable of interest in the concrete's density. The water/cement ratio and the amount of additives as a function of temperature are also considered in the new estimation model. By applying Genetic Programming, a very accurate equation that predicts an underestimate of the compressive strength has been found. The error with respect to measured values is almost negligible.

Finally, taking into account the work presented in this Dissertation, I propose a new procedure to improve quality control in major public works that may produce important short- and long-term advantages.

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción y objetivos generales.....	1
1.1. Antecedentes y motivación	3
1.2. Objetivos generales	6
1.3. Organización de la tesis	7
Capítulo 2. Estado del conocimiento	9
2.1. El material: Eco-hormigón. Estudio de propiedades mecánicas a edades tempranas.....	11
2.1.1. Eco-hormigones con áridos reciclados finos y gruesos de hormigón, procedentes de RCD y eco-morteros con árido reciclado fino.....	11
2.1.2. Eco-hormigones y eco-morteros con cenizas de biomasa	14
2.1.3. Otros tipos de eco-hormigones.....	18
2.2- Ensayos no destructivos para la estimación de las propiedades mecánicas del hormigón	20
2.2.1. Introducción / Aplicación general	20
2.2.2. Velocidad de pulso ultrasónico (UPV)	21
2.2.3. Índice de rebote (R).....	25
2.2.4. Madurez	27
2.2.5. Conductividad y resistividad eléctrica	30
2.2.6. EMM-ARM.....	31
2.2.7. Métodos combinados	31
Capítulo 3. Objetivos específicos.....	33
3.1. Objetivos específicos	35
Capítulo 4. Metodología	37
4.1. Designación de los hormigones de estudio. Nomenclatura.....	39

4.2. Desarrollo metodológico	40
4.3. Equipamiento específico para ensayos no destructivo y procedimientos	44
4.3.1. Equipamiento específico para ensayos no destructivos.....	44
4.3.1.1. Velocidad de ultrasonidos.....	44
4.3.1.2. Índice de rebote (esclerómetro)	45
4.3.1.3. Conductividad eléctrica interna en continuo (ConSensor)	45
4.3.1.4. Módulo de deformación en continuo (EMM-ARM)	46
4.3.1.5. Frecuencia interna de microondas en mortero fresco (Cementómetro).....	47
4.3.1.6. Registradores de temperatura interna	48
4.3.2. Amasadas de hormigones	49
4.3.2.1. Procedimiento de amasado	49
4.3.2.2. Amasada base	50
4.3.2.3. Amasada base + conductividad eléctrica	52
4.3.2.4. Amasada para monitorización del módulo de deformación	52
4.3.2.5. Amasadas en fábrica	53
4.3.2.6. Resumen de amasadas	53
4.3.3. Amasadas efectuadas para cada mortero.....	53
4.3.3.1. Amasadas para energía de activación.....	53
4.3.3.2. Amasadas para definición de agua/cemento efectiva	54
4.3.4. Procedimiento para la obtención de la energía de activación	55
Capítulo 5. Caracterización de los materiales	57
5.1. Hormigones clase B.....	59
5.1.1. Materiales para la fabricación de los hormigones de la clase B	59
5.1.2. Dosificación y datos básicos de los hormigones de la clase B	62
5.2. Hormigones clase C.....	63

5.2.1. Materiales para la fabricación de los hormigones de la clase C	63
5.2.1.1. Áridos para hormigones del grupo C	63
5.2.1.2. Cenizas de biomasa y cemento para hormigones del grupo C.....	67
5.2.2. Dosificación y datos básicos de los hormigones de la clase C	72
5.3. Morteros.....	74
5.3.1. Materiales para la fabricación los morteros.....	74
5.3.2. Dosificaciones de morteros.....	74
Capítulo 6. Definición empírica de la relación a/c efectiva	75
6.1. Motivación de este estudio.....	77
6.2. Objetivo del estudio.....	77
6.3. Bases del estudio y metodología	77
6.4. Desarrollo de la campaña experimental y análisis de resultados.....	79
6.5. Conclusiones de este estudio	84
Capítulo 7. Evolución de la resistencia a compresión y en sus correlaciones con ensayos no destructivos	85
7.1. Introducción.....	87
7.2. Factores que influyen en la evolución de la resistencia a compresión	87
7.2.1. Temperatura de curado	87
7.2.2. Eco-materiales a temperatura estándar	90
7.2.3. Eco-materiales reciclados en función de la temperatura de curado.....	91
7.2.4. Relación agua/cemento	97
7.3. Factores que influyen en la correlación entre resistencia a compresión y ensayos no destructivos	98
7.3.1. Eco-materiales a temperatura estándar	98
7.3.1.1 Árido reciclado.....	98

7.3.1.2. Cenizas de biomasa.....	103
7.3.2. Temperatura de curado	107
7.3.3. Eco-materiales en función de la temperatura de curado.....	114
7.3.3.1 Árido reciclado.....	114
7.3.3.2. Cenizas de biomasa.....	117
7.3.4. Relación agua/cemento en función de la temperatura de curado.....	118
7.4. Conclusiones parciales de este capítulo	120
Capítulo 8. Madurez: influencia de eco-materiales.....	123
8.1. Influencia de los áridos reciclados de hormigón (finos y gruesos) en la energía de activación y en las curvas resistencia a compresión – madurez	125
8.1.1. Influencia de los áridos reciclados en la energía de activación	125
8.1.2. Bases teóricas y desarrollo metodológico de análisis	129
8.1.3. Análisis de las curvas de madurez y de la influencia de los áridos reciclados	130
8.1.4. Influencia de los áridos reciclados en la estimación de resistencia a compresión	137
8.2. Influencia de las cenizas de biomasa en la energía de activación y en las curvas resistencia a compresión – madurez	149
8.2.1. Influencia de las cenizas de biomasa en la energía de activación	149
8.2.2. Bases teóricas y desarrollo metodológico para ensayo	151
8.2.3. Análisis de las curvas de madurez y de la influencia de las cenizas de biomasa	151
8.3. Influencia del ratio agua/cemento en la energía de activación y en las curvas de resistencia a compresión – madurez.....	156
8.3.1. Influencia de la relación agua/cemento en la energía de activación	156
8.3.2. Bases teóricas y desarrollo metodológico para ensayo	158
8.3.3. Análisis de las curvas de madurez y de la influencia de la relación agua/cemento.....	158
8.4. Propuesta de posible formulación para la estimación de la energía de activación.....	163
8.5. Evolución de la resistencia a compresión in situ en función del historial de temperaturas. Aplicación a casos reales.....	166

8.5.1. Introducción.....	166
8.5.2. Aplicación en muros.....	166
8.5.3. Aplicación en vigas de sección rectangular	168
8.5.4. Aplicación en vigas de sección doble T	170
8.5.5. Resumen de análisis conjunto de campañas experimentales en fábrica	177
8.6. Influencia de los materiales reciclados en el cálculo de la Energía de activación. Propuesta de modificación de la ASTM C1074-11 para su aplicación en eco-hormigones con árido reciclado.	178
8.6.1. Introducción y motivación de este estudio	178
8.6.2. Resultados y análisis.....	179
8.7. Conclusiones parciales de este capítulo y futuras líneas de investigación.....	182
Capítulo 9. Estimación de la resistencia a compresión con métodos combinados de ENDs	185
9.1. Planteamiento y bases teóricas	187
9.2. Resultados obtenidos y análisis	190
9.2.1. Resultados y análisis utilizando todos los datos para calibración.....	190
9.2.2. Resultados obtenidos con método de entrenamiento y test.....	198
9.3. Formulaciones resultantes de aplicar Programación Genética.....	200
9.3.1. Etapa 0 y 1: Programación orientada según formulación base.....	200
9.3.2. Etapa 2: Programación orientada con mejora en la seguridad	203
9.4. Conclusiones parciales del capítulo	209
Capítulo 10. Evolución del módulo de deformación a edades tempranas.....	211
10.1. Introducción.....	213
10.2. Módulo de deformación en hormigones con cenizas de biomasa.....	213
10.2.1. Influencia de las cenizas de biomasa en la evolución del módulo.....	213
10.2.2. Correlación entre módulo de deformación y END (C0 y CC)	215

10.3. Módulo de deformación en hormigones con árido reciclado.....	218
10.3.1. Influencia del árido reciclado fino y grueso en la evolución del módulo	218
10.3.2 Correlación entre módulo de deformación y END (CO y CH).....	220
10.3.3. Influencia de la temperatura de curado en la evolución del módulo.....	221
10.4. Influencia de los materiales reciclados en la relación de módulo de deformación y resistencia a compresión.....	223
10.5. Conclusiones parciales de este capítulo	227
Capítulo 11: Propuesta de nuevo procedimiento para mejora del control de calidad para grandes obras	229
11.1. Introducción.....	231
11.2. Utilidad y ventajas.....	231
11.2.1. A corto plazo	231
11.2.2. A largo plazo.....	232
11.3. Descripción de ensayos necesarios.....	232
11.3.1. Determinaciones previas y equipos necesarios	232
11.3.2. En laboratorio: caracterización complementaria del hormigón.....	233
11.3.3. En obra	234
11.3.4. En fábrica de prefabricados	236
11.4. Contenido de ficha técnica propuesta de caracterización complementaria de hormigones estructurales para grandes obras o para plantas de prefabricados	244
Capítulo 12. Conclusiones y futuras líneas de investigación	245
12.1. Conclusiones.....	247
12.1.1. Efecto de la temperatura en poder cementante de cenizas de biomasa.....	247
12.1.2. Determinación empírica de la relación agua/cemento efectiva	247
12.1.3. Conclusiones sobre factores que influyen en la resistencia a compresión	247

12.1.4. Conclusiones sobre factores que influyen en la las correlaciones entre END y resistencia a compresión.....	248
12.1.5. Conclusiones sobre el método de la madurez en eco-hormigones	248
12.1.6. Propuesta de nuevos modelos de estimación de la resistencia a compresión	250
12.1.7. Conclusiones sobre la evolución del módulo de deformación en eco-hormigones	251
12.1.8. Propuesta de control de calidad y aplicación de la MP _{G3} a un caso práctico	252
12.2. Futuras líneas de investigación	252
Chapter 12. Conclusions y future research.....	255
12.1. Conclusions.....	257
12.1.1. Effect of temperature in the cementing power of biomass ashes	257
12.1.2. Heuristic determination of the effective water/cement ratio.....	257
12.1.3. Conclusions about the factors that influence the compressive strength	257
12.1.4. Conclusions about factors that influence the correlations between non-destructive tests and compressive strength	258
12.1.5. Conclusions about the maturity method in eco-concretes.....	258
12.1.6. Proposal of new estimation methods for the compressive strength	259
12.1.7. Conclusions about the evolution of the E-modulus in eco-concretes	261
12.1.8. Proposal for quality control and application of MPG3 to a practical case	262
12.2. Future research.....	262
Referencias y bibliografía	265
Referencias	267
Normativa	279
Bibliografía.....	282

ÍNDICE DE TABLAS

Tablas del Capítulo 2:

Tabla 2.1. Composición química de cenizas utilizadas en los estudios referenciados	19
Tabla 2.2. Principales correlaciones tipo de UPV-Resistencia a compresión	21
Tabla 2.3. Principales correlaciones tipo de Índice de rebote-Resistencia a compresión.....	26
Tabla 2.4. Modelos de estimación de la resistencia a compresión más habituales	31

Tablas del Capítulo 4:

Tabla 4.1. Estudios realizados en el primer grupo de campañas experimentales.....	42
Tabla 4.2. Estudios realizados en el segundo grupo de campañas experimentales.....	43
Tabla 4.3. Estudios realizados en el cuarto grupo de campañas experimentales	43
Tabla 4.4. Amasadas de hormigón efectuadas	53

Tablas del Capítulo 5:

Tabla 5.1. Granulometría de los áridos utilizados en los hormigones B.....	60
Tabla 5.2. Composición de los áridos reciclados utilizados en los hormigones B	61
Tabla 5.3. Propiedades de los áridos utilizados en los hormigones B.....	62
Tabla 5.4. Dosificaciones de los hormigones B	62
Tabla 5.5. Granulometría de los áridos utilizados en los hormigones C.....	65
Tabla 5.6. Composición de los áridos reciclados utilizados en los hormigones C	66
Tabla 5.7. Propiedades de los áridos utilizados en los hormigones C.....	66
Tabla 5.8. Método BET.....	68
Tabla 5.9. Otros ensayos de las cenizas de biomasa.....	68
Tabla 5.10. Composición química	69
Tabla 5.11. Dosificación de hormigones clase C	73
Tabla 5.12. Dosificaciones de los morteros clase M	74

Tabla 5.13. Dosificaciones de los morteros clase ME74

Tablas del Capítulo 6:

Tabla 6.1. Frecuencias medias para cada a/c real y a/c efectivas estimadas con el huso.....81

Tabla 6.2. Capacidad máxima de absorción de los áridos.....81

Tabla 6.3.Relación a/c efectiva calculada con la ecuación 6.2 y $\alpha = 0,7775$ 82

Tabla 6.4.Relación a/c efectiva calculada con la ecuación 6.2 y $\alpha = 0,6432$ 83

Tablas del Capítulo 8:

Tabla 8.1. Resistencia estabilizada y energías de activación (B0, BH, C0 y CH).....129

Tabla 8.2. Resistencia estabilizada y energías de activación (C0 y CC)149

Tabla 8.3. Valores de los parámetros “k” y “A” (C0 y CC)154

Tabla 8.4. Resistencia estabilizada y energías de activación (C0, C0-1 y C0-2)157

Tabla 8.5. Parámetros “k” y “A” (C0, C0-1 y C0-2)162

Tabla 8.6. Resumen de datos de los hormigones estudiados164

Tabla 8.7. Valores de los coeficientes de la ecuación 8.2 obtenidos por optimización165

Tablas del Capítulo 9:

Tabla 9.1. Modelos de estimación de la resistencia a compresión más habituales187

Tabla 9.2. Configuración de nuevos modelos189

Tabla 9.3. Modelos de estimación de la resistencia a compresión propuestos190

Tabla 9.4. Error cuadrático medio de cada modelo después de optimización197

Tabla 9.5. Modelos de estimación con coeficientes calculados en optimización198

Tabla 9.6. Valores de los coeficientes k0 y k1 de la fórmula 9.1 (AC') después de optimización.....198

Tabla 9.7. Modelos de estimación con coeficientes calculados en optimización199

Tabla 9.8. Coeficientes k0 y k1 de la fórmula 9.1 según optimización.....199

Tabla 9.9. Indicadores de la efectividad y estabilidad de los modelos (grupo de entrenamiento)199

Tabla 9.10. Indicadores de la efectividad y estabilidad de los modelos (grupo de test)	200
Tabla 9.11. Restricciones aplicadas en la programación genética	201
Tabla 9.12. Resultado de las ramas de programación genética (M_{PG1})	201
Tabla 9.13. Comparativa de indicadores de modelos (total de datos).....	202
Tabla 9.14. Comparativa de indicadores de modelos (grupo de entrenamiento)	202
Tabla 9.15. Comparativa de indicadores de modelos (grupo de test)	203
Tabla 9.16. Penalizaciones adoptadas para cálculo de puntos de demérito.....	203
Tabla 9.17. Penalizaciones adoptadas en la PG etapa 2-a	204
Tabla 9.18. Resultado de las ramas de programación genética (M_{PG2})	204
Tabla 9.19. Comparativa de indicadores de modelos (total de datos M_{PG2})	205
Tabla 9.20. Comparativa de indicadores de modelos (grupo de entrenamiento M_{PG2})	205
Tabla 9.21. Comparativa de indicadores de modelos (grupo de test M_{PG2})	205
Tabla 9.22. Penalizaciones adoptadas en la PG etapa 2-b	206
Tabla 9.23. Resultado de las ramas de programación genética (M_{PG3})	207
Tabla 9.24. Comparativa de indicadores de modelos (total de datos M_{PG3})	208
Tabla 9.25. Comparativa de indicadores de modelos (grupo de entrenamiento M_{PG3})	208
Tabla 9.26. Comparativa de indicadores de modelos (grupo de test M_{PG3})	208

Tablas del Capítulo 11:

Tabla 11.1. Ejemplo de toma de datos	234
Tabla 11.2. Resultados de los ensayos de la caracterización complementaria del hormigón C0.....	237
Tabla 11.3. Cálculos para hallar la energía de activación.....	239
Tabla 11.4. Resistencia a compresión estimada para temperaturas bajas (MPa).....	239
Tabla 11.5. Datos tomados pieza prefabricada y resultados de estimación con ecuación 11.6	240
Tabla 11.6. Datos tomados pieza prefabricada y resultados de estimación con ecuación 11.7	241
Tabla 11.7. Datos tomados pieza prefabricada y resultados de estimación con ecuación 11.1	242

ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras del Capítulo 1:

Figura 1.1. Ventajas de la utilización de las cenizas de biomasa para la fabricación del hormigón	4
Figura 1.2. Ventajas de la utilización de áridos reciclados para la fabricación del hormigón	5

Figuras del Capítulo 2:

Figura 2.1. Influencia del tipo de árido	24
Figura 2.2. Comparación de correlaciones hechas con grava dura y grava blanda.....	26

Figuras del Capítulo 4:

Figura 4.1. Ensayo para medición de velocidad de ultrasonidos	45
Figura 4.2. Ensayo para medición de índice de rebote	45
Figura 4.3. Ensayo de conductividad eléctrica	46
Figura 4.4. Ensayo EMM-ARM para monitorización de módulo de deformación	47
Figura 4.5. Cementómetro con sonda	48
Figura 4.6. Registrador de temperatura interna y sensor	48
Figura 4.7. Amasada base durante el vibrado.....	50
Figura 4.8. Probeta instrumentada con sensor de temperatura interna	51
Figure 4.9. Curado de probetas de la amasada base	51
Figura 4.10. Amasada base + conductividad.....	52
Figura 4.11. Amasada para módulo de deformación	52
Figura 4.12. Ensayos de las probetas de mortero.....	54
Figura 4.13. Amasada de mortero para definición de a/c efectiva	55

Figuras del Capítulo 5:

Figura 5.1. Acopios utilizados para fabricar el árido reciclado ARH1	59
Figura 5.2. Fotografías de los áridos utilizados en los hormigones B.....	59
Figura 5.3. Granulometría de áridos utilizados en los hormigones B.....	60
Figura 5.4. Composición del árido reciclado utilizado en los hormigones B	61
Figura 5.5 Curvas de granulometrías conjuntas de hormigones B.....	63
Figura 5.6. Fotografía de acopio de traviesas de hormigón.....	63
Figura 5.7. Fotografías de los áridos utilizados en los hormigones C.....	64
Figura 5.8. Granulometría de los áridos utilizados en los hormigones clase C	64
Figura 5.9. Granulometría de las cenizas de biomasa	67
Figura 5.10. Cenizas de biomasa.....	68
Figura 5.11. Ensayo de pasta de cenizas de biomasa.....	71
Figura 5.12. Evolución de la resistencia a penetración de la pasta de cenizas de biomasa en función de la temperatura de curado	72
Figura 5.13. Curvas de granulometrías conjuntas de hormigones C.....	73

Figuras del Capítulo 6:

Figura 6.1. Huso de ratio a/c efectivo en función de la frecuencia.....	79
Figura 6.2. Relación a/c real frente a cota mínima del a/c efectiva	80
Figura 6.3. Relación a/c real frente a cota máxima del a/c efectiva	80

Figuras del Capítulo 7:

Figura 7.1. Evolución de la resistencia a compresión (B0 y BH).....	88
Figura 7.2. Evolución de la resistencia a compresión (C0 y CH).....	89
Figura 7.3. Evolución de la resistencia a compresión (CC)	89
Figura 7.4. Comparativa de la resistencia a compresión (B0 y BH)	90

Figura 7.5. Comparativa de la resistencia a compresión (C0 y CH)	90
Figura 7.6. Comparativa de la resistencia a compresión (C0 y CC)	91
Figura 7.7. Comparación de la evolución de la resistencia a compresión (B0 y BH)	92
Figura 7.8. Comparación de la evolución de la resistencia a compresión (C0 y CH)	92
Figura 7.9. Comparación de la diferencia de resistencia a compresión (B0 y BH)	93
Figura 7.10. Comparación de la diferencia de resistencia a compresión (C0 y CH)	93
Figura 7.11. Comparación de la evolución de la resistencia a compresión (C0 y CC)	95
Figura 7.12. Comparación de la diferencia de resistencia a compresión (C0 y CC).....	95
Figura 7.13. Comparación de la diferencia de resistencia a compresión (B0, BH, C0, CH y CC).....	96
Figura 7.14. Resistencia a compresión a 90 días en función de la temperatura (C0 y CC).....	97
Figura 7.15. Comparación de la evolución de la resistencia a compresión (C0, C0-1 y C0-2)	98
Figura 7.16. Resistencia a compresión en función de la velocidad de ultrasonidos (B0 y BH).....	99
Figura 7.17. Resistencia a compresión en función de la velocidad de ultrasonidos (C0 y CH).....	99
Figura 7.18. Resistencia a compresión en función del índice de rebote (B0 y BH)	100
Figura 7.19. Resistencia a compresión en función del índice de rebote (C0 y CH)	101
Figura 7.20. Evolución de la conductividad eléctrica (C0 y CH)	101
Figura 7.21. Conductividad eléctrica en función del porcentaje de árido reciclado (C0 y CH).....	102
Figura 7.22. Temperatura interna (C0 y CH)	102
Figura 7.23. Resistencia a compresión en función de la conductividad eléctrica (C0 y CH).....	103
Figura 7.24. Resistencia a compresión en función de velocidad de ultrasonidos (C0 y CC).....	104
Figura 7.25. Resistencia a compresión en función del índice de rebote (C0 y CC).....	105
Figura 7.26. Evolución de la conductividad eléctrica (C0 y CC).....	105
Figura 7.27. Conductividad eléctrica en función del porcentaje de cenizas (C0 y CC)	106
Figura 7.28. Temperatura interna (C0 y CC)	106
Figura 7.29. Resistencia a compresión en función de la conductividad eléctrica (C0 y CC)	107
Figura 7.30. Resistencia a compresión en función de la velocidad de ultrasonidos (B0 y BH).....	108

Figura 7.31. Resistencia a compresión en función de la velocidad de ultrasonidos (C0 y CH).....	109
Figura 7.32. Resistencia a compresión en función de la velocidad de ultrasonidos (CC).....	110
Figura 7.33. Evolución de la temperatura interna de dos probetas de distinto tamaño	111
Figura 7.34. Resistencia a compresión frente a índice de rebote (B0 y BH)	112
Figura 7.35. Resistencia a compresión frente a índice de rebote (C0 y CH)	113
Figura 7.36. Resistencia a compresión frente a índice de rebote (CC)	114
Figura 7.37. Comparación de resistencia a compresión vs. velocidad de ultrasonidos (B0 y BH).....	115
Figura 7.38. Comparación de resistencia a compresión vs. velocidad de ultrasonidos (C0 y CH).....	115
Figura 7.39. Comparación de resistencia a compresión vs. índice de rebote (B0 y BH)	116
Figura 7.40. Comparación de resistencia a compresión vs. índice de rebote (C0 y CH)	116
Figura 7.41. Comparación de resistencia a compresión vs. velocidad de ultrasonidos (C0 y CC).....	117
Figura 7.42. Comparación de resistencia a compresión vs. índice de rebote (C0 y CC).....	118
Figura 7.43. Comparación de resistencia a compresión vs. UPV (C0, C0-1 y C0-2).....	118
Figura 7.44. Comparación de la resistencia a compresión vs. índice de rebote (C0, C0-1 y C0-2).....	119

Figuras del Capítulo 8:

Figura 8.1. Energía de activación en función del porcentaje de árido reciclado.....	125
Figura 8.2. Inversa de la temperatura frente a Ln(K) para hormigón B0	126
Figura 8.3. Inversa de la temperatura frente a Ln(K) para hormigón BH20	126
Figura 8.4. Inversa de la temperatura frente a Ln(K) para hormigón BH50	127
Figura 8.5. Inversa de la temperatura frente a Ln(K) para hormigón C0	127
Figura 8.6. Inversa de la temperatura frente a Ln(K) para hormigón CH8	127
Figura 8.7. Inversa de la temperatura frente a Ln(K) para hormigón CH20	128
Figura 8.8. Inversa de la temperatura frente a Ln(K) para hormigón CH31	128
Figura 8.9. Temperaturas internas desarrolladas en probeta cúbica de 10 cm (B0 y BH)	130
Figura 8.10. Temperaturas internas desarrolladas en probeta cúbica de 10 cm (C0 y CH)	131

Figura 8.11. Ratio S/S_{∞} vs. FTT para cada temperatura (B0 y BH)	132
Figura 8.12. Ratio S/S_{∞} vs. FTT para cada temperatura (C0 y CH)	133
Figura 8.13. Ratio S/S_{∞} vs. t_e para cada temperatura (B0 y BH)	134
Figura 8.14. Ratio S/S_{∞} vs. t_e para cada temperatura (C0 y CH)	135
Figura 8.15. Ratio S/S_{∞} vs. FTT (B0 y BH)	136
Figura 8.16. Ratio S/S_{∞} vs. FTT (C0 y CH)	136
Figura 8.17. Ratio S/S_{∞} vs. t_e (B0 y BH)	136
Figura 8.18. Ratio S/S_{∞} vs. t_e (C0 y CH)	137
Figura 8.19. Resistencia real vs. resistencia estimada con función exponencial y $M=FTT$ (B0 y BH)....	139
Figura 8.20. Resistencia real vs. resistencia estimada con función exponencial y $M=FTT$ (C0 y CH)....	140
Figura 8.21. Resistencia real vs. resistencia estimada con función hiperbólica y $M=FTT$ (B0 y BH)	141
Figura 8.22. Resistencia real vs. resistencia estimada con función hiperbólica y $M=FTT$ (C0 y CH)	142
Figura 8.23. Resistencia real vs. resistencia estimada con función exponencial y $M=t_e \cdot T_r$ (B0 y BH) ...	143
Figura 8.24. Resistencia real vs. resistencia estimada con función exponencial y $M= t_e \cdot T_r$ (C0 y CH) ..	144
Figura 8.25. Resistencia real vs. resistencia estimada con función hiperbólica y $M= t_e \cdot T_r$ (B0 y BH)	145
Figura 8.26. Resistencia real vs. resistencia estimada con función hiperbólica y $M= t_e \cdot T_r$ (C0 y CH)	146
Figura 8.27. Resistencia real frente a resistencia estimada (k y A de B0)	147
Figura 8.28. Resistencia real frente a resistencia estimada (k y A de C0)	148
Figura 8.29. Energía de activación en función del porcentaje de cenizas de biomasa	149
Figura 8.30. Inversa de la temperatura frente a $\ln(K)$ para hormigón CC15	150
Figura 8.31. Inversa de la temperatura frente a $\ln(K)$ para hormigón CC30	150
Figura 8.32. Energía de activación por tramos de temperatura	151
Figura 8.33. Temperaturas internas desarrolladas en probetas cúbica de 10 cm (C0 y CC)	152
Figura 8.34. Ratio S/S_{∞} vs. FTT (C0 y CC)	153
Figura 8.35. Ratio S/S_{∞} vs. t_e (C0 y CC).....	154
Figura 8.36. Resistencia real frente a resistencia estimada con ecuación exponencial (C0 y CC).....	155

Figura 8.37. Resistencia real frente a resistencia estimada con ecuación hiperbólica (C0 y CC)	155
Figura 8.38. Energía de activación en función del ratio agua / cemento	156
Figura 8.39. Inversa de la temperatura frente a Ln(K) para hormigón C0-1	157
Figura 8.40. Inversa de la temperatura frente a Ln(K) para hormigón C0-2	157
Figura 8.41. Temperaturas internas desarrolladas en probeta cúbica de 10 cm (C0, C0-1 y C0-2)	159
Figura 8.42. Ratio S/S_{∞} vs. FTT (C0, C0-1, C0-2)	160
Figura 8.43. Ratio S/S_{∞} vs. t_e (C0, C0-1 y C0-2)	161
Figura 8.44. Resistencia real vs. resistencia estimada con ec. Exponencial (C0, C0-1, C0-2)	162
Figura 8.45. Resistencia real vs. resistencia estimada con ecuación hiperbólica (C0, C0-1 y C0-2)	162
Figura 8.46. Influencia del ratio agua/cemento en los parámetros “k” y “A”	163
Figura 8.47. Energía de activación calculada según ASTM frente a la estimada	165
Figura 8.48. Esquema de colocación de sensores en muro	166
Figura 8.49. Probetas curadas en el mismo ambiente que el muro	167
Figura 8.50. Historial de temperaturas durante el fraguado (Muros BH20)	167
Figura 8.51. Estimación de la evolución de la resistencia a compresión en muro BH20	168
Figura 8.52. Viga de sección rectangular instrumentada con sensor de temperatura interna	168
Figura 8.53. Evolución de la temperatura a edades tempranas en vigas de sección rectangular	169
Figura 8.54. Evolución de la resistencia a compresión en vigas y p. cúbicas (B0, BH20 y BH50)	170
Figura 8.55. Sección de viga doble T	171
Figura 8.56. Sensores de temperatura interna y externa	171
Figura 8.57. Esquemas de colocación de sensores en vigas con C0	172
Figura 8.58. Esquemas de colocación de sensores en vigas con CH8	172
Figura 8.59. Historial de temperaturas en vigas con C0	173
Figura 8.60. Historial de temperaturas en vigas con CH8	173
Figura 8.61. Evolución de la resistencia a compresión en vigas con C0	174
Figura 8.62. Evolución de la resistencia a compresión en vigas con CH8	175

Figura 8.63. Resistencia a compresión en distintos ambientes y deferentes amasadas (C0)	176
Figura 8.64. Resistencia a compresión en distintos ambientes y deferentes amasadas (CH8)	176
Figura 8.65. Comparativa de evolución de la resistencia en vigas con C0 y CH8	177
Figura 8.66. Evolución de la resistencia a compresión en función de la temperatura de curado.....	179
Figura 8.67. Resistencia a compresión a 28 días en función del % de árido reciclado para cada T ^a	180
Figura 8.68. Energía de activación en función del porcentaje de árido reciclado.....	181

Figuras del Capítulo 9:

Figura 9.1. Leyenda de las gráficas de resistencia estimada vs. resistencia real.....	191
Figura 9.2. Resistencia real vs. resistencia estimada con los modelos de referencia M _{R0} a M _{R3}	192
Figura 9.3. Resistencia real vs. resistencia estimada con los modelos de referencia M _{R4} a M _{R7}	193
Figura 9.4. Resistencia real vs. resistencia estimada con los modelos propuestos M _{N1} y M _{N2}	194
Figura 9.5. Resistencia real vs. resistencia estimada con los modelos propuestos M _{N3} a M _{N6}	195
Figura 9.6. Resistencia real vs. resistencia estimada con los modelos propuestos M _{N7} a M _{N10}	196
Figura 9.7. Regresiones de los modelos M _{N10} y M _{PG1}	202
Figura 9.8. Regresiones de los modelo M _{PG2}	206
Figura 9.9. Regresiones de los modelo M _{PG3}	207

Figuras del Capítulo 10:

Figura 10.1. Evolución del módulo de deformación (C0 y CC)	214
Figura 10.2. Diferencia de módulo de deformación respecto al de C0 y T ^a interna (CC).....	215
Figura 10.3. Módulo de deformación vs. (UPV) ² para cada hormigón (C0 y CC).....	216
Figura 10.4. Módulo de deformación vs. (UPV) ² conjunta (C0 y CC).....	216
Figura 10.5. Módulo de deformación vs. índice de rebote (C0 y CC).....	217
Figura 10.6. Módulo de deformación vs. resistividad (C0 y CC).....	218
Figura 10.7. Módulo de deformación vs. conductividad (C0 y CC).....	218

Figura 10.8. Evolución del módulo de deformación (C0 y CH).....	219
Figura 10.9. Diferencia de módulo de deformación respecto al de C0 y T ^a interna (CH)	219
Figura 10.10. Módulo de deformación vs. (UPV) ² (C0 y CH)	220
Figura 10.11. Módulo de deformación vs. índice de rebote (C0 y CH))	220
Figura 10.12. Módulo de deformación y conductividad (C0 y CH).....	221
Figura 10.13. Evolución del módulo de deformación según temperatura de curado (C0 y CH8)	222
Figura 10.14. Evolución del módulo relativo frente edad equivalente	222
Figura 10.15. Módulo de deformación vs. resistencia a compresión (C0 y CC)	223
Figura 10.16. Módulo de deformación vs. raíz cúbica de la resistencia a compresión (C0 y CC).....	224
Figura 10.17. Módulo de deformación vs. resistencia a compresión (C0 y CH).....	225
Figura 10.18. Módulo de deformación vs. resistencia para cada hormigón (C0 y CH)	226

Figuras del Capítulo 11:

Figura 11.1. Comparación de la evolución de la resistencia estimada de pieza y real en probetas.....	242
Figura 11.2. Comparación de la resistencia estimada de pieza y real en probetas (M _{PG3}).....	243

Capítulo 1. Introducción y objetivos generales

Capítulo 1: Introducción y objetivos generales

1.1. Antecedentes y motivación

En las últimas décadas se ha desarrollado una mayor concienciación sobre la necesidad de proteger el medio ambiente: la reducción de emisiones de CO₂, la gestión eficiente de los residuos y la reducción del uso de recursos naturales son algunos de los caminos que nos acercan a la sostenibilidad del sistema.

A finales de 2015, en París, se celebró la Conferencia sobre el Cambio Climático, en la que 195 países firmaron el primer gran acuerdo multilateral del siglo XXI, con el que se pretende mantener el calentamiento global en niveles inferiores a 2°C (tomando como referencia los niveles de la época preindustrial).

Por otra parte, en diciembre de 2015 la Unión Europea establece una nueva estrategia sobre la economía circular, en la que los residuos se utilicen de forma más inteligente. Mejoras en el eco-diseño, la prevención y la reutilización de residuos podrían traducirse en ahorros netos para las empresas de la UE de hasta 600.000 millones de euros al año [COMI16].

Ya en 2014, la Unión Europea había adoptado una serie de propuestas para reducir el impacto ambiental de los edificios a lo largo de su ciclo de vida, que se centra, en parte, en la gestión de residuos y en la construcción sostenible. Estas propuestas se basan en la “hoja de ruta hacia una Europa eficiente en el uso de recursos” [COMI11], de septiembre de 2011, en el que se aboga por mejorar la gestión de residuos, lo que permitirá utilizar mejor los recursos, crear nuevos mercados y promover una menor dependencia de las importaciones de materias primas y un menor impacto sobre el medio ambiente. Apunta a que solo se reciclan el 40% de los residuos sólidos de la Unión Europea (en promedio). Esta hoja de ruta, marca como objetivo para el 2020 que los residuos se gestionen como recursos y que el reciclado y la reutilización de los residuos sean opciones económicamente atractivas. Además, apunta que políticas económicas incentivadoras, junto con los avances científicos en materia de innovación mejorarán la forma de gestionar, reutilizar, reciclar y valorizar los residuos.

Por todo ello, desarrollar estudios sobre posibles usos de los residuos, de forma que puedan llegar a convertirse en subproductos, es de vital importancia, tanto desde el punto de vista medioambiental como desde el punto de vista de la economía circular del futuro.

Una rama de este tipo de estudios es el de la valorización de residuos, utilizándolos como componentes de la fabricación de hormigón. En esta investigación se utilizarán dos residuos: cenizas de biomasa procedentes de la industria del papel (como sustitutivo parcial del cemento) y áridos reciclados finos y gruesos de hormigón de forma conjunta (como sustitución parcial del árido natural).

Cada año, la industria papelera genera grandes cantidades de cenizas de biomasa. Darle a este residuo un uso es de vital importancia desde el punto de vista medioambiental y económico.

Desde el punto de vista de la sostenibilidad tiene una doble ventaja (figura 1.1): por una parte un residuo (cenizas de biomasa) se convierte en subproducto según la directiva 2008/98/CE [RN 08] de la Unión Europea y, por otra, se reduce la cantidad de cemento empleado y por lo tanto, la contaminación que produciría la fabricación de dicho cemento. Debido a que se carece de un conocimiento amplio de los efectos de esta sustitución, normativas actuales, tales como la ASTM C618-08 [RN 02] y la UNE-EN 450-1 [EN 04], no permiten el uso de cenizas de biomasa para la fabricación de hormigón.

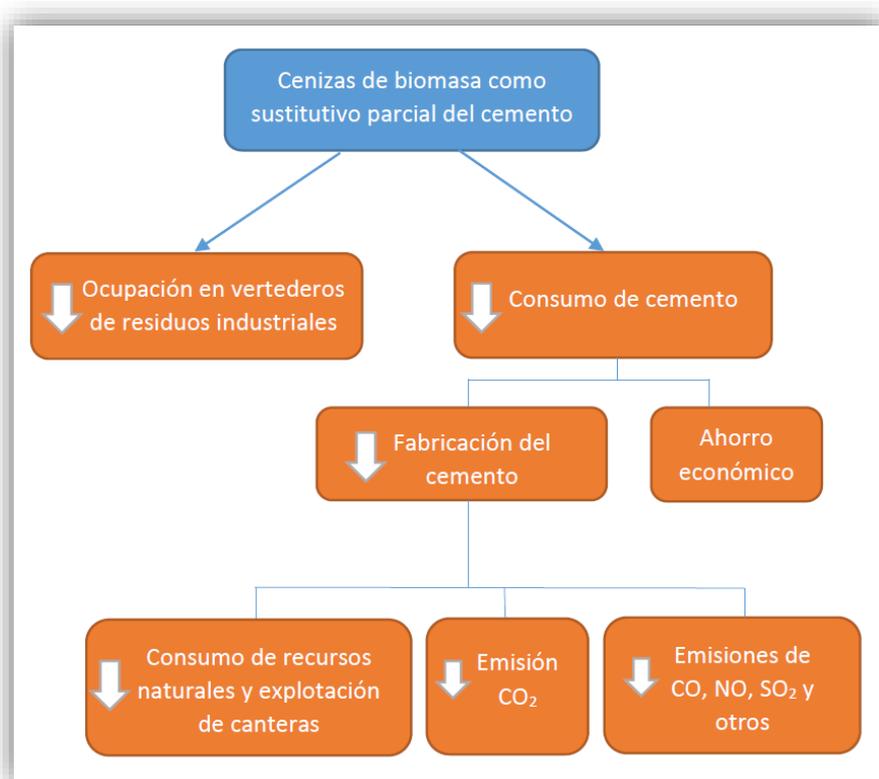


Figura 1.1. Ventajas de la utilización de las cenizas de biomasa para la fabricación del hormigón

El uso de árido reciclado como sustitución del árido natural, para la fabricación de hormigones y morteros, tiene una doble ventaja desde el punto de vista ambiental; por una parte se reduce la ocupación de los vertederos gracias a la reutilización de parte de los RCD que se procesan y se convierten en áridos reciclados. Por otra parte, la sustitución de áridos naturales por estos áridos reciclados, produce una disminución del uso de árido natural y con ello, una menor explotación de las canteras.

Cuando se trata de RCDs que proceden de piezas o de estructuras de hormigón, se puede producir árido reciclado de hormigón que, debido a su procedencia, tienen una mayor homogeneidad que otros áridos reciclados (áridos reciclados mixtos). Tal y como refleja el esquema de la figura 1.2, la utilización del árido reciclado total (fino y grueso) resultante del triturado de piezas y estructuras de hormigón tiene a su vez una doble ventaja con respecto a la utilización de sus fracciones fina y gruesa por separado: en primer lugar, se produce un ahorro económico y energético al suprimirse los procedimientos de tamizado para la separación de las fracciones. En segundo lugar, se utiliza el 100% del material reciclado resultante, por lo que no se genera otro residuo derivado de este proceso.

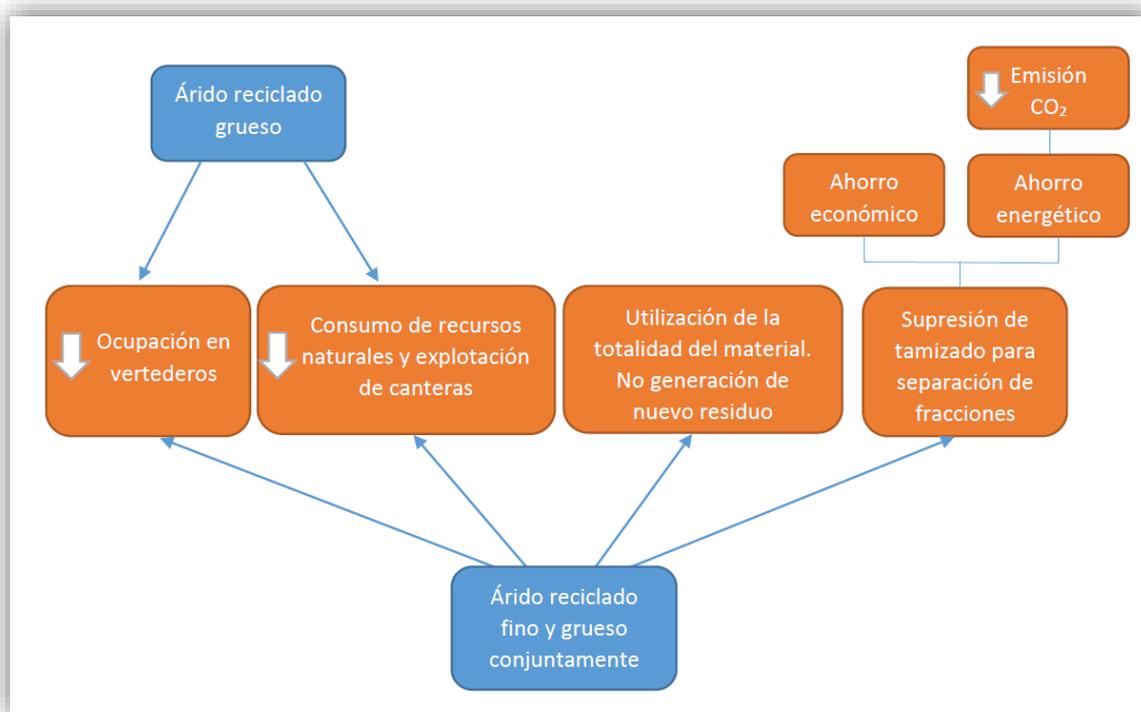


Figura 1.2. Ventajas de la utilización de áridos reciclados para la fabricación del hormigón

Si bien estas ventajas son importantes, también es necesario tener en cuenta qué inconvenientes acarrea la utilización de todo el árido reciclado resultante sin separación de fracciones: el árido reciclado fino como sustituto de la arena para la fabricación de hormigones estructurales no se contempla en algunas normas y recomendaciones, tales como el anejo 15 de las recomendaciones para la utilización de árido reciclado de hormigón en la fabricación de hormigón estructural de la normativa española EHE-08 [RN 09], donde se recomienda para la fabricación de hormigón estructural limitar el uso de árido reciclado a un 20% el porcentaje de sustitución de árido reciclado grueso y no se contempla el uso de árido reciclado fino. Así mismo, las normativas de otros países tales como la normativa inglesa BS 8500-2 [RN 06], la alemana DIN 4226-1 [RN 07], la portuguesa LNEC E 471 [RN 11] o la italiana NTC-2008 [RN 12], limitan la utilización de los áridos reciclados a la fracción gruesa y no permiten la utilización de la fracción fina. Además, existen muchos más estudios que tratan la influencia de los áridos reciclados gruesos y finos por separado, por lo que el conocimiento de la influencia de la utilización de las dos fracciones en conjunto es menor. Y, por último, es necesario comprobar que las sustituciones con las fracciones de forma conjunta dan como resultado una curva granulométrica conjunta que se adapte al del hormigón de referencia.

En resumen, para la fabricación de hormigón estructural, las normativas no permiten el uso de áridos reciclados finos y gruesos de hormigón de forma conjunta, ni el uso de cenizas de biomasa; pese a que su uso supondría grandes ventajas para el medio ambiente y la economía a largo plazo. Si se produjese algún problema debido a la incorporación de residuos en la fabricación del hormigón podría suponer un gran retroceso en el ámbito de la normalización del uso de eco-hormigones con materiales reciclados. Por ello, para conseguir que la normativa avance y permita el uso de estos residuos como subproductos, es necesario que tener un mayor

conocimiento sobre la influencia de la utilización de estos materiales en las propiedades del hormigón: tanto a edades tempranas como a largo plazo.

El conocimiento de la evolución de las propiedades mecánicas del hormigón a edades tempranas es de vital importancia en la fase de construcción ya que conocer la resistencia que ha adquirido un hormigón en el momento de descimbrar, desmoldar, transferir el pretensado o poner en carga puede mejorar la seguridad durante la obra, disminuir la cantidad de rechazos y prevenir problemas que surgen en las estructuras en la fase de construcción o fabricación. Por ello, conocer la influencia de los materiales reciclados en la evolución de las propiedades mecánicas puede ser un factor que contribuya al avance de la normativa hacia una construcción más sostenible y segura.

Muchos ensayos no destructivos son utilizados para la estimación de la resistencia a compresión y el módulo de deformación; por ejemplo, la velocidad de ultrasonidos, el índice de rebote o el método de la madurez. Estos ensayos permiten la estimación de, por ejemplo, la resistencia a compresión, disminuyendo la cantidad de testigos; si bien cabe destacar que para cada hormigón, es preciso calibrar la curva de correlación, ya en que estas correlaciones influyen gran cantidad de factores (temperatura de curado, relación agua/cemento, etc.), que pueden modificarla. Si se pudiese observar y cuantificar cuanto influye cada uno de estos factores, se podría llegar a obtener una formulación de estimación de la resistencia a compresión en función de estos factores y los resultados de los ensayos no destructivos. En el caso de los ecohormigones con materiales reciclados conocer la influencia de los materiales reciclados en las correlaciones de los ensayos no destructivos y propiedades mecánicas del hormigón, además de las ventajas generales que tiene para todos los hormigones, conlleva un incremento en el conocimiento sobre la influencia de los materiales reciclados y en su control; por tanto, es interesante a la hora de desarrollar una investigación sobre este tema.

1.2. Objetivos generales

El objetivo general de esta tesis es obtener un mayor conocimiento sobre la influencia de la utilización de los áridos reciclados finos y gruesos utilizados de forma conjunta y de las cenizas de biomasa, en las propiedades del hormigón y en las correlaciones de las mismas con los resultados de distintos ensayos no destructivos. Todo ello con el fin de contribuir al avance de las normativas hacia una regulación más sostenible y permisiva, sin que esto suponga un riesgo estructural.

Así mismo se pretende avanzar en la mejora de los modelos de estimación de la resistencia a compresión mediante combinación de ensayos no destructivos, estudiando la influencia de diversos factores en las correlaciones y proponiendo nuevos modelos que tengan en cuenta dichas influencias.

1.3. Organización de la tesis doctoral

Esta tesis se compone de un total de 12 capítulos.

En el presente **Capítulo 1** se hace una introducción a la temática de la tesis, centrándose en los antecedentes que motivaron el inicio de la misma, la presentación de sus objetivos generales y su organización.

En el **Capítulo 2** se hace una revisión del estado del arte de los temas principales de la tesis. Una parte se centra en los estudios sobre en los que se utiliza áridos reciclados finos y gruesos de forma conjunta o cenizas de biomasa como adición, en la fabricación del hormigón y su influencia en las propiedades mecánicas del mismo. La otra parte se centra en el estado del conocimiento de la aplicación de ensayos no destructivos para la estimación de las propiedades mecánicas y en la influencia de diversos factores en su correlación.

En el **Capítulo 3** se exponen los objetivos específicos de la presente tesis, que suponen un avance en el estado del conocimiento.

El **Capítulo 4** expone la metodología utilizada para la concepción y desarrollo de la tesis. Incluye también la nomenclatura utilizada para designar los hormigones de estudio y la descripción de los principales métodos, procedimientos específicos y equipamiento utilizado.

El **Capítulo 5** contiene la caracterización de los materiales utilizados en las distintas campañas experimentales que se han desarrollado en la presente investigación. Incluye además, un estudio específico (no normativo) para la caracterización del poder cementante de las cenizas de biomasa empleadas en función de la temperatura de curado.

En el **Capítulo 6** se desarrolla un estudio para la determinación de una definición empírica de la relación agua/cemento efectiva, utilizando la relación entre el agua que reacciona con el cemento y las frecuencias de microondas. La motivación de este estudio radica en que, para determinar la influencia de los áridos reciclados en la resistencia a compresión, es necesario que los hormigones comparados tengan la misma relación agua/cemento efectiva, ya que, en caso contrario, ésta afectaría a los resultados de resistencia a compresión y sería muy difícil saber si las variaciones de resistencia se deben a la variación del tipo de árido o a la variación de la relación agua/cemento efectiva.

En el **Capítulo 7** se desarrolla un análisis de la influencia de diversos factores en la evolución de la resistencia a compresión y en sus correlaciones con ensayos no destructivos. Se estudia la influencia de la temperatura de curado en cada uno de los 11 hormigones estudiados, por separado, de los áridos reciclados, de las cenizas de biomasa, así como la influencia de los mismos en función de la temperatura de curado. También se observa la influencia de la relación agua/cemento en función de la temperatura de curado.

En el **Capítulo 8** se analiza la influencia de los materiales reciclados en la madurez del hormigón y en su energía de activación. Se analiza la aplicabilidad de modelos de estimación de la resistencia habituales, así como las hipótesis sobre sus constantes. Se comparan los resultados obtenidos con dos modelos habituales, con dos variantes en cada uno, dependiente de la forma de definir la edad equivalente. Además, se aplica el método de la madurez a tres casos reales y se comparan los resultados.

En el **Capítulo 9**, basándose en los capítulos anteriores, se propone una serie de nuevos modelos de estimación de la resistencia a compresión utilizando métodos combinados de

ensayos no destructivos. Estos nuevos modelos incluyen factores que no se incluyen en otros modelos de referencia. Los nuevos modelos propuestos, pretenden dar una mejor estimación tanto a edades tempranas como a largo plazo, teniendo en cuenta la temperatura de curado, la densidad y la dosificación del hormigón. Se hace una comparativa de los resultados con los distintos modelos. Además, se desarrollan nuevos modelos aplicando Programación Genética, cuyas estimaciones están en su mayoría del lado de la seguridad debido a la programación orientada con clasificación de puntos de demérito adaptada para mayor mejora de la seguridad estructural.

En el **Capítulo 10** se estudia la influencia de los materiales reciclados en la evolución del módulo de deformación a edades tempranas. Para ello se utiliza un método experimental que permite monitorizar de forma continua la evolución del módulo de deformación. Se estudia además la influencia de temperaturas elevadas (40 °C) en dicha evolución. En este capítulo, además, se estudia la correlación entre el módulo de deformación y varios ensayos no destructivos, y la influencia de los eco-materiales en dicha correlación. Además, se analiza la relación existente entre el módulo de deformación y la resistencia a compresión, así como la influencia de los eco-materiales en dicha correlación.

En el **Capítulo 11**, se expone una propuesta de nuevo procedimiento para la mejora del control de calidad de grandes obras o de fábricas de prefabricados, teniendo en cuenta todo lo desarrollado en la tesis. En primer lugar se analizan las posibles ventajas a corto plazo y a largo plazo y la utilidad de desarrollar una caracterización complementaria de los hormigones con ensayos no destructivos y teniendo en cuenta la temperatura de curado. Se describen los equipos necesarios, los ensayos en laboratorio para la caracterización complementaria del hormigón así como indicaciones para obra y fábrica así como ejemplos de la utilidad de este procedimiento, adaptando el mismo, en función de los datos que se tengan previamente.

En el **Capítulo 12** se recogen las conclusiones extraídas de todos los trabajos descritos en los capítulos anteriores y se exponen las futuras líneas de investigación.

Capítulo 2. Estado del arte

Capítulo 2. Estado del arte

2.1. El material: Eco-hormigón. Estudio de propiedades mecánicas a edades tempranas.

2.1.1. Eco-hormigones con áridos reciclados de hormigón finos y gruesos, procedentes de RCD y eco-morteros con árido reciclado fino

Como ya se ha explicado en los antecedentes del capítulo anterior, el uso de árido reciclado fino y grueso de hormigón para la fabricación de hormigones y morteros, tiene grandes ventajas desde el punto de vista ambiental: por una parte se reduce la ocupación de residuos en vertederos, se disminuye el uso de árido natural y con ello, una menor explotación de las canteras. Además, con el uso conjunto de las fracciones finas y gruesas, con respecto al uso de árido reciclado grueso de hormigón, se produce un ahorro económico y energético al suprimirse los procedimientos de tamizado para la separación de las fracciones y se utiliza el 100% del material reciclado resultante.

- **Influencia en la resistencia a compresión y en el módulo de deformación**

Existen infinidad de estudios sobre la influencia de los áridos reciclados gruesos de hormigón en las propiedades mecánicas y físicas del hormigón [ACHE06, BUST10, ALAE11, ETXE07] y es sabido que influye en las propiedades del hormigón disminuyendo la densidad, la resistencia a compresión y el módulo de deformación, si bien en algunas normativas, como la EHE-08, se considera que para sustituciones menores del 20% del árido grueso, las propiedades apenas se ven afectadas.

Los estudios sobre la influencia del árido reciclado fino en las propiedades físicas y mecánicas del hormigón son más escasos, pero ya existe un cierto conocimiento de la influencia de su uso [KHAT05, EVAN07, PERE12a, PERE12b, EVAN10, YAPR11, KIM11, CHAN06, EVAN14, JANG15, CARR15]. En estos estudios se concluye que para bajos porcentajes de sustitución de árido reciclado fino (igual o menor de 25%) la disminución es pequeña o, en ocasiones, incluso se produce un aumento de la resistencia a compresión. Pese a ello, existe algún caso en que la disminución es ya considerable con una sustitución del 25%, obteniendo reducciones del 24% de la resistencia a compresión [KHAT05]. Para porcentajes mayores del 25% todos los autores coinciden en que se produce una disminución considerable de la resistencia a compresión. En cuanto al módulo de deformación, se observa que las diferencias con el del hormigón de referencia son muy pequeñas en el caso de una sustitución del 30%, pero ya son considerables (disminuciones cercanas al 20%) con una sustitución total del árido fino natural por árido reciclado fino.

Existen algunos estudios sobre la influencia de los áridos reciclados finos y gruesos de hormigón utilizados simultáneamente. Corinaldesi y Moriconi [CORI04], en 2004, desarrollaron un estudio sobre la influencia del árido reciclado fino y grueso, observando que con una sustitución total del árido fino y grueso por árido reciclado, se produce un descenso de la resistencia a compresión de entre el 24% y el

28%, que puede ser compensado con una reducción de agua y un aumento en la cantidad de aditivo. Ya en 2009, [CORI09] estudiaron la influencia del árido reciclado fino y grueso utilizado de forma simultánea como sustitución del árido natural y estudia hormigones con cenizas volantes de carbón o con humo de sílice. Concluyen que para el hormigón sin adiciones, el árido reciclado produce una disminución del 18% en la resistencia a compresión, en los hormigones con cenizas volantes la disminución es del 6% y en los hormigones con humo de sílice aumentó el 20%. En cuanto al módulo de deformación, a edad mayor de 28 días, en el hormigón con árido reciclado se observa una disminución de entre el 20% y el 30% del módulo del hormigón de referencia.

Kou y Poon[KOU09] estudian la influencia de los áridos reciclados finos y gruesos de hormigón utilizados de forma conjunta. Para ello prepara mezclas con un 100% de árido reciclado grueso y distintos porcentajes de árido reciclado fino (0, 25, 50, 75 y 100%). Los resultados muestran pequeñas diferencias entre los hormigones con árido reciclado fino y los hormigones con árido fino natural. Cada dosificación de serie I o serie II tiene dos variantes en función de la relación agua/cemento de 0,53 y 0,44. Con un ratio agua/cemento de 0,53 se alcanza la mayor resistencia a compresión con un 25% de sustitución de árido reciclado fino (excepto a 90 días, que es ligeramente inferior a la de referencia). Con una relación agua/cemento de 0,44 se observa que, para 1 y 4 días, la mayor resistencia se obtiene en el hormigón con un 50% de sustitución y a 7, 28 y 90 días, en el hormigón del 25% de sustitución de árido reciclado fino. Es decir, hasta 25% o incluso el 50% de sustitución de árido reciclado fino, la resistencia a compresión puede aumentar con respecto a las dosificaciones con árido natural fino.

Cabral et al [CABR10] estudian la influencia de los áridos reciclados finos y gruesos de forma conjunta y por separado, para hormigones con distintos ratios agua/cemento. Concluye que los áridos reciclados gruesos tienen una mayor incidencia que los áridos reciclados finos en las propiedades mecánicas del hormigón.

Khoshkenari et al. también desarrollan una investigación sobre la influencia del árido reciclado fino y grueso de hormigón en la resistencia a compresión [KHOS14] y concluyen que la sustitución total de áridos naturales por áridos reciclados suponen una gran disminución de la resistencia a compresión en los hormigones de alta resistencia.

Khafaga [KHAF14] compara la influencia de la sustitución de árido natural fino por árido reciclado fino (con sustituciones del 0, 25, 50 y 100%), con la influencia de la sustitución de árido natural grueso por árido reciclado grueso (con sustituciones del 0, 25, 50 y 100%) en la resistencia a compresión de hormigones autocompactantes. Observa que en ambos casos (árido reciclado fino o árido reciclado grueso), a 28 días, se produce una disminución de la resistencia a compresión debida a la sustitución de áridos naturales por áridos reciclados.

Lotfy et al. [LOTF15] hacen un estudio sobre la influencia de áridos reciclados finos y gruesos simultáneamente (con un 10% y un 20% de sustitución) y de los áridos reciclados gruesos (con un 10, 20 y 30% de sustitución). No encuentran disminuciones de la resistencia a compresión significativas.

Bravo et al. [BRAV15a, BRAV15b] publican dos estudios en los que se analiza la influencia de distintos áridos reciclados finos y gruesos procedentes de diversas zonas de Portugal, en las propiedades mecánicas y en la durabilidad del hormigón. Para ello, realiza sustituciones del 10, 25, 50 y 100% del árido natural fino por árido reciclado fino y también esos mismos porcentajes de sustitución, para el caso de los áridos gruesos. Se observa que la resistencia a compresión se ve disminuida ya sea por la incorporación de árido reciclado fino como por la incorporación de árido reciclado grueso y señala que la procedencia de los áridos y su tamaño son dos factores claves en la influencia que tienen los áridos

reciclados en la resistencia a compresión. En cuanto a la influencia de los áridos reciclados en el módulo de deformación, advierten que no se observan diferencias entre los hormigones con árido reciclado fino y con árido reciclado grueso, por lo que parece que el tamaño de los áridos reciclados no influye en el módulo de deformación. Tanto con un 100% de reemplazo de árido natural grueso por árido reciclado grueso, como para un 100% de sustitución del árido reciclado fino se observa grandes disminuciones del módulo de deformación, que pueden llegar a superar el 40%. La composición del material es un factor de vital importancia en la influencia que éste tiene en el módulo; el módulo disminuirá más cuando menor sea la densidad de partículas del material.

Gesoglu et al [GESO15a, GESO15b] desarrollan dos estudios sobre la influencia de la sustitución de los áridos reciclados finos y gruesos de hormigón en las propiedades mecánicas de hormigones autocompactantes así como su influencia en la durabilidad. Los 16 hormigones estudiados se pueden agrupar en cuatro series en función de la cantidad de áridos reciclados. La serie I es la de referencia y no tiene áridos reciclados ni finos ni gruesos. La serie II tiene una sustitución del 100% del árido natural grueso por árido reciclado grueso. La serie III tiene una sustitución del 100% del árido natural fino por árido reciclado fino y, la serie IV tiene el 100% de los áridos reciclados, tanto finos como gruesos. Para cada una de las series se fabrican cuatro hormigones: con ratios agua/cemento de 0,30 y 0,43 y con dos porcentajes de adición de humo de sílice, 0% y 10%. Tomando como referencia los valores obtenidos para los hormigones de la serie I, las disminuciones de resistencia a compresión debidas a la sustitución de áridos naturales por áridos reciclados se sitúan entre un 11,8% y un 16,9% para la serie II, entre un 15,8% y un 26,9% para la serie III y entre un 27% y un 30,9% para la serie IV. En cuanto a la influencia en el módulo de deformación, se observa una reducción de entre un 13% y un 18% para la serie II, entre un 23% y un 25% para la serie III y, para la serie IV, entre un 28% y un 34%. Así mismo, se destaca que con un 10% de adición de humo de sílice, los resultados de modulo mejoran en todas las series.

En cuanto a la influencia del árido reciclado de hormigón en la relación entre resistencia a compresión y módulo de deformación, existen algunos estudios sobre estas correlaciones para hormigones con árido reciclado grueso, sobre todo, a 28 días de edad. Por ejemplo, Kakizaki et al. [KAKI88], Zilch y Roos [ZILCO1] y Katz [KATZ03] proponen en sus estudios una corrección de las fórmulas de correlación mediante la inclusión una nueva variable: la densidad. La densidad varía de forma proporcional a la cantidad de árido reciclado reemplazado, por ello, añadiendo el factor de la densidad, se está teniendo en cuenta la cantidad de árido reciclado.

Otros autores proponen la inclusión de dos factores: la densidad y el porcentaje de sustitución de árido reciclado grueso de hormigón [LI08]. Una reciente investigación aplica programación genética para hallar una ecuación que correlaciona el módulo de deformación y la resistencia a compresión en función del porcentaje de sustitución de árido reciclado grueso y el ratio agua/cemento [GONZ16] obteniendo muy buenos resultados para las estimaciones de las propiedades mecánicas del hormigón con árido reciclado grueso.

- **La cuestión del a/c efectiva en hormigones con árido reciclado.**

El término “relación agua/cemento efectiva” tiene una clara definición: “La cantidad total de agua que reacciona con el cemento, dividida entre la cantidad de cemento”. La complicación surge a la hora de definir “la cantidad de agua que reacciona con el cemento”. La presencia de los áridos, que absorben parte del agua, hace que parte del agua no pueda reaccionar con el cemento y por tanto, la relación a/c efectiva es menor que la relación a/c real.

En el caso de la utilización de áridos reciclados, esta disminución de la relación a/c efectiva es considerable, debido a la elevada absorción de los áridos reciclados y es necesario tenerla en cuenta. Si se quiere cuantificar la influencia de los áridos reciclados es necesario que la relación a/c efectiva sea la misma, ya que de lo contrario, la relación agua/cemento será una variable que influye en la resistencia.

Se observan discrepancias entre investigaciones a la hora de definir la cantidad de agua que absorben los áridos reciclados y que por lo tanto no está disponible para reaccionar con el cemento. Algunos autores recomiendan presaturar los áridos [CORRE06, SANC10, AGRE11, MAIO03, GONZ02] otros sumergirlos en agua durante 30 minutos [KHAL06] y otros durante 10 minutos [KHAL06, HANS92] para que no absorban más agua. Entre los autores que recomiendan añadir más agua durante el amasado de hormigón tampoco existe un consenso sobre la cantidad, así algunos indican que lo mejor es añadir el 100% de la capacidad de absorción [MART12], otros el 90% [FONS11, MEDI14], otros el 85% [MAS09], otros el 80% [MAS12] y otros el 70% [ALAE11].

2.1.2. Eco-hormigones y eco-morteros con cenizas de biomasa

Tal y como se ha señalado en el apartado de antecedente del capítulo 1, cada año, la industria papelera genera grandes cantidades de cenizas de biomasa. Darle a este residuo un uso es de vital importancia desde el punto de vista medioambiental y económico. Pero normativas actuales, tales como la ASTM C618-08 [RN 02] y la UNE-EN 450-1 [EN 04], no permiten el uso de cenizas de biomasa para la fabricación de hormigón, debido a que no existe suficiente conocimiento sobre los efectos que pueden tener en las propiedades de los hormigones.

Existen algunos estudios en los que se ha estudiado la influencia de las cenizas de biomasa en la resistencia a compresión de morteros, comparando los resultados de resistencia de morteros fabricados con distintos porcentajes de sustitución de cemento por cenizas de biomasa.

Rajamma et al. [RAJA09] utiliza una ceniza volante procedente de una central térmica y una ceniza volante de biomasa procedente de una planta de cogeneración. En cuanto a su análisis químico, ambas cenizas son similares a las de clase C de la norma UNE EN 450-1 [EN 04]. Fabricaron morteros con sustituciones del 10, 20 y 30%, obteniendo que la resistencia a flexión decrece con el porcentaje de sustitución y la resistencia a compresión crece hasta el 10% y luego decrece. Concluye que puede sustituirse hasta un 20% de cemento por cenizas pero que la resistencia será un 75% de la de referencia. También indica que los niveles de cloruros o sulfatos pueden ser significativos por lo que sugiere que sean eliminados.

García et al. [GARC13] desarrollan un estudio sobre la influencia de las cenizas de fondo de madera en ciertas propiedades de los morteros. Para ello, estudian tres dosificaciones de mortero: una dosificación de referencia sin cenizas, una con un 5% de sustitución de cemento por cenizas de biomasa y otra con un 10% de sustitución. Se observa que la resistencia a compresión disminuye con el porcentaje de sustitución de cenizas a 28 días, pero a 90 días, se produce el efecto inverso, es decir, los morteros con cenizas muestran una mayor resistencia que el convencional. No han observado diferencias en la resistencia a flexión, ni en la densidad, ni en la capacidad de absorción. Sí observan una permeabilidad a los cloruros un poco superior para los morteros con cenizas, lo que indica que, con mucha probabilidad, los morteros con cenizas presenten una menor durabilidad.

Ramos et al. [RAMO13] utilizan unas cenizas de residuos de madera que cumplen las condiciones de la UNE-EN 450-1 [EN 04] para fabricar morteros con sustituciones de cemento por cenizas del 10 y 20%.

Los resultados que obtienen son que las resistencias a flexión y a compresión a 7, 28 y 90 días para los tres morteros son similares, que la profundidad de carbonatación fue mayor en los morteros con cenizas que en el que no tenía cenizas y que la expansión álcali-sílice se redujo un 18% para el mortero con 10% de cenizas y un 60% para el mortero con un 20% de cenizas. Debido a lo anterior la conclusión final es que la utilización de cenizas de madera como sustitución parcial del cemento puzolánico es prometedora.

En la investigación desarrollada por Tkaczewska et al. [TKAC12] se estudia el comportamiento de 6 cenizas volantes de co-combustión de carbón y biomasa como adición. Para ello hacen 6 morteros con un 75% de cemento y un 25 % de cada uno de las cenizas anteriores, un mortero de referencia y otro con cenizas comerciales y la misma sustitución que antes. De los resultados obtenidos concluyen que a 28 días todas las cenizas de carbón-biomasa retrasan la hidratación del cemento y disminuyen la resistencia del mortero con respecto al de referencia pero se obtienen mejores resultados con las cenizas de co-combustión que con las cenizas comerciales.

Johnson et al [JOHN10] utilizan en su estudio tres tipos de cenizas, una convencional de carbón y dos de carbón-biomasa quemando un 15 y un 66% de madera, todas las cenizas cumplen las prescripciones de la ASTM C-618-08 [RN 02]. Se hicieron morteros con sustituciones del 20 y del 40% obteniéndose las siguientes conclusiones: ninguna de las dos sustituciones afectó al contenido de aire ocluido ni a la resistencia a compresión y la sustitución del 20% no afectó a la durabilidad del mortero respecto a los ciclos de hielo-deshielo.

Martínez-Lage et al. [MARTXX] también desarrolla un estudio sobre la influencia de las cenizas de biomasa en las propiedades mecánicas de los morteros a 28 días, con porcentajes de sustitución de cemento por cenizas de biomasa del 0%, 10%, 20% y 30%. Se observa una disminución de la resistencia a flexotracción debido a la sustitución de cenizas, llegando a producirse una disminución de un 13% para el mortero del 30% de cenizas de biomasa. Por el contrario, la resistencia a compresión es mayor en los morteros con cenizas de biomasa que en el mortero de referencia, si bien el mayor incremento de resistencia (en torno a un 19%) se observa en los morteros con un porcentaje de sustitución del 10%. Para porcentajes de sustitución mayores la diferencia de resistencia con el de referencia es menor.

Otro estudio que trata sobre este tema es el desarrollado por Esteves et al [ESTE12]. En esta investigación se utilizan dos tipos de cenizas de biomasa, una procede de una planta de energía térmica (BFA1) y la otra del proceso de cogeneración de una industria de papel (BFA2), ambas cenizas pueden ser clasificadas como clase C según la UNE-EN 450-1 [EN 04]. Fabrican 7 morteros, uno sin cenizas (referencia), 2 con una sustitución de cemento por cada ceniza del 20%, otros 2 con una sustitución por cada ceniza del 30% y los otros 2 con una sustitución de cemento del 20% por cada ceniza y del 10% por metacaolín. Analizan la expansión en el ensayo de álcali-sílice con un árido fino altamente reactivo. El de referencia es el que da la mayor expansión (0,5%). Los que sólo tienen cenizas dan entre 0,3 y 0,4% (menor expansión con 30% de sustitución con cualquiera de las dos cenizas y menor expansión con las BFA2 que con la BFA1). Los que tienen metacaolín dan menos de 0,1% a 14 días y menos de 0,1% a 28 días con las cenizas BFA1 y menos de 0,2% a 28 días con las BFA2. Por lo tanto, concluyen que la utilización de cenizas de biomasa junto con metacaolín mitiga las reacciones álcali-árido.

También existen algunos estudios sobre la influencia de la utilización de cenizas de biomasa en las propiedades del hormigón, ya sea como sustitución de parte del cemento o como filler.

Barbosa y otros [BARB13] utilizan dos cenizas de biomasa, una volante y otra de fondo para fabricar 12 hormigones con cenizas y uno de referencia (F1). En los hormigones F2, F3, F4 y F5 se sustituyó un 10% del cemento por cenizas volantes, en el F6, F7, F8 y F9 un 20% y en el F10, F11, F12 y F13 un 30%. Además en algunos hormigones se sustituyó áridos por cenizas de fondo, en el F3, F7 y F11 un 9%, en el F4, F8 y F12 un 18% y en el F5, F9 y F13 un 36%. De los resultados concluyen que para una sustitución del 10% de cenizas volantes la resistencia a compresión es similar a la del hormigón de referencia y por el contrario con la sustitución del 30% se obtienen valores de la resistencia a compresión menores que los del hormigón de referencia y que la sustitución del 18% de áridos por cenizas de fondo es la que proporciona mayores valores de la resistencia a compresión. Todos los hormigones presentaron bajas emisiones tanto en lixiviación de agua dulce como en lixiviación de agua marina.

Wang y otros [WANG07] hacen un estudio comparativo de hormigones sin cenizas, con cenizas volantes de carbón (clase C) y con 2 mezclas de cenizas de biomasa y de cenizas de carbón (SW1 y SW2) comprobando que las resistencias a compresión que se obtienen sustituyendo un 25% del cemento por cenizas son similares para cualquier tipo de cenizas a 7, 28, 91 y 365 días y para 28, 91 y 365 días también son similares a la del hormigón sin cenizas. También comprueban que al cabo de un año las cenizas de biomasa han experimentado una significativa reacción puzolánica y que el consumo de hidróxido de calcio es similar en todos los casos lo que indica que la cinética de los dos tipos de cenizas volantes es similar. Por último comprueban que las cenizas mezcla de biomasa y de carbón tuvieron un mejor comportamiento en la mitigación de la expansión álcali-árido que las cenizas C a pesar de contener mayor contenido de álcali. La conclusión final es que la ASTM C 618 no debería de excluir a las cenizas de biomasa como adición de hormigón.

Wang y otros [WANG08a] fabrican hormigón sin cenizas, con cenizas volantes de carbón (clase C y F), con mezclas de cenizas de biomasa y de cenizas de carbón (SW1 20-80 y SW2 10-90%), con cenizas de madera, con mezcla de cenizas de madera y clase C (20-80%) y con mezcla de cenizas de madera y clase F (20-80%). Todos los hormigones cumplen que tienen 950 kg de árido grueso por m³ de hormigón, que la relación agua/cemento + cenizas es de 0,5, que cenizas/cemento es 1/3, el contenido de aire ocluido está comprendido entre 4 y 6% y el cono entre 7,6 y 12,7 cm. El árido fino se ajustó en cada hormigón para obtener los valores anteriores. Se ensayan probetas a compresión a 1, 3, 7, 28, 56 y 365 días. Los principales resultados obtenidos fueron: (1) para todos los casos la demanda de agua fue similar o menor que para el caso de no tener cenizas, excepto en el caso de las cenizas de madera (6% mayor), por la forma irregular de las cenizas, la alta porosidad o la alta LOI, (2) en todas las mezclas hubo que añadir más aireante que en el hormigón sin cenizas seguramente debido a la elevada superficie seca y elevada capacidad de absorción del carbono, en los hormigones SW1 y SW2 se necesitó más aireante que en el de cenizas de madera, (3) ninguna mezcla desarrolla resistencias significativas antes de 300 minutos y las cenizas retrasan el tiempo de fraguado, (4) los hormigones con cenizas de biomasa tienen una resistencia a compresión similar a los hormigones con otras cenizas volantes de 1 a 7 días pero inferior a la del hormigón con cemento a partir de un mes de edad.

Se fabrican los mismos hormigones que en el caso anterior pero ahora para estudiar su comportamiento frente a la durabilidad [WANG08b]. Las conclusiones que obtienen son: las cenizas volantes de cualquier tipo no tienen impacto frente a hielo-deshielo, se necesita más aireante en el caso de los hormigones con mezcla de cenizas, después en los que tienen cenizas de madera y por último en el patrón y las cenizas mezcladas tienen un comportamiento similar a las cenizas de clase F

en el test de la permeabilidad rápida del cloruro pero las cenizas de madera lo tienen mayor, similar al de sin cenizas, seguramente debido al mayor tamaño de sus partículas.

En el trabajo desarrollado por Carrasco et al. [CARR14] se investiga la influencia de la sustitución de cenizas de fondo de una planta de biomasa por cemento en proporciones desde el 10% hasta el 90% en la fabricación de bloques de hormigón de resistencia a compresión 20 MPa. Obtienen que a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de cemento por cenizas aumenta la porosidad, lo que conlleva a la disminución de la conductividad térmica lo cual es beneficioso. Asimismo también obtienen que disminuye la densidad aparente por lo que aumenta la absorción de agua comprobando que también disminuye la resistencia a compresión. De todas las sustituciones realizadas (1:9, 2:8, 3:7, 4:6, 1:1, 6:4, 7:3, 8:2 y 9:1) concluyen que la mejor es la 1:1 ya que tienen una buena resistencia a compresión y una buena conductividad térmica y además para sustituciones mayores apreciaron la aparición de fisuras cuando se sometían a ciclos de hielo-deshielo. Por último, indican que las cenizas de fondo contienen valores significativos de K_2O y MgO por lo que se puede comprometer la durabilidad del hormigón y recomiendan eliminarlas.

Cuenca et al. [CUEN13] realizan una investigación en la que se utilizan unas cenizas volantes procedentes de una caldera de biomasa de residuos del olivo como filler de un hormigón autocompactante. Lo primero que estudian es si los métodos de dosificación habituales de hormigones autocompactantes son válidos cuando parte del filler se sustituye por las cenizas de biomasa comprobando que el uso de cenizas de madera en la fabricación de hormigón autocompactante requiere una mayor demanda de agua debido a la forma irregular de las partículas, a la alta porosidad y a la mayor LOI. Fabrican dos hormigones autocompactantes y los dos de referencia equivalentes, la dosificación es distinta pero en lugar de las cenizas ponen un filler convencional. Obtienen que para tener las mismas condiciones de autocompactabilidad si se utilizan las cenizas de biomasa se necesita aumentar la dosis de superplastificante y que la resistencia a compresión en el hormigón con cenizas a 3, 7 y 28 días es ligeramente superior a la del hormigón con filler comercial. La conclusión final es que es factible el uso de cenizas de biomasa como filler en hormigones autocompactantes.

Además de la influencia de las cenizas de biomasa en las propiedades mecánicas de los morteros, Martínez-Lage [MARTXX], también desarrolla un estudio de su influencia en las propiedades mecánicas en hormigones con un 0%, 10% y 20% de sustitución de cemento por cenizas de biomasa. Observa su influencia en la resistencia a compresión (a 7 y 28 días), la tracción indirecta y el módulo de deformación (estos últimos a 28 días). Con un 10% de sustitución la resistencia a compresión es ligeramente superior a la obtenida en el hormigón de referencia, tanto a 7 como a 28 días. Por el contrario, con un 20% de sustitución a se observa un descenso de la resistencia a compresión. Apenas se observa la influencia en el módulo de deformación y en la resistencia a tracción indirecta. En cuanto a la penetración de agua bajo presión, se observa una disminución debida a la sustitución parcial de cemento por cenizas de biomasa, tanto en la penetración media como en la penetración máxima.

La composición química de las cenizas de biomasa es muy variable, tal y como se puede observar en la tabla 2.1, donde se muestran las composiciones químicas de algunas de las cenizas utilizadas en los anteriores estudios [GARC10, RAJA09, JOHN10, ESTE12, MASC11, RAMO13, TKAC12, GARC13, BARB13, CARR14, WANG08a, WANG07, RAMO14, CUEN13]. Analizando la composición de las cenizas de biomasa utilizada en estos estudios se puede comprobar que existe una gran dispersión, así la suma de los contenidos de dióxido de silicio (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3) varía entre 4 y 90%, y el contenido de óxido de calcio (CaO) entre 2 y 55%. La pérdida por calcinación

(LOI) en muchos casos es inferior a 9% (valor máximo permitido en la UNE-EN 450-1) pero en algunos se supera [GARC10, ESTE12, CUEN13].

Tal y como se señalaba en el capítulo 1, el conocimiento de la evolución de las propiedades mecánicas del hormigón a edades tempranas es de vital importancia en la fase de construcción ya que conocer la resistencia que ha adquirido un hormigón en el momento de descimbrar, desmoldar, transferir un pretensado o poner en carga puede mejorar la seguridad durante la obra, disminuir la cantidad de rechazos y prevenir problemas que surgen en las estructuras en la fase de construcción o fabricación.

Para el caso de hormigones con cenizas volantes procedentes de la combustión del carbón, se ha comprobado que la evolución de la resistencia a compresión es mucho más lenta que en los equivalentes sin cenizas estando mucho más acusado los 7 primeros días [FANG15, SOSH06, TRTN15, VOIG03, DEMI04, BELI08].

Cabe destacar que apenas existen investigaciones que se centren en la influencia de las cenizas de biomasa en las propiedades mecánicas del hormigón a edades tempranas [WANG08a, GARC13] y no se han encontrado estudios específicos sobre la influencia del porcentaje de cenizas de biomasa, como sustitución del cemento, en la cinética de evolución de las propiedades mecánicas de los hormigones a edades tempranas (en hormigón endurecido) distintas temperaturas, ni en la correlación de las mismas con ensayos no destructivos.

Por ello, en esta investigación tiene como uno de sus objetivos específicos analizar la influencia que tienen las cenizas de biomasa (como sustitutivo parcial del cemento) sobre la evolución de las propiedades mecánicas del hormigón (módulo de deformación y resistencia a compresión), con el fin de obtener un mayor conocimiento del desarrollo de las propiedades mecánicas a edades tempranas, consiguiendo así un mayor control y conocimiento sobre la influencia de las cenizas de biomasa.

2.1.3. Otros tipos de eco-hormigones

Cabe destacar que a lo largo de los últimos años se han desarrollado interesantes estudios sobre eco-hormigones y eco-morteros con otros residuos tales como áridos reciclados mixtos [GEAR12, GOME09, AGRE11, MART12, MAS12, GONZ14], residuos de madera [CORI12, ELIN02, ELIN14, HU14, SALE11], residuos de la industria conservera de bivalvos [GONZ15a, CARR15a, GONZ15b, CARR15b, NAVA14], residuos de tereftalato de polietileno (material con el que, por ejemplo, se fabrican las botellas de agua desechables) [AVIL13], con caucho reciclado procedente de neumáticos [FLOR14, SHU14, SU15], residuos de corcho [MATO15] o residuos de vidrio [NUNE13, AVIL15], por ejemplo.

Tabla 2.1. Composición química de cenizas utilizadas en los estudios referenciados (continúa)

Compuesto	GARC10						GARC13	RAJA09		JOHN10			ESTE12		RAMO14	CARR14
	CV-1	GWA	CV-2	CV-3	CV-4	CF-1	GWA	F1	F2	CFA	15CBFA	66CBFA	BFA1	BFA2	WWA	C. de fondo
<i>SiO₂</i>	21,76	69,5	7,01	23,70	3,19	44,00	69,5	41	28	46,3	45,2	43,6	52,1	25,1	73,01	27,87
<i>Al₂O₃</i>	5,69	4,18	1,2	3,32	0,26	12,08	4,18	9,3	6,2	21,0	21,5	21,0	13,2	11,3	11,93	4,34
<i>Fe₂O₃</i>	3,34	1,99	1,53	1,65	0,31	9,04	1,99	2,6	2,2	4,2	4,0	3,9	5,3	5,18	3,38	3,59
<i>CaO</i>	16,99	8,10	5,81	28,58	44,78	11,03	8,10	11,4	25,4	14,5	13,6	14,5	15,9	40,1	2,64	29,96
<i>MgO</i>	6,59	1,24	6,1	3,16	5,64	7,04	1,24	2,3	5,0	2,60	2,50	2,91	3,31	6,63	1,03	4,05
<i>Na₂O</i>	1,41	1,40	0,99	0,93	2,74	2,49	1,40	0,9	3,3	7,50	7,30	4,46	-	-	0,99	0,35
<i>K₂O</i>	19,76	3,60	45,34	4,46	0,65	11,19	3,60	3,9	3,2	0,60	0,70	1,17	4,14	2,07	4,14	23,22
<i>MnO</i>	0,04	-	0,03	0,76	0,55	0,09	-	0,3	0,7	0,02	0,02	0,12	-	-	-	0,091
<i>P₂O₅</i>	4,05	-	2,27	1,0	1,13	0,97	-	0,9	0,9	0,60	0,60	0,67	-	-	0,59	4,18
<i>SO₃</i>	1,45	<0,1	1,79	0,83	0,28	0,50	<0,1	-	-	-	-	-	0,45	1,12	<0,05	0,762
<i>Cl</i>	3,84	0,03	4,55	1,36	0,06	<0,02	0,03	-	-	-	-	-	0,10	0,25	0,009	0,291
LOI	9,97	-	14,74	22,48	41,41	0,55	-	-	-	0,8	0,4	0,9	10,4	3,50	1,47	-

Tabla 2.1. Composición química de cenizas utilizadas en los estudios referenciados (continuación)

Compuesto	TKAC12						WANG08a y WANG08b							CUEN13
	FA1/II	FA1/III	FA2/II	FA3/II	FA3/III	Comercial	Clase C	Clase F	SW1	SW2	10P	SAW	Wood	C. volantes
<i>SiO₂</i>	45,2	48,0	25,5	44,8	46,4	50,7	37,26	54,91	52,16	53,02	36,22	35,23	48,94	11,84
<i>Al₂O₃</i>	23,0	23,3	7,4	24,9	25,2	24,3	19,62	27,79	23,55	25,78	20,88	20,87	12,47	2,60
<i>Fe₂O₃</i>	8,2	7,5	1,6	7,6	8,1	8,7	6,07	7,54	7,57	7,95	6,2	6,22	5,45	1,38
<i>CaO</i>	5,6	4,9	20	5,0	5,8	5,2	24,18	1,11	2,37	1,88	20,78	21,86	13,55	54,82
<i>MgO</i>	2,2	3,2	0,7	24	2,3	2,7	5,37	0,84	1,31	0,91	5,06	5,12	3,16	4,36
<i>Na₂O</i>	1,4	1,5	2,7	1,3	1,4	2,02	1,5	0,19	0,7	0,26	1,61	1,72	1,68	0,16
<i>K₂O</i>	3,0	2,7	2,6	2,9	2,8	2,2	0,43	2,4	4,01	2,14	2,01	1,89	3,37	9,26
<i>MnO</i>	-	-	-	-	-	-	0,01	0,02	0,04	0,02	0,06	0,07	0,12	0,10
<i>P₂O₅</i>	-	-	-	-	-	-	1,2	0,28	1,04	1,1	1,73	1,73	0,95	3,40
<i>SO₃</i>	1,1	0,8	1,0	1,2	1,4	0,7	1,83	0,38	2,25	1,23	3,35	3,87	1,3	-
<i>Cl</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LOI	8,3	6,6	4,3	8,2	5,0	2,2	0,7	1,72	3,85	3,06	1,33	1,29	7,89	11,73

2.2- Ensayos no destructivos para la estimación de las propiedades mecánicas del hormigón

2.2.1. Introducción / Aplicación general

Hay muchos estudios e investigaciones en los que se utilizan ensayos no destructivos para la estimación de la resistencia a compresión y el módulo de deformación del hormigón. Fernández Gómez et al. [FERN01] en su libro sobre la evaluación de la capacidad resistente de estructuras de hormigón con ensayos no destructivos citan como principales ensayos no destructivos para la evaluación de las propiedades mecánicas del hormigón los siguientes:

- Velocidad de ultrasonidos o Velocidad de pulso ultrasónico (UPV),
- Dureza superficial (Índice de rebote, esclerómetro),
- Madurez.

Y destacan las ventajas del método combinado de ultrasonidos e índice de rebote. También citan algunos ensayos semi-destructivos como son Pull-out, Pull-off, Break-off, fractura interna y penetración. Malhotra y Carino [MALH04], también destaca los ultrasonidos, el índice de rebote y la madurez como tres de las técnicas más importantes dentro de lo que se consideran ensayos no destructivos y también dedica un apartado al método combinado de ultrasonidos e índice de rebote. Asimismo destacan los métodos basados en la frecuencia resonante para la determinación del módulo de deformación. Precisamente, basado en los principios de la frecuencia resonante existe un método reciente para la monitorización del módulo de deformación llamado “*E-Modulus Measurement through Ambient Response Method*” o EMM-ARM, cuya efectividad fue validada en estudios anteriores [AZEN10a, AZEN10b, AZEN12a, AZEN12b, MAIA11, MAIA12a, MAIA12b, GRAN16].

Breyse [BREY12] hace un estado del conocimiento sobre los ensayos no destructivos utilizados para la evaluación de la resistencia a compresión del hormigón y destaca dos técnicas: la velocidad de pulso ultrasónico y el índice de rebote. Incluso la normativa europea UNE-EN 13791 [EN 18] para la evaluación de la resistencia a compresión in-situ en estructuras y elementos prefabricados de hormigón proponen un método para la estimación de la resistencia en la que se utilizan velocidad de ultrasonidos e índice de rebote.

Hay dos estudios el de Wei [WEI11] y el de Martínez-Molina [MART14] que utilizan la resistividad eléctrica como otro ensayo no destructivo para la estimación de la resistencia a compresión en hormigones.

Por todo ello, y pese a que existen otros interesantes métodos, como impact-eco, termografía o pistola de windsoft, en esta investigación se utilizarán los siguientes ensayos no destructivos:

- Velocidad de pulso ultrasónico
- Índice de rebote
- Madurez

Y además, para un estudio mayor, también se utilizarán:

- EMM-ARM
- Conductividad eléctrica

2.2.2. Velocidad de pulso ultrasónico (UPV)

- **Aplicación a hormigones en general**

En la normativa europea UNE-EN 12504-4 para la determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos, se indica que la medida de velocidad de ultrasonidos puede utilizarse para estimar la resistencia de elementos de hormigón, si bien no se trata de una alternativa para la determinación directa de la resistencia a compresión, debido a la influencia de múltiples factores que influyen en las correlaciones. Posteriormente se desarrollará el análisis de los factores más importantes. El módulo de deformación está directamente relacionado con la UPV debido a la teoría de propagación de ondas, según la ecuación 2.1 [RN 01, MALH04], siempre y cuando se considere un sólido homogéneo:

$$UPV = \sqrt{\frac{K \cdot E}{\rho}} \quad (2.1)$$

Siendo:

UPV = velocidad de pulso ultrasónico

E= módulo de deformación

ρ = densidad

$$K = \frac{(1 - \mu)}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}$$

μ = módulo de Poisson

Como consecuencia de la ecuación 2.1, se deduce que la correlación para la estimación del módulo en función de la velocidad de ultrasonidos es parabólica.

Garay et al. [GARA81] desarrollan una descripción detallada de la ecuación de propagación, del movimiento ondulatorio y de las partes de las que se compone el impulso ultrasónico en sólidos dispersivos, para ser más concretos, sobre el hormigón.

En la tabla 2.2 se hace un resumen de las principales correlaciones entre velocidad de ultrasonidos y resistencia a compresión, así como algunos de los estudios en los que se utiliza cada una de ellas.

Tabla 2.2. Principales correlaciones tipo de UPV-Resistencia a compresión

Investigaciones	Correlación tipo
YUN89, GONÇ95, PHOO99, ELVE76, QASR00	$\hat{s} = a_0 + a_1 \cdot UPV$
SRIR88, TEOD88, ELVE76, FERN01	$\hat{s} = a_1 \cdot e^{a_2 \cdot UPV}$
ALME93, PASC00, FERN01	$\hat{s} = a_1 \cdot UPV^{a_2}$
FERN01	$\hat{s} = a_0 + a_1 \cdot UPV^2 + a_2 \cdot UPV$

Siendo:

UPV = velocidad de ultrasonidos (m/s)

$\hat{\sigma}$ = resistencia a compresión estimada (MPa)

Existen tres formas diferenciadas de medición en función de la posición de los palpadores cuando se efectúa el ensayo. Por orden de preferencia, estas mediciones pueden ser de transmisión directa (en caras opuestas o enfrentadas), transmisión semidirecta (en caras adyacentes) y transmisión superficial (en el mismo plano superficial).

En cuanto a los factores que influyen en las correlaciones con la velocidad de ultrasonidos, tal y como se puede consultar en el anexo B de normativa europea UNE-EN 12504-4 [EN 12], la correlación entre la velocidad de ultrasonidos y la resistencia a compresión del hormigón debe establecerse para cada mezcla específica de hormigón, ya que dichas correlaciones dependen de múltiples factores, como son:

Contenido de humedad y condiciones de curado. La norma se limita a indicar que es un factor a tener en cuenta, tanto en lo referente al efecto de las condiciones de curado sobre la hidratación del cemento como al efecto de la presencia de agua libre en los poros. Anwar Hossain et al. [HOSS09] estudia distintas condiciones de curado para hormigones normales y hormigones con cenizas volcánicas y observa cómo, efectivamente, las condiciones de curado afectan a la relación entre la resistencia a compresión y la velocidad de ultrasonidos. Existen estudios [OHDA00, POPO01] que concluyen que la velocidad de ultrasonidos es mayor en los hormigones húmedos que en los secos (en el momento de la medición), debido a que la velocidad de impulso ultrasónico es mayor en el agua que en el aire. Por otra parte, Kaplan [KAPL58] observó diferencias entre probetas curadas en condiciones de laboratorio (saturadas) y probetas curadas in situ (al aire libre); las probetas curadas en laboratorio presentan una mayor velocidad de curado que las curadas in situ.

Longitud de trayectoria. En general, la velocidad del impulso no está influenciada por los cambios de longitud, si bien es necesario que la longitud de la trayectoria sobre la que se hace la medición de ultrasonidos sea lo suficientemente grande como para no verse influida de forma significativa por la naturaleza heterogénea del hormigón. Para ello, se marcan unas longitudes de trayectorias mínimas en función del tamaño máximo del árido empleado en la fabricación del hormigón: para hormigones con tamaño máximo de árido de 20 mm o menor, la trayectoria mínima será de 100 mm y, para tamaños máximos de árido entre 20 mm y 40 mm, trayectoria mínima de 150 mm.

Forma y tamaño de la muestra de ensayo. Cuando la dimensión lateral es inferior a un valor mínimo el tamaño de la pieza puede ser un factor que influye en los resultados. Para evitar esto, se han marcado unos valores mínimos de la dimensión lateral recomendada, en función de la frecuencia del palpado; por ejemplo, para la frecuencia más utilizada en estos ensayos, 54 kHz, la dimensión mínima recomendada es de 65 mm si la UPV tienen un valor hasta 3,50 km/s, de 74 mm si la UPV es de 4 km/s y de 83 mm para una UPV de 4,50 km/s. A mayor frecuencia de palpador, menor es la dimensión lateral mínima recomendada.

Efecto de las barras de armado. Se limita a recomendar, cuando sea posible, evitar medidas próximas a barras de acero armado paralelas a la dirección de propagación del impulso.

Grietas y coqueras. La presencia de defectos tales como grietas y coqueras hace que el tiempo de tránsito sea mayor al que se mide en un hormigón similar sin defectos. Esto es debido a que

estos defectos producen la difracción del impulso si se dan ciertas condiciones: una coquera o fisura situada entre los palpadores puede obstruir el haz ultrasónico directo cuando la longitud proyectada de la coquera sea mayor que la anchura de los palpadores y la longitud de onda del sonido empleado. Los defectos pequeños tienen poca o ninguna influencia en los tiempos de transmisión y son de menor importancia en ingeniería.

Temperatura del hormigón. Según la normativa EN 12504-4 [EN 12], las variaciones de temperatura entre 10°C y 30°C no producen cambios significativos en las correlaciones entre UPV y la resistencia a compresión, y las recomendaciones RILEM para ensayos no destructivos, marcan incluso un rango mayor, de 5°C a 30°C. En la normativa BS 1881-203 [RN 05], se recoge una tabla que propone unas correcciones de la propagación del impulso para ensayos que se produzcan a temperaturas fuera del rango de temperaturas indicado anteriormente: cuando la temperatura es muy elevada, se propone un coeficiente que aumenta el valor de UPV medido hasta un 5% en el caso de 60°C de temperatura ambiente en hormigón curado al aire, ya que la reducción de la velocidad de ultrasonidos debida a la microfisuración interna del hormigón no corresponde directamente con la reducción producida en la resistencia a compresión. Si bien estas correcciones son muy genéricas y parece razonable desarrollar estudios sobre la influencia de la temperatura, no solo de la temperatura de curado, sino de la temperatura interna en estas correlaciones, debido a que, incluso en una misma estructura se pueden desarrollar temperaturas internas muy distintas debido al soleamiento, el viento y las diferencias de volumen de hormigón debido a secciones irregulares. Fernández Gómez et al. [FERN01] apunta a que existe una influencia de las condiciones de curado en las correlaciones entre UPV y resistencia a compresión, si bien no especifica que tendencias sigue la variación de las correlaciones debido a un cambio en la temperatura de curado, se limita a apuntar que no es fácil establecer una relación lógica entre UPV y la temperatura de curado, por tanto, de la madurez.

Son muy escasas las investigaciones que estudian la influencia de la temperatura de curado en las correlaciones entre resistencia a compresión y UPV. Elvery et al. [ELVE76] han medido la resistencia a compresión y la velocidad de ultrasonidos para probetas curadas a 1, 3, 5, 10, 18, 24, 30, 40, 50, 60°C de hormigones convencionales y establecieron su correlación para los hormigones curados a 5°C, 18°C y 30°C, en un hormigón en el que se mantuvo el ratio agua/cemento y las relaciones entre árido/cemento, y se observó que a partir de 10 días la velocidad se estabilizó en 4,50 km/s y en dicho momento la diferencia entre las resistencias de las probetas curadas a 5°C y a 30°C se diferencian en más de un 30%, pese a ello, no se ha extraído ninguna conclusión clara relativa a la tendencia de variación que tienen las curvas de correlación de resistencia-UPV debido a las variaciones de temperatura, si bien se observa que las curvas de correlación son distintas para cada temperatura.

Sturup et al. desarrollaron un estudio de la influencia de la temperatura en estas correlaciones [STUR84], con temperaturas de 10, 21 y 32°C, pero se consigue establecer una relación lógica entre el cambio de temperatura y los cambios en las correlaciones, ya que la curva de 32°C se encuentra entre las curvas de 10°C y de 21°C, por lo que no se concluye ninguna tendencia del efecto de la temperatura en estas correlaciones.

Meneghetti [MENE99] estudia la influencia de la temperatura en estas correlaciones en un rango de entre 25°C y 45°C (tres temperaturas 25, 35 y 45 °C) en 9 hormigones. El estudio se centra en edades muy tempranas ya que toma medidas, únicamente, a 12 horas, 16 horas, 24 horas y 3 días. Si bien es cierto que la curva correspondiente a 45°C está por encima de las otras dos curvas (es decir, para una misma velocidad de ultrasonidos le corresponde una resistencia a

compresión mayor) en la mayoría de los hormigones, cabe apuntar que no se observa una tendencia clara del efecto de la temperatura en las curvas de correlación, ya que el resultado es diferente y en muchos casos las curvas no siguen una lógica secuencial con la temperatura.

Otros autores [FERN01, MALH04] apuntan algunos otros factores que influyen en estas correlaciones, tales como la dosificación y el tipo de cemento, el tipo de árido, la relación agua/cemento.

Tipo de cemento y adiciones. Jones [JONE54] no observa una influencia significativa del tipo de cemento en la velocidad de ultrasonidos. Elevery et al. [ELVE76] sí encuentran una cierta diferencia entre los resultados para hormigones con cemento tipo I y tipo II durante los dos primeros días, si bien a 7 días la influencia ya es inferior. En cuanto a la adición de cenizas de biomasa, cabe apuntar que no se han encontrado estudios sobre la influencia de la adición de cenizas de biomasa en las correlaciones entre las propiedades mecánicas del hormigón y la velocidad de ultrasonidos, ni de la influencia de la temperatura en dichas correlaciones. Los estudios más próximos podrían ser los de hormigones con cenizas volantes procedentes de la combustión de carbón. Para el caso de estos hormigones, se ha comprobado que la evolución de la velocidad de ultrasonidos es menor que en los hormigones sin adiciones, pero en menor medida que la resistencia [FANG15, SOSH06, TRTN15, VOIG03, DEMI04, BELI08].

Tipo de árido. Según Bungey [BUNG89] para una misma velocidad de ultrasonidos, la resistencia a compresión es menor en los hormigones con árido calizo que en los hormigones con árido silíceo. La densidad de los áridos influye de forma directa en la densidad de los hormigones, por lo que se podría decir que la densidad de los hormigones influye en las correlaciones entre resistencia a compresión y UPV. En la figura 2.1 se muestra una gráfica extraída del libro de Fernández Gómez et al. [FERN01], que es una adaptación de la gráfica publicada por Bungey [BUNG89] sobre la influencia del tipo de árido en las correlaciones entre resistencia a compresión y velocidad de ultrasonidos. Se observa como para un mismo valor de UPV, la resistencia correspondiente es más grande en un hormigón con áridos silíceos que la resistencia correspondiente en un hormigón con áridos calizos.

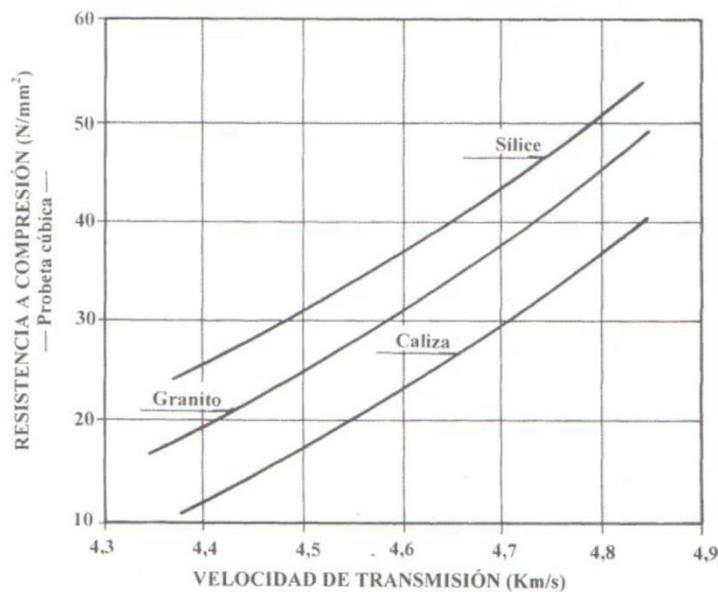


Figura 2.1. Influencia del tipo de árido [BUNG89, FERN01]

Si las diferencias entre distintos áridos naturales pueden suponer variaciones estas correlaciones, los áridos reciclados podrán suponer mayores variaciones, debido a que su densidad y porosidad difiere de la de los áridos naturales en general. Existen pocos estudios sobre la influencia de los áridos reciclados en las correlaciones entre UPV y resistencia a compresión. De hecho, no se ha encontrado ningún estudio sobre la influencia, en estas correlaciones, del árido reciclado fino y grueso utilizado de forma conjunta. Sí existe algún estudio de la influencia del árido reciclado grueso de hormigón en estas correlaciones; Latif et al. [LATI12] hacen una comparativa entre las correlaciones resistencia a compresión y UPV de un hormigón convencional y un hormigón con árido reciclado grueso; durante los 7 primeros días apenas se observa diferencia entre ellos pero a partir del séptimo día, sí se observan diferencias importantes, ya que, para una misma velocidad de ultrasonidos, la resistencia correspondiente es mayor para el hormigón con árido reciclado que la correspondiente al hormigón de referencia. Esta misma influencia de los áridos reciclados gruesos en las curvas de correlación se observa en otro estudio en el que se compara un hormigón de referencia con otros dos con sustituciones parciales del 25% y 75% árido natural grueso por árido reciclado grueso [MAIO03], a 28 días. Di Maio y Traversa, teniendo en cuenta que estas sustituciones influyen de forma importante en la densidad del hormigón, achacan estas variaciones de las correlaciones a la importante influencia de la densidad en ellas.

Relación agua/cemento. Elevery et al. [ELVE76] hallan las curvas (lineales) de correlación con distintos ratios agua/cemento, pero no observan una tendencia de la influencia de la relación agua/cemento en dichas correlaciones. Lawson et al. [LAWS11] estudia las correlaciones entre UPV y resistencia a compresión para hormigones con distintas relaciones agua/cemento (desde 0,35 a 0,75) y observa que las correlaciones están fuertemente condicionadas por los ratios agua/cemento a edades tempranas. Latif y Fried [LATI12] desarrollan un estudio comparativo entre un hormigón de referencia y un hormigón con un 100% de árido reciclado grueso y observan que ambos hormigones se ven afectados de forma similar al variar la relación agua cemento, tanto en lo referente a la evolución de la velocidad de ultrasonidos, como en lo referente a la resistencia a compresión, si bien no hace un análisis sobre la posible influencia directa de las variaciones de agua/cemento en las correlaciones entre UPV y resistencia a compresión.

2.2.3. Índice de rebote (R)

La normativa europea UNE-EN 12504-2 [EN 11], basada en las normas ISO 1920-7 [RN 10] y ASTM C805 [RN 03], advierte que el método de ensayo del índice de rebote no es un ensayo pensado como una alternativa a la determinación de la resistencia a compresión, pero que puede llegar a proporcionar una estimación de la resistencia a compresión in situ con una adecuada correlación y remite al lector a la normativa europea UNE-EN 13791 [EN 18, EN 19]; en dicha norma se apunta a que la correlación entre la resistencia a compresión y el índice de rebote se ve afectada por las características del hormigón, pero no especifica cuáles son esas características que influyen ni que tendencia tienen. Malhotra y Carino [MALH04] señalan varias variables que influyen en los resultados de índice de rebote, tales como las irregularidades de la superficie, la edad, el tipo de árido grueso, el tipo de cemento, el tipo de probeta y la carbonatación de la superficie. El tipo de árido parece ser un factor determinante en las correlaciones entre resistencia a compresión e índice de rebote, tal y como se puede ver en la figura 2.2, donde Bungey diferencia dos curvas de correlación en función de si el tipo de grava es “dura” o “blanda” [BUNG06].

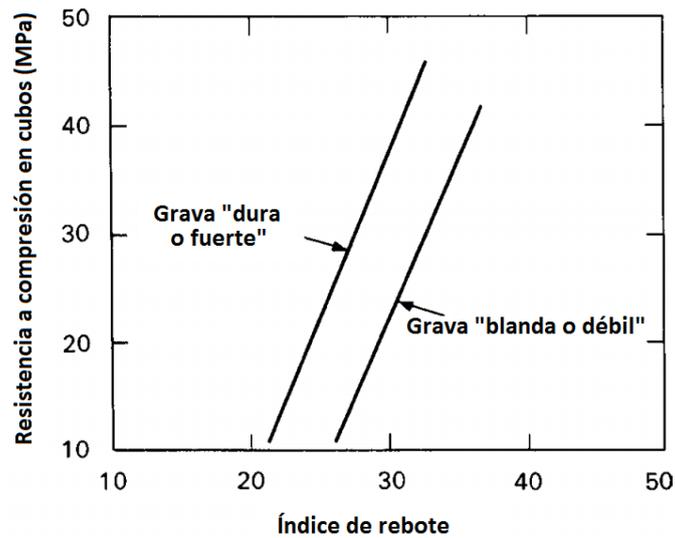


Figura 2.2. Comparación de correlaciones hechas con grava dura y grava blanda [BUNF06]

En cuanto al tipo de cemento, mientras que apenas hay diferencias entre hormigones hechos con distintos cementos Portland, las correlaciones de éstos sí difieren considerablemente con respecto a las de los hormigones con cementos de aluminato de calcio, sobresulfatados o con ciertas adiciones [FERN01].

En la tabla 2.3 se hace un resumen de las principales correlaciones entre índice de rebote y la resistencia a compresión, así como algunos de los estudios en los que se utiliza cada una de ellas.

Tabla 2.3. Principales correlaciones tipo de Índice de rebote-Resistencia a compresión

Investigaciones	Correlación tipo
SRIR88, GONÇ95, QASR00	$\hat{s} = a_0 + a_1 \cdot R$
ALME93, PASC00	$\hat{s} = a_1 \cdot R^{a_2}$

Siendo:

\hat{s} = resistencia estimada (MPa)

R= índice de rebote

Latif et al. [LATI12] comparan los resultados de un hormigón convencional y un hormigón con árido reciclado grueso a edades tempranas y observa que, para un mismo valor de índice de rebote, la resistencia a compresión correspondiente es menor para el hormigón con árido reciclado. Di Maio y Traversa [MAIO03], que comparan tres hormigones con, 0%, 25% y 75% de sustitución de árido reciclado grueso, únicamente con resultados a 28 días, no observan una influencia clara de los áridos reciclados en la correlación de resistencia a compresión e índice de rebote; intentan hacer una curva de correlación conjunta independientemente del porcentaje de sustitución de árido reciclado, pero observan que la dispersión es elevada [MAIO03].

En cuanto a la relación del índice de rebote con el módulo de deformación, Mitchell y Hoagland [MITC61] han intentado correlacionar índice de rebote con el módulo de deformación estático y

llegan a la conclusión de que no hay una expresión general que las correlacione, es necesario hacer una calibración para cada hormigón. Ya en 1955 Petersen y Stoll [PETE55] y Klieger [KLIE55] establecen una relación empírica entre el índice de rebote y el módulo dinámico y subrayan que estas correlaciones se ven muy afectadas por las condiciones de curado y el tipo de árido [MALH04].

2.2.4. Madurez

- **Las bases del método de la madurez**

Existen múltiples fórmulas de estimación de la resistencia a compresión en función de la madurez. Una de las ecuaciones más utilizada es la propuesta por Nykanen (ecuación 2.2), en 1956 [NYKA56] en función de un índice de madurez “M” (también llamado factor tiempo-temperatura “FTT”) y de una factor constante “k”.

$$S = S_{\infty} \cdot (1 - e^{k \cdot M}) \quad (2.2)$$

donde:

S = resistencia estimada

S_{∞} = resistencia a tiempo infinito (resistencia estabilizada en el tiempo)

M = índice de madurez (°C·horas)

k = constante que depende de la relación a/c y del tipo de cemento.

El concepto de índice de madurez fue introducido por Saul [SAUL51] que, ya en 1951, propone la ecuación (2.3) más conocida como Nurse-Saul para el cálculo del índice de madurez M, también llamado, en este caso, factor tiempo-temperatura. Y en el año 1954, Rastrup [RAST54], introduce el concepto de “edad equivalente” definida según la ecuación 2.4.

$$M = FTT = \sum_0^t (T - T_0) \cdot \Delta t \quad (2.3)$$

$$t_e = \frac{M}{(T_r - T_0)} = \frac{FTT}{(T_r - T_0)} \quad (2.4)$$

donde:

M= índice de madurez (°C·horas)

FTT= factor tiempo-temperatura (°C·horas)

T = temperatura media en el intervalo de tiempo Δt . (°C)

T_0 = temperatura datum o mínima t^a a la que el hormigón adquiere resistencia (°C)

Δt = intervalo de tiempo (s)

t_e = edad equivalente (días)

T_r = temperatura de referencia (°C)

Hansen y Pedersen [HANS77] proponen, en 1977, la ecuación 2.5 para el cálculo de la edad equivalente, basada en la ecuación de Arrhenius.

$$t_e = \sum_0^t e^{\frac{-E}{R} \left[\frac{1}{273+T} - \frac{1}{273+T_r} \right]} \cdot \Delta t \quad (2.5)$$

donde:

E = energía de activación (J/mol)

R = constante de los gases (J/mol)

T = temperatura media en el intervalo de tiempo Δt (°C)

T_r = temperatura de referencia (°C)

Δt = intervalo de tiempo (días)

Además de la ecuación de ajuste de la resistencia de Nykanen (2.2), existen otras ecuaciones de ajuste de la resistencia, como puede ser la función logarítmica (2.6) o la función hiperbólica (2.7) propuestas por Kee en 1971 [KEE71], entre otras.

$$S = a + b \cdot \log(M) \quad (2.6)$$

$$S = \frac{M}{\frac{1}{A} + \frac{M}{S_\infty}} \quad (2.7)$$

Donde los parámetros “a”, “b” y “A” son constantes a determinar, relacionadas con el ratio agua/cemento y con el tipo de cemento.

- **La energía de activación**

La energía de activación, según Arrhenius se define como la mínima energía que necesita un sistema para poder empezar un proceso. Esta energía se utiliza en la ecuación 2.5, para la determinación de la edad equivalente.

Hansen y Pedersen [HANS77] propone unos valores aproximados de la energía de activación:

$$\text{Para } T \geq 20 \text{ } ^\circ\text{C} \quad E = 33.500 \text{ J/mol}$$

$$\text{Para } T < 20 \text{ } ^\circ\text{C} \quad E = 33.500 + 1470 \cdot (20 - T) \text{ J/mol}$$

Pero en realidad, la energía de activación depende de muchos factores y es necesario calcular la energía de activación para cada hormigón mediante una campaña experimental. La normativa americana ASTM C1074-11 [RN 04] indica una manera de calcular la energía de activación utilizando los datos de evolución de la resistencia a compresión de probetas curadas a 3 temperaturas distintas. La energía de activación se puede calcular utilizando datos obtenidos con probetas de hormigón o con probetas de “mortero equivalente”, si bien el cálculo con probetas de hormigón es más realista, debido a que los datos se adquieren ensayando probetas del material del cual queremos calcular la energía de activación.

Para el cálculo de la energía de activación según la ASTM C1074-11 simplemente hay que seguir los siguientes pasos:

1º- Hallar los valores de “k”. Para cada temperatura de curado, se representa en el eje de abscisas los valores de la inversa de la edad y en ordenadas los valores de la inversa de la resistencia. Se halla la recta de ajuste. El valor “k” es el cociente de ordenada en el origen entre pendiente de la recta correspondiente. Para cada temperatura se obtiene un valor de “k”.

2º- Cálculo de “Q”. Se representa en abscisas la inversa de la temperatura en kelvin y en ordenadas el logaritmo neperiano de los valores de “k” correspondientes. La pendiente de la recta de ajuste es igual al valor opuesto de “Q”.

3- Cálculo de la energía de activación. La energía de activación es igual a Q entre la constante de los gases.

De este modo la energía de activación se calcula con tres temperaturas y se supone que es aplicable en todo el rango de temperaturas entre el máximo y el mínimo que se han utilizado, si bien Zhang et al. [ZHAN08] desarrollan un estudio en el que proponen indicar un intervalo de energía de activación: cuando se representa en abscisas la inversa de la temperatura en kelvin y en ordenadas el logaritmo neperiano de los valores de “k” correspondientes, en vez de hacer una única recta de ajuste, se podrían hacer dos, una para los valores de la temperatura entre la mínima y la intermedia, y otra recta de ajuste para los datos de temperatura entre la intermedia y la máxima. En su campaña experimental utiliza temperaturas de curado de 10, 25 y 40°C. Zhang et al. hacen un cálculo optimizado de la energía de activación que minimiza el error cuadrático medio. Además, calcula la energía de activación para hormigones con un 20% de cenizas volantes de carbón y con un 50% de escorias. Observan que ambas adiciones producen una disminución de la energía de activación. Concluye que diferentes propiedades pueden tener diferentes valores de energía de activación, que diferentes hormigones pueden tener diferentes energías de activación y que diferentes grados de desarrollo de una propiedad pueden presentar diferentes energías de activación.

Según Abdel-Jawad [ABDE06], El uso de la función de madurez Nurse-Saul y del método tradicional de madurez para calcular la resistencia para edades mayores de siete días, en el caso de probetas curadas a menos de 20°C o mayores de 3 días para probetas curadas a temperaturas más altas, puede dar lugar a una subestimación de la resistencia a compresión cuando la temperatura de curado es baja y a una sobrestimación de la resistencia cuando existen altas temperaturas de curado.

Brooks, desarrolla un estudio [BROO07] de la influencia de las cenizas volantes en la energía de activación. Para ello calcula la energía de activación con el mortero equivalente definido en la ASTM C1074-11. Las temperaturas utilizadas son 8, 23 y 40 °C. Se observan graves problemas de sobrestimación de la resistencia a altas temperaturas.

Riding et al. [RIDI11] desarrollan un modelo de estimación de la energía de activación analizando múltiples variables y aplica análisis estadístico con los datos experimentales de hidratación de 116 mezclas. Su modelo también fue validado por un conjunto independiente de datos de la hidratación del cemento seis mezclas diferentes. Dicho modelo considera los efectos de la química del cemento, las adiciones al cemento y aditivos químicos.

Otros estudios [HAN10, WADE10, PINTO10, LACH07] se centran en el cálculo de la energía de activación durante el fraguado, si bien esto queda fuera del alcance de esta tesis, ya que esta tesis se enmarca dentro del estudio del hormigón endurecido.

- **Recientes estudios sobre el método de la madurez y la determinación de la energía de activación**

La temperatura juega un papel muy importante en la evolución de la resistencia a compresión y es un factor a tener en cuenta. La temperatura exterior, el soleamiento, la orientación, el volumen de hormigón que rodea cada punto y la composición del hormigón son factores a tener en cuenta a la hora de estimar la resistencia a compresión de una parte de una estructura, ya que todos estos factores influyen en el desarrollo de la temperatura interna del hormigón. Un reciente estudio [YIKI15] utiliza el método de la madurez para estimar la resistencia a compresión en distintos puntos de una gran masa de hormigón con el fin de observar las diferencias de evolución de la resistencia debido al volumen de hormigón que rodea la zona, ya que el fraguado del hormigón es un proceso exotérmico. Se fabrican cubos de hormigón en masa de 1,83 metros de lado. Se curan a tres temperaturas 10, 23 y 40 °C, y se instrumentan con sensores de temperaturas en distintos puntos de los cubos. Posteriormente se extraen testigos en cada una de las zonas instrumentadas con sensores de temperatura y se ensayan. En dicho estudio se observa que la resistencia en distintos puntos de un mismo cubo es distinta y que se puede aplicar el modelo hiperbólico para estimar la resistencia a compresión obteniendo resultados satisfactorios.

Otro estudio reciente [SOUT16] compara los resultados de madurez en distintos elementos estructurales [muros, losas y bloques] en verano y en invierno, con hormigones sin adiciones, con hormigones con sustituciones parciales de cemento por escorias de alto horno y de cenizas de combustible (fuel) pulverizadas. Se observa que la contribución de estas adiciones a edades tempranas aumenta al aumentar la temperatura. Hace una comparativa entre los resultados obtenidos con la función de Nurse-Saul (2.3) y los obtenidos con la función basada en Arrhenius (2.5) y apunta que los resultados obtenidos con ésta última son mejores que los obtenidos con la función de Nurse-Saul.

2.2.5. Conductividad y resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica se ha utilizado durante años como método de medición de corrosión de armaduras [MALH04], si bien existen estudios que relacionan la evolución de la resistividad con la evolución de las propiedades mecánicas del hormigón. Anton Van Beek [VANB00] desarrolla un estudio sobre la utilización de un sensor dieléctrico (ensayo no destructivo) que mide la conductividad eléctrica (inversa de la resistividad) para la monitorización del desarrollo de la resistencia a compresión en edades tempranas.

Wei [WEI11] relaciona linealmente la resistencia a compresión y la resistividad eléctrica. Así mismo estudia la posible correlación entre el módulo de deformación y la resistividad eléctrica desde edad temprana hasta 28 días y observa como estas dos propiedades se relacionan según la ecuación 2.8 y obtiene un ajuste con un R^2 de 0.92.

$$\text{Módulo} = \alpha_1 \cdot \text{Ln}(\text{Resistividad}) + \alpha_2 \quad (2.8)$$

Martínez-Molina [MART14] propone unos modelos de estimación de la resistencia a compresión utilizando diversos ensayos no destructivos. En dos de estos modelos utiliza la resistividad eléctrica, que relaciona de forma lineal con la resistencia a compresión (2.8, 2.10). Los resultados obtenidos son sensiblemente mejores que los obtenidos sin tener en cuenta la resistividad.

$$\hat{s} = a_0 + a_1 \cdot UPV + a_2 R + a_3 \cdot (Frecuencia\ resonante) + a_4 \cdot (Resistividad) \quad (2.9)$$

$$\hat{s} = a_0 + a_1 \cdot R^2 + a_2 \cdot UPV + a_3 \cdot AC^{-0.5} + a_4 \ln(t) + a_5 \cdot (Resistiv) + a_6 \cdot (Frec) \quad (2.10)$$

2.2.6. EMM-ARM

Basado en los principios de la frecuencia resonante [MALH04] para la estimación del módulo de deformación dinámico, existe un método reciente para la monitorización del módulo de deformación llamado “*E-Modulus Measurement through Ambient Response Method*” o EMM-ARM, cuya efectividad fue validada en estudios anteriores [AZEN10a, AZEN10b, AZEN12a, AZEN12b, MAIA11, MAIA12a, MAIA12b, GRAN16]. Este método ha sido utilizado y validado tanto en morteros como en hormigones.

2.2.7. Métodos combinados

Existen multitud de combinaciones para la estimación de la resistencia a compresión utilizando ensayos no destructivos. En la tabla 2.4 se muestran algunos de los modelos más utilizados para la estimación de la resistencia a compresión utilizando velocidad de ultrasonidos, índice de rebote, datos de la dosificación y propiedades físicas del hormigón. Las referencias que figuran en la tabla son solo algunas de las que se podrían nombrar. Los modelos más simples se han utilizado en infinitud de estudios.

Tabla 2.4. Modelos de estimación de la resistencia a compresión más habituales

Referencia	Modelo de estimación con END
-	$\hat{s} = a_0 + a_1 \cdot UPV$
FERN01	$\hat{s} = a_1 \cdot UPV^{a_2}$
FERN01 LINO7 BOGA13	$\hat{s} = a_1 \cdot e^{a_2 \cdot UPV}$
FERN01	$\hat{s} = a_0 + a_1 \cdot UPV^2 + a_2 \cdot UPV$
HUAN11 MART14 HOBB07	$\hat{s} = a_0 + a_1 \cdot UPV + a_2 \cdot R$
EUROCODE 2 [EN 01] MART14	$\hat{s} = a_0 + a_1 \cdot UPV^2 + a_2 \cdot UPV + a_3 \cdot R$
HUAN11 MART14	$\hat{s} = a_0 + a_1 \cdot UPV^3 + a_2 \cdot R^2$ $\hat{s} = a_0 + a_1 \cdot UPV + a_2 \ln(t) + a_3 \cdot AC^{-0.5} + a_4 \cdot R^2$

Huang et al. [HUAN11] desarrollan un estudio en el que comparan los resultados de 11 modelos, algunos de ellos recogidos en la tabla resumen 2.4. Consiguen un mejor ajuste con el modelo más complejo de los que utiliza (ver tabla 2.4), en el que los datos de entrada son la velocidad de ultrasonidos, la edad, la relación agua/cemento y el índice de rebote. Con este modelo obtiene un ajuste con un R^2 de 0.89.

Martínez-Molina [MART14] hace un estudio comparativo de 10 modelos. Ocho de estos modelos utilizan UPV, R, AC y t. Propone otros dos modelos que, además utiliza la frecuencia resonante y la resistividad eléctrica, pero los resultados obtenidos no mejoran de forma significativa con respecto a la formulación de Huang [HUAN11] (que no utilizan frecuencia resonante ni resistividad eléctrica).

Existen algunos estudios en los que se estudia la posibilidad de hallar una mejor predicción de la resistencia a compresión mediante la utilización de ultrasonidos o mediante la combinación de varios ensayos no destructivos, utilizando redes neuronales [TRTN09, SBAR12], que apuntan a que existe la posibilidad de obtener resultados prometedores con redes neuronales y mejorar la precisión de las estimaciones, pero no se propone una ecuación de estimación que contemple algunos factores importantes, que se pueda aplicar de forma sencilla en la práctica. En un reciente estudio, Ayaz et al [AYAZ15] utilizando la regla M5 y tres modelos en árbol M5P, se llega a proponer una ecuación para la estimación de la resistencia a compresión utilizando la velocidad de ultrasonidos modificada, en función de la cantidad de cemento, la cantidad de cenizas volantes, cantidad de escorias y el período de curado. Se estudian 10 dosificaciones distintas en las que se varía la cantidad de cemento, cenizas volantes y escorias. Se adquieren datos de cada dosificación a 4 edades (3, 7, 28 y 120 días). Por tanto, se utilizan los resultados de un total de 40 vectores de datos. Se obtienen buenos resultados de estimación, si bien es necesario apuntar que en dicha investigación no se tiene en cuenta variables tan determinantes en las correlaciones como pueden ser, por ejemplo, la temperatura de curado o la densidad del hormigón resultante.

Capítulo 3. Objetivos específicos

Capítulo 3. Objetivos específicos

3.1. Objetivos específicos

Para que morteros u hormigones con distintos porcentajes de árido reciclado sean comparables, es necesario que, el único factor que varíe en la dosificación sea el porcentaje de sustitución de árido reciclado. Como es sabido, la relación a/c, para ser más concreto, la relación a/c efectiva, influye en los resultados de resistencias. Existen discrepancias entre autores sobre cómo influye la absorción de los áridos reciclados en el ratio a/c efectiva. Por tanto, existen discrepancias en la definición de la corrección del agua para conseguir dosificaciones con distinto porcentaje de sustitución de árido reciclado con el mismo ratio agua/cemento. Por ello, se desarrolla un estudio para la obtención de una definición empírica de la relación a/c efectiva.

En cuanto al estudio de las propiedades de las cenizas de biomasa utilizadas, se diseñará y desarrollará una campaña experimental específica con el fin de observar cual es el efecto de la temperatura en el poder cementante de las mismas.

Ya centrándose en los estudios sobre hormigón propiamente dichos, tanto para hormigones vibrados como para autocompactantes, se analizará la influencia de diversos factores en la de la resistencia a compresión: temperatura de curado, áridos reciclados, la adición de cenizas de biomasa, relación agua/cemento en función de la temperatura de curado. Así mismo se analiza el efecto de la temperatura en la influencia que tienen los materiales valorizados y/o reciclados en la evolución de la resistencia a compresión.

Se estudian varios factores que influyen en la correlación entre resistencia a compresión y ensayos no destructivos: materiales reciclados y/o valorizados, temperatura de curado, relación agua/cemento en función de la temperatura de curado.

Se estudia la influencia de los materiales reciclados y/o valorizados en las correlaciones de resistencia a compresión con varios ensayos no destructivos: velocidad de ultrasonidos, índice de rebote y conductividad eléctrica interna.

Así mismo se estudia la influencia de la temperatura de curado y la influencia de la relación agua/cemento en las correlaciones entre resistencia a compresión y dos ensayos no destructivos: velocidad de ultrasonidos e índice de rebote. Si la temperatura de curado influye en las correlaciones entre ensayos no destructivos y resistencia a compresión de forma significativa, no tener en cuenta la temperatura de curado y el historial de temperaturas internas puede conllevar una sobrestimación en la resistencia a compresión y la consecuente falta de seguridad.

Se desarrolla un estudio para analizar la influencia de los áridos reciclados de hormigón (finos y gruesos) en la energía de activación y en las curvas resistencia a compresión – madurez, con el fin de observar si las hipótesis del método de la madurez son aplicables a los hormigones con árido reciclado y si la sustitución parcial de árido natural o por árido reciclado influye en las constantes de dos

modelos de estimación, ya que según los autores que plantean estos modelos, dichas constantes no dependen del tipo de árido. Se va a verificar si esta afirmación es cierta y el valor de las constantes se puede considerar independiente del tipo de árido, en el caso de eco-hormigones con árido reciclado.

Así mismo, para los eco-hormigones con cenizas de biomasa, se estudia la influencia de las cenizas de biomasa en la energía de activación y en las curvas resistencia a compresión – madurez. También se estudiará la influencia del ratio agua/cemento en la energía de activación y en las curvas de resistencia a compresión – madurez.

A la vista de los resultados, se estudiará la posibilidad de desarrollar una propuesta de un posible modelo formulación para la estimación de la energía de activación en función de los parámetros estudiados.

Se desarrollarán campañas experimentales en fábrica con el fin de observar la influencia de los áridos reciclados finos y gruesos en la madurez en vigas y muros.

Así mismo se desarrollará un estudio sobre la aplicabilidad de la definición del mortero equivalente de la ASTM C1074-11 para el cálculo de la energía de activación y una propuesta de modificación de la ASTM C1074-11 para su aplicación en eco-hormigones con árido reciclado.

Aunando todos los datos obtenidos a lo largo de la tesis, una vez se ha analizado la tendencia de influencia de cada uno de los factores estudiados, se propone una función de estimación de la resistencia a compresión con métodos combinados de ensayos no destructivos y teniendo en cuenta la composición del hormigón, su densidad y su historial de temperatura de curado. Se hace una comparativa del modelo de estimación propuesto y de modelos de estimación propuestos por otros autores. Además, se aplica programación genética orientada con el fin de hallar una función de estimación cuyas estimaciones se sitúen del lado de la seguridad (penalizando las sobrestimaciones).

Además, para edades tempranas (hasta 7 días), para los hormigones vibrados, se analiza la influencia de la adición de cenizas de biomasa en la evolución del módulo de deformación. Así como su influencia en las correlaciones entre módulo de deformación y varios ensayos no destructivos (velocidad de ultrasonidos, índice de rebote y conductividad eléctrica interna).

También se estudia la influencia de la sustitución parcial de los áridos naturales por áridos reciclados (finos y gruesos) en la evolución del módulo de deformación a edades tempranas. Se analiza la influencia de estas sustituciones en las correlaciones entre módulo de deformación y varios ensayos no destructivos, como velocidad de ultrasonidos, índice de rebote o conductividad eléctrica interna.

También se estudiará la influencia de altas temperaturas de curado (40 °C) en la evolución del módulo a edades tempranas para dos de los once hormigones estudiados.

Se estudia la influencia de los materiales reciclados y/o valorizados en las correlaciones módulo de deformación frente a resistencia a compresión, con el fin de observar si la utilización de estos materiales suponen un desvío importante con respecto a los resultados que se obtienen utilizando las fórmulas de estimación de módulo de deformación en función de la resistencia a compresión propuestas por algunas normas y/o estudios.

Teniendo en cuenta todo lo estudiado a lo largo de la presente tesis, se desarrolla una propuesta de control de calidad y mejora de la seguridad para grandes obras.

Capítulo 4. Metodología

Capítulo 4. Metodología

4.1. Designación de los hormigones de estudio. Nomenclatura

Antes de comenzar a exponer cuales han sido las fases del desarrollo metodológico, se ha considerado necesario establecer una nomenclatura para designar los distintos tipos de hormigones y morteros que han sido objeto de estudio en uno o varios estudios de los que se compone esta tesis.

Distintas dosificaciones han sido objeto de estudio en esta tesis. Estas dosificaciones se agrupan en dos grupos a los que se les ha dado un nombre. Las dosificaciones pertenecientes a un misma “grupo de hormigón o de mortero” tienen como punto común que la dosificación de patrón de hormigón es la misma y se utilizarán distintos materiales reciclados.

Se han estudiado dos tipos de hormigones:

- **Hormigón grupo B**

Tipo de hormigón de referencia (B0): hormigón autocompactante de 45 MPa.

Materiales reciclados de sustitución: árido reciclado fino y grueso de hormigón (BH).

Sustituciones de árido natural fino y grueso por árido reciclado: 20% (BH20) y 50% (BH50).

- **Hormigón grupo C**

Tipo de hormigón de referencia (C0): hormigón vibrado de alta resistencia.

Materiales reciclados de sustitución: árido reciclado fino y grueso de hormigón (CH) y cenizas de biomasa (CC).

Sustituciones de árido natural fino y grueso por árido reciclado: 8% (CH8), 20% (CH20) y 31% (CH31).

Sustituciones de cemento por cenizas de biomasa: 15% (CC15) y 30% (CC30).

El hormigón de referencia de este grupo (C0) tiene una relación agua/cemento de 0,45. Además se han estudiado dos variantes, en las que únicamente se modifica la relación agua/cemento, el primero tiene una relación a/c de 0,425 (C0-1) y el segundo de 0,40 (C0-2).

Asimismo se han estudiado dos tipos de mortero:

- **Mortero M**

Tipo de mortero de referencia (M0): mortero convencional compuesto por 1 parte de cemento y 3 de arena.

Materiales reciclados de sustitución: arena reciclada de hormigón (MH).

Sustitución de arena natural por arena reciclada: 25% (MH25), 50% (MH50), 75% (MH75) y 100% (MH100).

- **Mortero ME**

Tipo de mortero de referencia (ME0): mortero equivalente según la ASTM C1074-11 correspondiente a los hormigones tipo B.

Materiales reciclados de sustitución: arena reciclada de hormigón (MEH).

Sustitución de arena natural por arena reciclada: 20% (MEH20) y 50% (MEH50).

4.2. Desarrollo metodológico

El desarrollo metodológico de esta tesis se puede dividir en tres grandes fases.

Fase I: Estudio bibliográfico.

Fase II: Desarrollo de la investigación.

Fase III: Conclusiones y recomendaciones.

A continuación se expone brevemente cual ha sido el desarrollo metodológico de cada una de estas tres fases.

FASE I: ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

En esta primera fase se ha llevado a cabo un completo estudio bibliográfico acerca de los eco-materiales que serán objeto de estudio así como de los estudios con ensayos no destructivos aplicados a dichos materiales. Este estudio se puede dividir en cuatro partes:

- **El material: Eco-hormigón. Estudio de propiedades mecánicas (resistencia a compresión y módulo de deformación)**

Eco-hormigones con árido reciclado de hormigón fino y grueso

Eco-hormigones con cenizas de biomasa

Otro tipo de eco-hormigones

- **Ensayos no destructivos (END) aplicadas al estudio de las propiedades mecánicas de eco-hormigones:**

Ultrasonidos

Esclerómetro

Conductividad eléctrica y resistividad eléctrica

Método de la madurez

Otros métodos no destructivos

Métodos combinados

- **Influencia de la temperatura y edades tempranas**

Influencia de la temperatura en la evolución de la resistencia a edades tempranas.

Influencia de la temperatura en la evolución del módulo a edades tempranas.

Influencia de la temperatura en las correlaciones entre END y propiedades mecánicas del hormigón.

- **Estimación de la resistencia a compresión y módulo de deformación con END**

Estimación en hormigones convencionales.

Estimación en hormigones con materiales reciclados.

FASE II: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

Esta fase se divide en **cuatro partes**, las dos primeras: “**Caracterización de materiales**” y “**Definición empírica de la relación a/c efectiva**” son estudios previos para posibilitar un adecuado desarrollo de la tercera y primordial parte dentro de esta fase II: el “**desarrollo de las campañas experimentales y análisis de datos**”. En la cuarta y última parte, se desarrolla una “**propuesta de nuevo procedimiento de caracterización de hormigones estructurales para grandes obras y mejora del control de calidad**”. En esta última parte, además, se analiza las ventajas que tendría el procedimiento propuesto tanto a corto como a largo plazo.

A continuación se explicará el desarrollo de las campañas experimentales que se han llevado a cabo así como los materiales que han sido objeto de estudio en cada una de ellas. Las campañas experimentales se pueden agrupar en cuatro grandes grupos.

Primer grupo de campañas experimentales: *Estudio de la influencia de la temperatura de curado y de otros factores en la evolución de la resistencia a compresión y de sus correlaciones con END.*

Se desarrolla un estudio sobre la influencia de varios factores (temperatura de curado, relación a/c, cantidad de material reciclado y/o densidad) en la evolución de la resistencia a compresión y de sus correlaciones con ensayos no destructivos (END).

Este estudio a edades tempranas y a 28 días se ha desarrollado para todos los hormigones. En primer lugar se ha desarrollado el estudio de la influencia de la temperatura de curado y, una vez hecho este estudio, se ha desarrollado una función de estimación de la resistencia a compresión en función de los resultados obtenidos de los ensayos no destructivos (ultrasonidos y esclerómetro), de la cantidad de material reciclado y de la temperatura de curado. Además, para el hormigón convencional sin materiales reciclados de mayor resistencia (C0), se desarrolla un estudio de la influencia de la relación agua/cemento en las correlaciones entre END y resistencia a compresión y se propone un coeficiente

de corrección. Se aplica este coeficiente de corrección en la función de estimación de la resistencia conjunta para todos los hormigones, para comprobar si esta corrección mejora los resultados de estimación y, por tanto, se puede aplicar en un amplio abanico de hormigones o si, por el contrario, solo es aplicable en el hormigón en el que se ha estudiado. En la tabla 4.1 se resumen todos los estudios realizados en este primer grupo.

Tabla 4.1. Estudios realizados en el primer grupo de campañas experimentales

Estudios\Dosificaciones	Hormigones B Autocompactante		Hormigones C Vibrado			
	B0	BH20 BH50	C0	CH8 CH20 CH31	CC15 CC30	C0-1 C0-2
Influencia de los materiales reciclados en la cinética de evolución de la resistencia	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Influencia de los materiales reciclados en curvas de correlación con END	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Influencia de la tª de curado en correlaciones y en la cinética de evolución	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Influencia de la relación a/c en las correlación ultrasonidos/resistencia. Propuesta de nuevo coeficiente de corrección.	-	-	✓	-	-	✓
Propuesta de función de estimación de la resistencia a compresión en función de las variables estudiadas.	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Segundo grupo de campañas experimentales: *Estimación de la resistencia a compresión in situ en función del historial de temperaturas internas y de los resultados de END. Aplicación a obras reales.*

En la tabla 4.2 se resumen los trabajos realizados en esta campaña.

Tabla 4.2. Estudios realizados en el segundo grupo de campañas experimentales

Estudios\Dosificaciones	Hormigones B Autocompactante		Hormigones C Vibrado			
	B0	BH20 BH50	C0	CH8 CH20 CH31	CC15 CC30	C0-1 C0-2
Influencia de los materiales reciclados en la energía de activación	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Estimación de la resistencia a compresión mediante aplicación del método de la madurez	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Propuesta de nuevo método combinado para la estimación de resistencia a compresión en función del historial de temperaturas y de los resultados de END	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Aplicación en casos reales	✓	✓	✓	✓	-	-

Tercer grupo de campañas experimentales: Estudio de la evolución del módulo de deformación en los hormigones de alta resistencia.

Para el grupo de hormigones de alta resistencia (hormigones C) se ha desarrollado un estudio más profundo, en el que se analiza la evolución del módulo de deformación y de la conductividad eléctrica, así como la relación entre ambos. Se estudia además, la influencia de los materiales reciclados en la evolución de la conductividad y del módulo de deformación. En la tabla 4.3 se indican los estudios realizados en este grupo.

Tabla 4.3. Estudios realizados en el cuarto grupo de campañas experimentales

Estudios\Dosificaciones	Hormigones C Vibrado		
	C0	CH8 CH20 CH31	CC15 CC30
Influencia de los materiales reciclados en la evolución del módulo de deformación a edades tempranas mediante la aplicación del novedoso método EMM-ARM.	✓	✓	✓
Influencia de los materiales reciclados en la evolución de la conductividad eléctrica interna	✓	✓	✓
Correlaciones entre módulo de deformación y END, así como la influencia de los materiales reciclados en dichas correlaciones	✓	✓	✓
Comparativa entre resistencia a compresión y módulo a edades tempranas con respecto a la influencia de los materiales reciclados.	✓	✓	✓

Cabe apuntar que se han realizado 4 estudios complementarios que no aparecen de forma explícita en los cuadros anteriores y que son de vital importancia.

1. Influencia de la relación a/c en la evolución de la resistencia en función de la temperatura de curado y en la correlación ultrasonidos/resistencia, para lo que se utilizan los hormigones C0, C0-1 y C0-2.
2. Búsqueda de una definición empírica de la relación a/c efectiva en función de la absorción de los áridos, para lo que se recurre a los morteros M0, MH25, MH50, MH75 y MH100.
3. Comprobación de si la ASTM C1074-11 [RN04] es aplicable para hormigones con árido reciclado y si es posible la utilización del mortero equivalente tal y como lo describe la ASTM para la determinación de la energía de activación. Para ello utilizamos los morteros ME0, ME20 y ME50.
4. Influencia de la temperatura en la activación del poder cementante de las cenizas de biomasa.

FASE III: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta fase se exponen las conclusiones de los estudios desarrollados, las recomendaciones así como las líneas de futuras investigaciones.

4.3. Equipamiento específico para ensayos no destructivos y procedimientos

Además de utilizar los procedimientos descritos en las normativas UNE correspondientes, para hacer las caracterizaciones de los materiales y hallar la resistencia a compresión, módulo de deformación, etc. Se han utilizado una serie de métodos y procedimientos específicos que serán descritos en este apartado.

4.3.1. Equipamiento específico para ensayos no destructivos

4.3.1.1. Velocidad de ultrasonidos

En cada probeta se hacen dos mediciones directas en caras opuestas y planas. El valor de la velocidad de ultrasonidos de la probeta se tomará como la media de los valores obtenidos. Se utiliza el procedimiento empleado en el proyecto técnico [VELA11], que se ajusta a la norma UNE-EN12504-4 [EN12]:

Se marca con una plantilla la posición centrada de los palpadores en cada una de las caras. Se hacen dos mediciones directas (en caras opuestas y paralelas) utilizando gel acoplador y se comprueba que el acoplamiento sea mayor del 90%. Si las mediciones difieren mucho, se repinten ambas mediciones. En caso de, una vez repetidas las mediciones, los valores de una misma probeta varíen más de 10%, el valor se debe desechar, debido a que es muy probable que la probeta tenga alguna heterogeneidad y no sea representativa del valor medio del hormigón. En caso de que las mediciones sean similares, se halla la media aritmética y ese será el valor de ultrasonidos asignado a esa probeta, a la edad de ensayo.

Para la medición se utiliza un equipo de medición de ultrasonidos llamado PunditLab de Procec. Los palpadores utilizados tienen una frecuencia de 54Hz.

En la figura 4.1 se observa la colocación de los palpadores para una medición directa, utilizando el PunditLab.



Figura 4.1. Ensayo para medición de velocidad de ultrasonidos

4.3.1.2. Índice de rebote (esclerómetro)

En cada probeta se hacen al menos 9 mediciones en una cara, teniendo especial cuidado en guardar la verticalidad del esclerómetro, que tendrá una dirección perpendicular a la superficie de ensayo. El valor del índice de rebote es la mediana de los valores obtenidos. Los valores obtenidos que se desvían más de 6 unidades de la mediana son descartados, tal y como indica la norma UNE-EN 12504-2 [EN11].

En la figura 4.2. se muestra una fotografía en la que se hace uso del martillo para ensayos de hormigón Original Schmidt (esclerómetro) Proceq, que se ha utilizado en las mediciones de índice de rebote en la presente tesis.



Figura 4.2. Ensayo para medición de índice de rebote

4.3.1.3. Conductividad eléctrica interna en continuo (ConSensor)

Para la medición de la conductividad eléctrica se ha utilizado un aparato que mide conductividad eléctrica y temperatura interna se ha utilizado un equipo llamado CONSENSOR. Este aparato utiliza un

sensor exterior embebido. Se trata de un sensor analógico que mide la conductividad eléctrica con un amplio rango dinámico y aproximadamente 100 KHz, usando un método de 2 puntos y temperatura (NTC) [CONS16].

Para efectuar las mediciones, se ha fabricado una probeta de hormigón de dimensiones 300 mm x 200 mm x 110 mm para cada una de las dosificaciones, con un molde no conductor (de plástico) para que no interfiera en las mediciones. Antes del hormigonado, se instala un sensor que mide a un tiempo conductividad eléctrica y temperatura interna, tal y como se especifica en la figura 4.3a. Se han tomado medidas de conductividad y temperatura interna cada 10 minutos.

Se ha escogido este método debido a que existen estudios que relacionan la conductividad con las propiedades mecánicas del hormigón [WEI11] Gracias al sensor embebido y al sistema de adquisición de datos automático que realiza una medida de conductividad cada 10 minutos, es posible registrar la evolución de la conductividad a edades tempranas. En la figura 4.3a se muestra el esquema de colocación del sensor y en la 4.3b fotografías del equipo y de la probeta instrumentada.

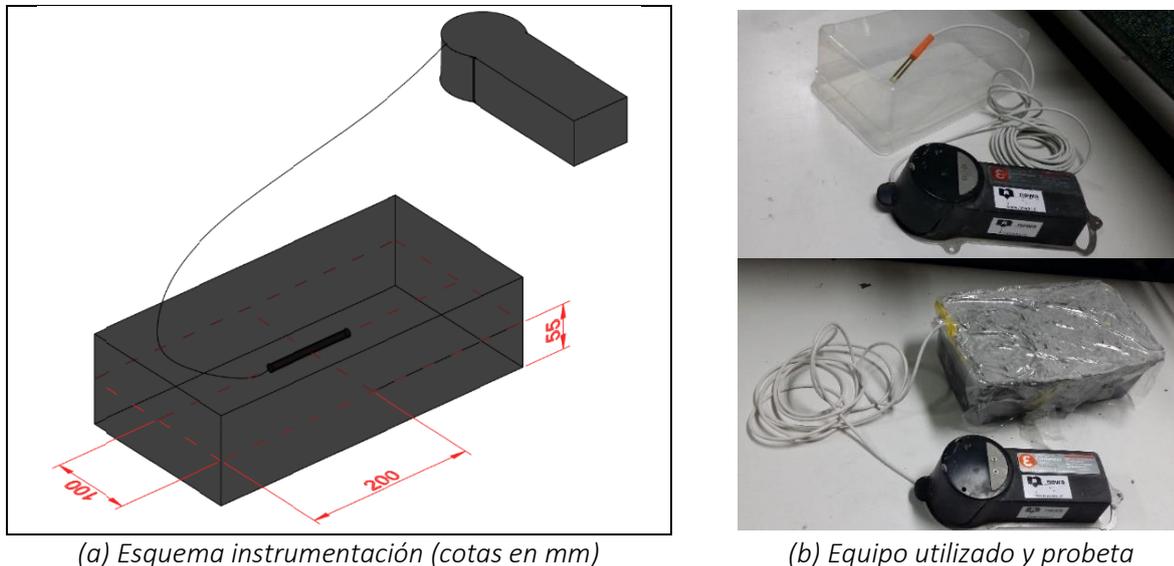


Figura 4.3. Ensayo de conductividad eléctrica

4.3.1.4. Módulo de deformación en continuo (EMM-ARM)

El EMM-ARM (*E-Modulus Measurement through Ambient Response Method*) es un novedoso método de monitorización de la evolución del módulo de deformación de forma automática, desde el momento en el que finaliza el hormigonado, por ello este método ha sido elegido para poder analizar la influencia de las cenizas en la cinética de evolución del módulo de deformación a edades tempranas.

Este método se basa en la identificación continua modal de la frecuencia resonante a la flexión en la viga de hormigón y su efectividad fue validada en estudios anteriores [AZEN10, MAIA11, AZEN12, GRAN16].

En este estudio se ha aplicado este método en dos vigas para cada dosificación. Las vigas empleadas tienen una sección transversal circular de 98 mm de diámetro y una luz de 1 metro (Figura 4.4). Se ha registrado una medición de módulo de deformación cada 12 minutos, por lo que las curvas de

evolución del módulo de deformación quedan completamente definidas. En la figura 4.4 (a) se muestra el esquema de este ensayo y en la figura 4.4 (b) una fotografía del ensayo.

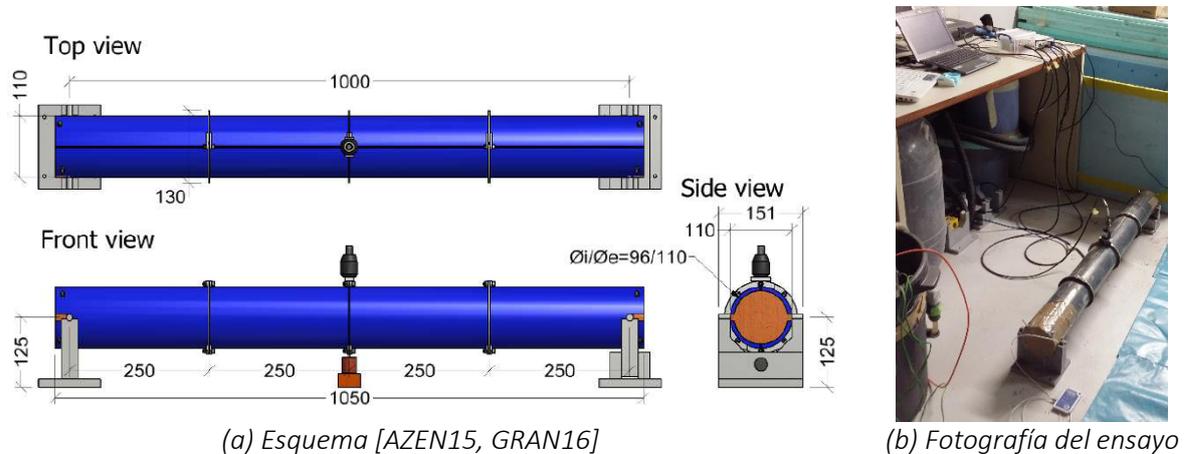


Figura 4.4. Ensayo EMM-ARM para monitorización de módulo de deformación

Pese a que el EMM-ARM es un método de monitorización del módulo de deformación que ya ha sido verificado en otros estudios [AZEN10, MAIA11, AZEN12, GRAN16], se hace una comprobación para el hormigón de referencia (C0). Para ello se ha hallado el módulo de deformación del hormigón C0 a 7 días de edad según lo establecido en la normativa europea para la evaluación del módulo de deformación (UNE-EN 12390-13). Se han fabricado tres probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura. Se han utilizado estas probetas, debido a que tienen una sección similar a la de las vigas del EMM-ARM y se ha comprobado que las temperaturas internas desarrolladas en estas probetas son prácticamente iguales que las desarrolladas en el EMM-ARM.

Con el fin de observar la influencia de la temperatura, para dos de los hormigones (C0 y CH8), se han curado vigas de EMM-ARM a 40°C (Además de las de 20°C), con el fin de poder observar la influencia de la temperatura en la evolución del módulo de deformación.

4.3.1.5. Frecuencia interna de microondas en mortero fresco (Cementómetro)

El cementómetro de James Instruments [CEME16], es un aparato que mide la frecuencia de microondas, relacionada de forma directa con la humedad de la mezcla: debido a que la constante dieléctrica del agua es de cuatro a ocho veces mayor que la mayoría de los áridos y los cementos, los cambios en el contenido de agua afectan directamente a las medidas del sensor del cementómetro. Tal y como se puede observar en la fotografía de la figura 4.5 tiene un sensor con dos puntas que deben estar en contacto con el hormigón fresco en el momento de la medición.



Figura 4.5. Cementómetro con sonda

4.3.1.6. Registradores de temperatura interna

En la figura 4.6 se muestra una fotografía de un registrador de temperatura con un sensor resistente al agua, ambos de distribución comercial, de la marca LogTag. El registrador es un Trex-8 y el sensor externo un ST100S-15. Su rango de temperatura operativa va desde -40°C hasta $+85^{\circ}\text{C}$, y su precisión es de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ para temperaturas entre -10°C y $+40^{\circ}\text{C}$, y una precisión mejor que $\pm 0,7^{\circ}\text{C}$ para temperaturas entre $+40^{\circ}\text{C}$ y $+60^{\circ}\text{C}$, tal y como se indica en especificaciones técnicas del conjunto [LOGT14]. En un primer momento se utilizaron registradores de temperatura interna fabricados según las indicaciones del proyecto técnico publicado por Federico Laport en 2011 [LAP011], pero se tomó la decisión de usar los registradores LogTag de forma sistemática ya que, debido a la evolución del mercado, el coste económico del LogTag es menor, además no precisa de la fabricación del sensor ni de su caja y su fiabilidad es mayor.



Figura 4.6. Registrador de temperatura interna y sensor LogTag

4.3.2. Amasadas de hormigones

4.3.2.1. Procedimiento de amasado

- Hormigón autocompactante:
 - Se humedece la amasadora y los instrumentos que se utilizarán posteriormente para el llenado de probetas con un paño húmedo.
 - Se introduce la arena natural en la amasadora y se amasa durante 30 segundos.
 - Se añade el filler y se amasa 60 segundos.
 - Se añade el cemento y se amasa otros 60 segundos.
 - Se añaden el árido reciclado (grueso y fino) y el árido natural grueso y se mezcla durante otros 60 segundos.
 - Durante los siguientes 30 segundos se va añadiendo el agua, sin parar la amasadora. (A partir de este momento, se empieza a contabilizar la edad del hormigón, es el llamado t_0).
 - Se mezcla durante 60 segundos.
 - Sin parar la amasadora, se añade los aditivos lentamente, durante 30 segundos.
 - Se sigue mezclando hasta que la potencia consumida por la amasadora sea prácticamente constante.
- Hormigón vibrado:
 - Se humedece la amasadora y los instrumentos que se utilizarán posteriormente para el llenado de probetas con un paño húmedo.
 - Se introduce la arena natural en la amasadora y se amasa durante 30 segundos.
 - Se añade el cemento y se amasa otros 60 segundos.
 - Se añaden el árido reciclado (grueso y fino) y el árido natural grueso y se mezcla durante otros 60 segundos.
 - Durante los siguientes 30 segundos se va añadiendo el agua, sin parar la amasadora. (A partir de este momento, se empieza a contabilizar la edad del hormigón, es el llamado t_0).
 - Se mezcla durante 60 segundos.
 - Sin parar la amasadora, se añade los aditivos lentamente, durante 30 segundos.
 - Se sigue mezclando hasta que la potencia consumida por la amasadora sea prácticamente constante.

4.3.2.2. Amasada base

La *amasada base* se hace para cada uno de los 11 hormigones de estudio con el fin de obtener una parte importante de los datos necesarios para el desarrollo de esta tesis. En cada *amasada base* se fabrican un total de, al menos, 60 probetas cúbicas de 100 mm de lado, siguiendo la norma ENE-EN 12390-2. En la figura 4.7 se muestra un ejemplo de la fabricación de esta *amasada*.



Figura 4.7. Amasada base durante el vibrado

Estas probetas se dividen en tres grupos de 20 probetas. Cada grupo de probetas se va a curar a una cierta temperatura (5°C, 20°C o 45°C). La temperatura de los materiales antes de la *amasada* es igual a la del laboratorio (18-20°C). Se consideró la posibilidad de hacer tres *amasadas* (una para cada temperatura) y que los materiales fuesen precalentados/enfriados, para que desde el instante cero, el hormigón estuviese a una temperatura similar a la temperatura de curado que le correspondiese; pero se tomó la decisión de hacer un única *amasada* para cada hormigón, con el fin de poder comparar los resultados de un mismo hormigón a distintas temperaturas de curado, teniendo la seguridad de que se trata del mismo hormigón, de la misma *amasada* y que no ha habido ningún agente externo que pueda haber modificado el hormigón durante el *amasado*.

Una vez se ha hormigonado, las probetas se cubren con un fino plástico, un paño a temperatura correspondiente (húmedo) y una última capa de plástico, con el fin de que, durante el curado, no se pierda agua por evaporación. Seguidamente, los moldes se introducen en las cámaras de curado a su temperatura correspondiente, no habiendo transcurrido más de 30 minutos desde el instante cero. De las 20 probetas de cada temperatura, 2 se instrumentan con sensor de temperatura interna (figura 4.8). Estas dos probetas instrumentadas de cada temperatura se romperán a compresión a una edad superior a los 90 días, con el fin de obtener un valor de resistencia a compresión próximo al valor de la resistencia a tiempo infinito o resistencia a compresión estabilizada. En la figura 4.8 se muestra una probeta instrumentada con sensor de temperatura interna cuando se están descargando los datos en un ordenador.

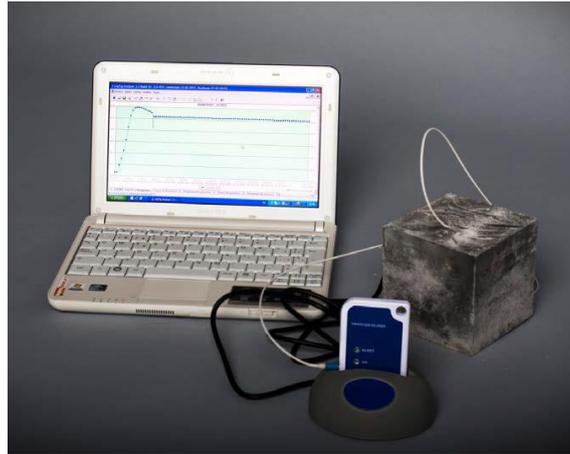


Figura 4.8. Probeta instrumentada con sensor de temperatura interna

Las probetas de temperatura de curado 5°C, 20°C y 45°C se curan en cámaras de temperatura controlada durante el primer día, en el molde. Una vez es posible su desmoldeo, las probetas se sumergen en cubetas de agua, que se encuentran dentro de las mismas cámaras de temperatura controlada, a excepción de las probetas curadas a 45°C. Las probetas curadas a 45°C, durante el primer día se curan en una cámara de curado con temperatura de curado (en este caso en una estufa de cultivo) y, una vez es posible su desmoldeo, se curan sumergidas en agua en un baño termostático de temperatura controlada. En la figura 4.9 se los distintos equipamientos utilizados para el curado del hormigón a distintas temperaturas.



(a) Temperatura de curado: 5°C (1^{er} día en molde, después en cubetas de agua)

(b) Temperatura de curado: 45°C (durante el 1^{er} día, en moldes)



(c) Temperatura de curado: 45°C (una vez desmoldados)

Figure 4.9. Curado de probetas de la amasada base

Se ensayan 3 probetas de cada temperatura a 1, 2, 3, 4 ó 6, 7 y 28 días. Los ensayos a los que se someterán estas probetas son los siguientes:

- 1º- Medición de la velocidad de ultrasonidos (descrito en el apartado 4.3.4).
- 2º- Medición de índice de rebote (descrito en el apartado 4.3.5).
- 3º- Rotura a compresión según la UNE-EN 12390-3.

Con los valores de la resistencia a compresión obtenidos para todas las probetas de esta amasada se calcula la energía de activación tal y como se describe en el capítulo 2, según la ASTM C1074-11 [RN04].

4.3.2.3. Amasada base + conductividad eléctrica

Para los hormigones C0, CH y CC, en la misma amasada base, además de las probetas cúbicas, se instrumenta una probeta con un sensor interno para la medición de la conductividad eléctrica y la temperatura interna. En la figura 4.10 se muestra fotografías ejemplo de esta amasada. La definición de las dimensiones de la probeta y del procedimiento para la medición de la resistividad se expone en el apartado 4.3.5.

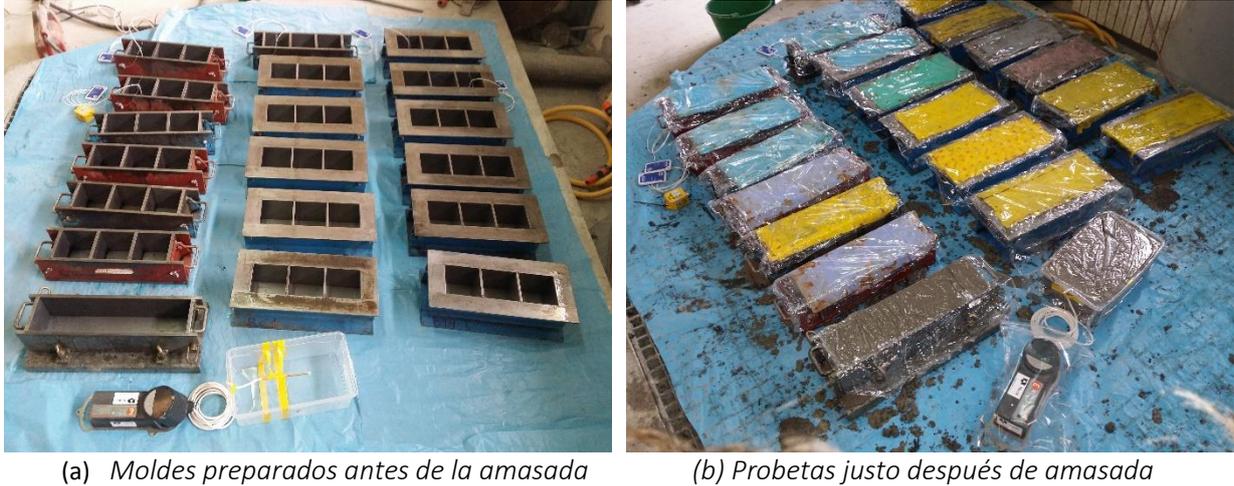


Figura 4.10. Amasada base + conductividad

4.3.2.4. Amasada para monitorización del módulo de deformación (amasada EMM-ARM)

Para los hormigones C0, CH y CC se realizan unas amasadas para la fabricación de dos vigas para la aplicación del método EMM-ARM (apartado 4.3.6) y para la fabricación de probetas de control. En la figura 4.11 se muestra un ejemplo de las probetas realizadas en estas amasadas.



Figura 4.11. Amasada para módulo de deformación

4.3.2.5. Amasadas en fábrica

Para los hormigones B0, BH, CO y CH8, se efectúan amasadas en las plantas de prefabricado para la fabricación de distintas piezas estructurales y probetas de control.

4.3.2.6. Resumen de amasadas

En la tabla 4.4 se recoge un resumen con las amasadas realizadas en laboratorio y/o en fábrica de cada uno de los hormigones estudiados.

Tabla 4.4. Amasadas de hormigón efectuadas

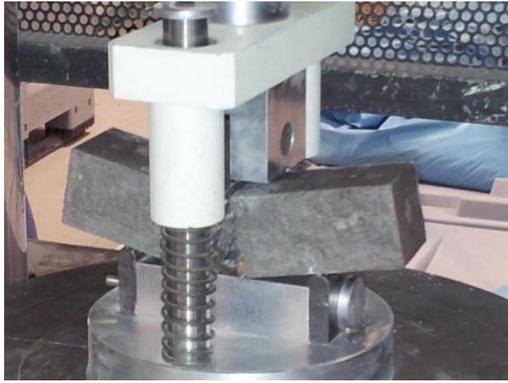
Amasada de hormigón	B0	BH20 BH50	CO	CH8	CH20 CH31	CC15 CC30	CO-1 CO-2
Amasada base	X	X	X	X	X	X	X
Resistividad			X	X	X	X	
Amasada EMM-ARM			X	X	X	X	
Amasadas en fábrica	X	X	X	X			

4.3.3. Amasadas efectuadas para cada mortero

4.3.3.1. Amasadas para energía de activación

Para los morteros ME0, MEH20 y MEH50, se han fabricado 54 probetas de mortero de dimensiones 40 mm x 40 mm x 160 mm, siguiendo la UNE-EN 196-1. De las 54 probetas de cada dosificación, 18 se han curado a 5°C, otras 18 probetas a 20°C y las 18 restantes a 45°C. Para su correcto curado, desde ese mismo momento y durante el primer día se han curado en cámaras de temperatura controlada, cubiertas por unos paños húmedos y envueltas en plástico transparente adhesivo, a la temperatura correspondiente. A un día de edad, se desmolda (siempre que sea posible debido a su consistencia), y se vuelven se introducen cuanto antes en baños de agua a la temperatura correspondiente a cada probeta. El curado de las probetas de 5°C y 20°C se hacen en sus correspondientes cámaras de temperatura de curado, en unos recipientes que contienen agua a la temperatura correspondiente. Las probetas de 45°C, se curan sumergidas en agua, en el interior de un baño termostático de temperatura controlada (figura 4.9c).

Las edades de ensayo fijadas son: 1, 2, 3, 4, 7 y 28 días. Para cada una de las edades y temperaturas, siguiendo la norma UNE-EN 196-1, se han ensayado 3 probetas de mortero primero a flexión (figura 4.12a) y, cada una de los das dos mitades resultantes de dicho ensayo, se ha ensayado a compresión (figura 4.12b), es decir, para cada edad y temperatura se tienen 6 datos de resistencia a compresión. La media de estos datos proporciona el valor medio de la resistencia para cada edad y temperatura.



(a) Ensayo a flexión



(b) Ensayo a compresión

Figura 4.12. Ensayos de las probetas de mortero

Aplicando el método descrito en la ASTM C1074-11 [RN04], se obtienen las energías de activación de cada uno de los morteros equivalentes estudiados.

4.3.3.2. Amasadas para definición de agua/cemento efectiva

Como ya se ha explicado anteriormente, la constante dieléctrica del agua es de cuatro a ocho veces mayor que la mayoría de los áridos y los cementos, los cambios en contenido de agua directamente afectan las medidas del sensor del cementómetro. Por ello, se plantea su uso para determinar de forma empírica la definición agua/cemento efectiva.

Para ello se realizan una serie de amasadas en las que se va variando los áridos de forma que la capacidad total de absorción de los áridos de la mezcla vaya variando. Para cada una de las mezclas, se hacen mediciones con varios ratios de agua/cemento distintos.

Para las amasadas de los morteros M0, MH25, MH50, MH75 y MH100 se ha utilizado una amasadora de material no conductor, de forma que el recipiente de la amasadora no interfiera en las mediciones de frecuencia de microondas en mortero fresco con cementómetro. Todos los áridos se introducen secos.

Para cada porcentaje de sustitución se hace una amasada, dicha amasada comienza con una relación a/c real baja y se hacen más de 12 medidas de frecuencia y se halla la media. Se añade el agua necesaria para llegar a la siguiente relación a/c real y se repite la operación de hacer más de 12 medidas de frecuencia y hallar la media. Este proceso se repite todas las veces posibles hasta que la mezcla ya tiene un exceso de agua y está demasiado líquida. En la figura 4.13 se muestra la amasada en recipiente no conductor y cementómetro con el sensor en la mezcla.

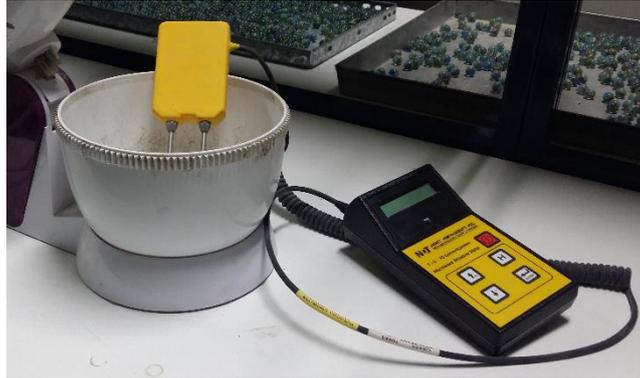


Figura 4.13. Amasada de mortero para definición de a/c efectiva

4.3.4. Procedimiento para la obtención de la energía de activación

Para los todos los hormigones se ha calculado la energía de activación siguiendo la ASTM C1074-11 [RN04]. Existe una modificación con respecto a lo estipulado en dicha norma: en vez de probetas cilíndricas se utilizan probetas cúbicas, debido a una cuestión de operatividad (capacidad del baño termostático y de las cámaras de temperatura controlada). Pese a esta modificación, en el documento se hablará de esta energía de activación calculada según lo descrito en este apartado como “la energía de activación según la ASTM C1074-11” debido a que se sigue la misma filosofía que en dicha norma para el cálculo de la energía de activación (utilizando la resistencia de probetas curadas a tres temperaturas y ensayadas a varias edades).

No se utiliza el método del mortero equivalente descrito en la ASTM C1074-11 [RN04] debido a que existen serias dudas de que sea aplicable para hormigones con árido reciclado, tal y como se expondrá y desarrollará en el apartado 8.4. Por ello, se han utilizado probetas de hormigón y no de mortero equivalente.

Para el cálculo de la energía de activación es necesario obtener la evolución de la resistencia a compresión a tres temperaturas de curado. Para ello, se obtienen la resistencia a compresión a 6 edades distintas para cada temperatura de curado. Debido a que el hormigón es de endurecimiento rápido apenas hay diferencia entre la resistencia a 7 y 28 días, las edades de ensayo planificadas son: 1, 2, 3, 4, 7 y 28 días. Tal y como ya se ha indicado en apartados anteriores, las dos probetas restantes de cada temperatura se ensayan a edad mayor de 90 días con el fin de obtener un valor de resistencia a compresión próximo al valor de resistencia estabilizada (S_{∞}).

Capítulo 5. Caracterización de materiales

Capítulo 5. Caracterización de los materiales

5.1. Hormigones grupo B

5.1.1. Materiales para la fabricación de los hormigones del grupo B

El árido reciclado utilizado en los hormigones del grupo B es un árido reciclado fino y grueso procedente de rechazos de piezas prefabricadas de entre 35 y 45 MPa, se incluyen fotografías en la figura 5.1. Después del tratamiento conveniente (machaqueo, separación magnética y tamizado de 12 mm), se ha obtenido la fracción 0/12 (ARH1). Con el fin de obtener un hormigón resultante más sostenible, se decide no separar la arena reciclada y la grava reciclada mediante tamizado; de este modo, se consigue un ahorro en la energía consumida para la obtención de los áridos reciclados.



Figura 5.1. Acopios utilizados para fabricar el árido reciclado ARH3

Además del árido reciclado de hormigón fino y grueso ARH1, para la fabricación de los hormigones de clase B se ha utilizado un cemento CEM I-52.5 N/SR, un filler cuarcítico, dos fracciones de árido natural fino cuarcítico 0/2.5 (A1) y 0/5 (A2) y una gravilla granítica 6/12 (G1). En la figura 5.2 se incluyen fotografías de las arenas y las gravas utilizadas.



Arena 0/2,5 (A1)

Arena 0/5 (A2)

Gravilla 6/12 (G1)

A.R. de hormigón
0/12 (ARH1)

Figura 5.2. Fotografías de los áridos utilizados en los hormigones B

La granulometría de los áridos empleados en los hormigones B, según la Norma UNE-EN-933-1, se incluye en la tabla 5.1 y en la figura 5.3.

Tabla 5.1. Granulometría de los áridos utilizados en los hormigones B

Tamiz (mm)	% acumulado que pasa			
	A1	A2	G1	ARH1
0,063	1,9	1,5	0,4	3,6
0,125	3,4	5,3	0,6	5,7
0,25	9,9	17,1	0,9	9,0
0,5	32,7	40,7	1,4	12,6
1	62,5	63,0	2,0	16,6
2	89,8	79,6	2,7	24,1
4	99,9	91,6	3,7	40,6
5	100	96,5	5,1	53,0
5,6	100	97,9	6,0	56,4
6,3	100	99,6	11,5	68,2
8	100	100	34,9	84,2
10	100	100	86,4	98,4
11,2	100	100	98,6	99,7
12,5	100	100	100	99,9
14	100	100	100	100
16	100	100	100	100
20	100	100	100	100
25	100	100	100	100

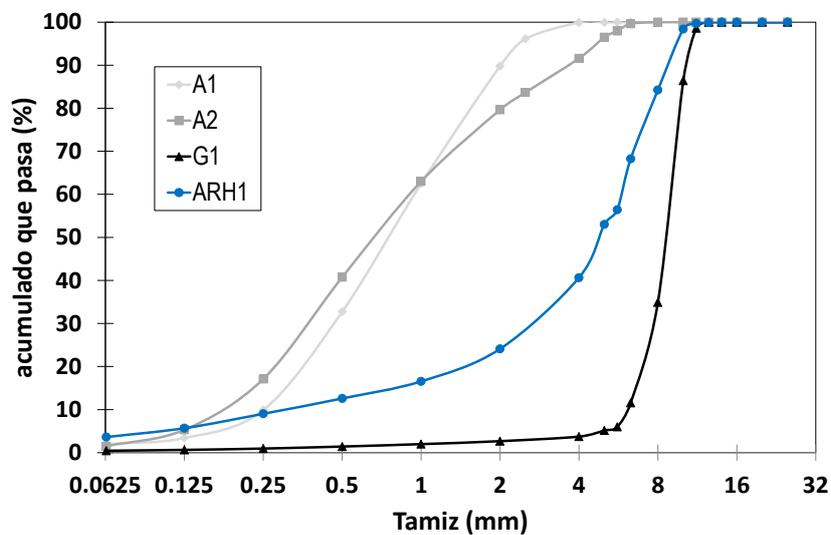


Figura 5.3. Granulometría de áridos utilizados en los hormigones B

La composición del árido reciclado se ha hecho siguiendo la Norma UNE-EN-933-11 y se recoge en la tabla 5.2 y en la figura 5.4.

Tabla 5.2. Composición de los áridos reciclados utilizados en los hormigones B

Componente	Descripción	ARH1
FL (cm ³ /kg)	Partículas flotantes	0,35
X (%)	Cohesivos (arcilla y arena). Varios: metales, madera no flotante y caucho. Yeso	0,1
Rc (%)	Hormigón, productos de hormigón, mortero. Unidades de albañilería de hormigón	93
Ru (%)	Áridos no tratados, piedra natural. Áridos tratados con conglomerantes hidráulicos.	6,7
Rb (%)	Unidades de albañilería de arcilla (ladrillos y tejas) Unidades de albañilería de silicato cálcico. Hormigón aireado no flotante	0
Ra (%)	Materiales bituminosos	0
Rg (%)	Vidrio	0

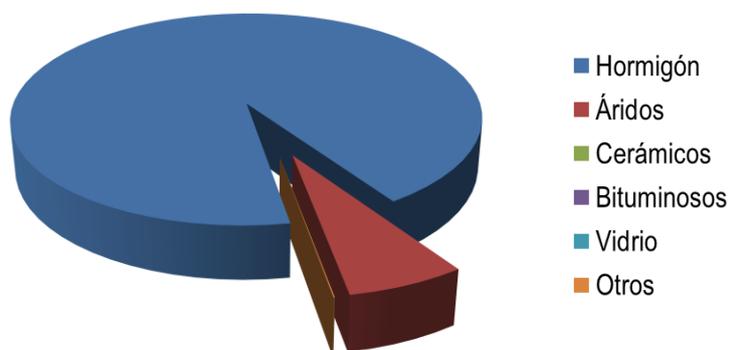


Figura 5.4. Composición del árido reciclado utilizado en los hormigones B

Otros ensayos de caracterización de estos áridos se adjuntan en la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Propiedades de los áridos utilizados en los hormigones B

Propiedad	Norma (UNE-EN)	A1	A2	G1	ARH1
Densidad aparente de partículas (Mg/m ³)	1097-6	2,79	2,90	2,62	2,55
Densidad de partículas tras secado en estufa (Mg/m ³)	1097-6	2,74	2,88	2,55	2,21
Densidad de partículas saturadas con superficie seca (Mg/m ³)	1097-6	2,76	2,88	2,58	2,34
Absorción (%)	1097-6	0,67	0,19	1,04	6,06
Contenido finos (< 0,063 mm) (%)	933-1	1,94	1,49	0,43	3,61
Contenido de arena (< 4 mm) (%)	933-1	---	---	3,72	40,64
Índice de lajas	933-3	---	---	---	5
Coeficiente de Los Ángeles	1097-2	---	---	---	38

El árido reciclado total tiene un 40% de arena que será un sustitutivo parcial de la arena natural A2 y en un 60% de gravilla, que sustituirá parcialmente a la gravilla natural G1, debido a la semejanza de sus granulometrías. En la figura 5.5 se puede observar como las curvas granulométricas conjuntas se adaptan bien a la del hormigón de referencia.

5.1.2. Dosificación y datos básicos de los hormigones del grupo B

Las sustituciones de árido reciclado se calculan en base total del árido natural. Se estudian dosificaciones con un 0%, 20% y 50% del árido total. La tabla 5.4 contiene las dosificaciones de los hormigones del grupo B que han sido estudiadas. Se puede comprobar que efectivamente la cantidad de árido reciclado en el hormigón BH50 es mayor que la cantidad de árido grueso de la dosificación de referencia (B0).

Tabla 5.4. Dosificaciones de los hormigones B

Material (kg/m ³)	B0	BH20	BH50
Cemento I 52.5 N/SR	335	335	335
Filler	320	320	320
Arena 0/2.5 (A1)	370	370	370
Arena 0/5 (A2)	510	375	172
Gravilla 6/12 (G1)	810	607	303
Árido reciclado 0/12 (ARH1)	---	338	845
Aditivo	5,4	5,4	5,4
Agua /cemento efectiva	0,50	0,50	0,50

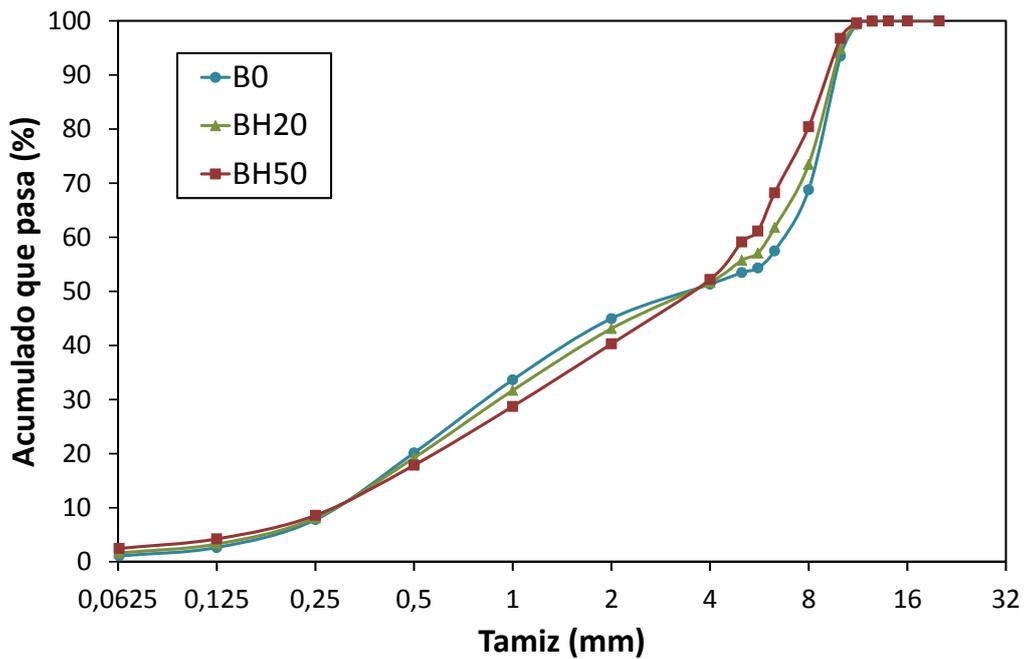


Figura 5.5 Curvas de granulometrías conjuntas de hormigones B

5.2. Hormigones grupo C

5.2.1. Materiales para la fabricación de los hormigones del grupo C

5.2.1.1. Áridos para hormigones del grupo C

El árido reciclado (ARH2) utilizado procede del reciclado de traviesas prefabricadas de hormigón con resistencias del hormigón de más de 35 MPa, convenientemente tratadas. En la figura 5.6 se adjunta una fotografía de las traviesas. Por las mismas razones que en el caso anterior se ha tomado la fracción 0/12. Para ello ha sido necesario un procedimiento de machaqueo, separación magnética y tamizado de 12 mm.



Figura 5.6. Fotografía de acopio de traviesas de hormigón

Además, para todos estos hormigones, se ha utilizado un cemento CEM I 52.5 S/SR-3, dos fracciones de árido fino cuarcítico 0/2 (A3) y 0/5 (A4) y dos fracciones de árido grueso (anfíbolita) 4/12 (G2) y 10/20 (G3). En la figura 5.7 se adjunta fotografías de todos los áridos utilizados en los hormigones C.

La granulometría de todos los áridos se ha obtenido de acuerdo a la UNE-EN 933-1 utilizados en estos hormigones se recoge en la tabla 5.5 y en la figura 5.8.

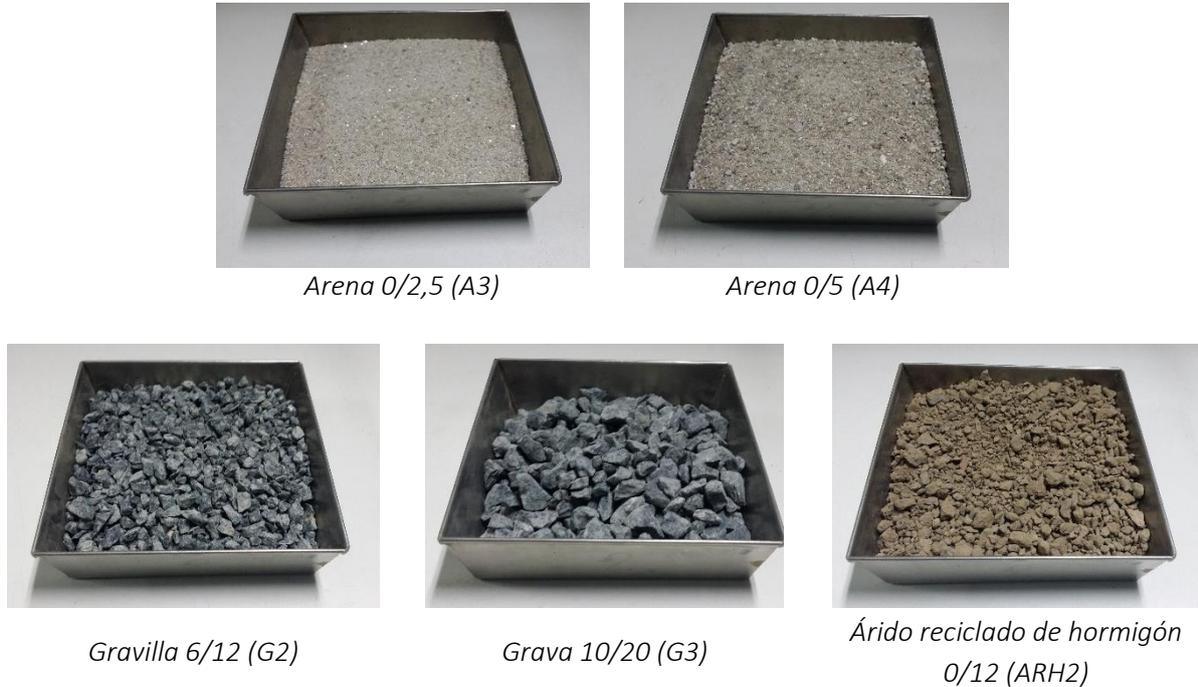


Figura 5.7. Fotografías de los áridos utilizados en los hormigones C

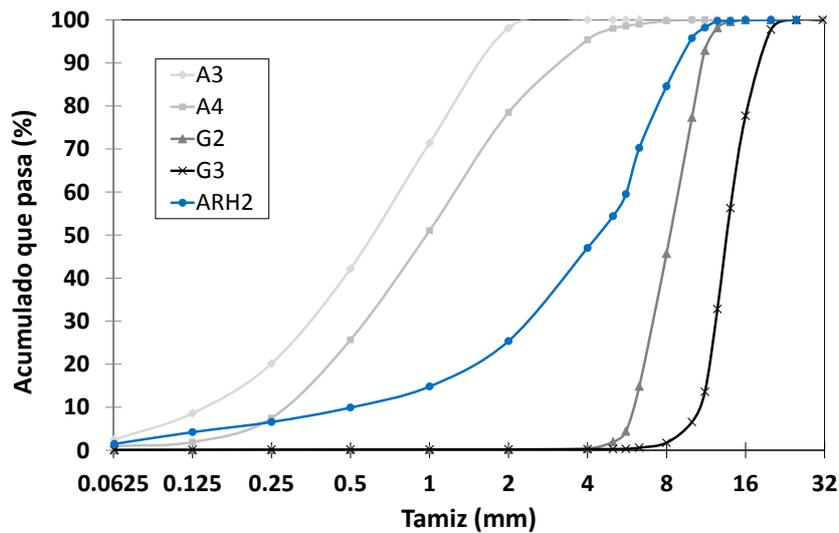


Figura 5.8. Granulometría de los áridos utilizados en los hormigones clase C

Tabla 5.5. Granulometría de los áridos utilizados en los hormigones C

Tamiz (mm)	% acumulado que pasa				
	A3	A4	G2	G3	ARH2
0,063	2,5	1,0	0,0	0,1	1,5
0,125	8,6	1,9	0,1	0,1	4,2
0,25	20,1	7,5	0,1	0,1	6,6
0,5	42,2	25,7	0,1	0,2	9,9
1	71,4	51,0	0,1	0,2	14,8
2	98,1	78,5	0,2	0,2	25,4
4	100	95,4	0,4	0,2	47,0
5	100	98,0	2,0	0,3	54,4
5,6	100	98,5	4,4	0,3	59,5
6,3	100	99,0	14,9	0,6	70,2
8	100	99,8	45,7	1,7	84,6
10	100	100	77,4	6,6	95,7
11,2	100	100	92,9	13,6	98,2
12,5	100	100	98,0	33	99,7
14	100	100	100	56	100
16	100	100	100	78	100
20	100	100	100	98	100
25	100	100	100	100	100
31,5	100	100	100	100	100

La composición del árido reciclado se ha hecho siguiendo la Norma UNE-EN-933-11 y se recoge en la tabla 5.6. En la tabla 5.7 se resumen las propiedades de los áridos utilizados en la fabricación de hormigones de clase C.

Tabla 5.6. Composición de los áridos reciclados utilizados en los hormigones C

Componente	Descripción	ARH2
FL (cm ³ /kg)	Partículas flotantes	0,7
X (%)	Cohesivos (arcilla y arena). Varios: metales, madera no flotante y caucho. Yeso	0,25
Rc (%)	Hormigón, productos de hormigón, mortero. Unidades de albañilería de hormigón	13,29
Ru (%)	Áridos no tratados, piedra natural. Áridos tratados con conglomerantes hidráulicos	83,86
Rb (%)	Unidades de albañilería de arcilla. (ladrillos y tejas). Unidades de albañilería de silicato cálcico Hormigón aireado no flotante	1,85
Ra (%)	Materiales bituminosos	0
Rg (%)	Vidrio	0,05

Tabla 5.7. Propiedades de los áridos utilizados en los hormigones C

Propiedad	Norma (UNE EN)	A3	A4	G2	G3	ARH2
Densidad aparente de partículas (Mg/m ³)	1097-6	2,61	2,52	2,82	2,56	2,61
Densidad de partículas tras secado en estufa (Mg/m ³)	1097-6	2,56	2,46	2,76	2,53	2,28
Densidad de partículas saturadas con superficie seca (Mg/m ³)	1097-6	2,58	2,48	2,78	2,54	2,41
Absorción (%)	1097-6	0,89	0,95	0,75	0,44	5,51
Contenido finos (< 0,063 mm) (%)	933-1	2,50	1,00	0,00	0,10	1,50
Contenido de arena (< 4 mm) (%)	933-1	---	---	0,40	0,20	47
Índice de lajas	933-3	---	---	≤ 15	≤ 15	9,26
Coefficiente de Los Ángeles	1097-2	---	---	≤ 15	≤ 15	*

* El índice de los ángeles no se pudo medir en este árido debido a la granulometría del mismo y a la exigida por la norma. Para poder ensayar la fracción de la norma se tendrían que tamizar una cantidad de árido reciclado demasiado elevada.

5.2.1.2. Cenizas de biomasa y cemento para hormigones del grupo C

Las cenizas de biomasa utilizadas en esta investigación son los residuos generados en el proceso de obtención de energía a través de la combustión de biomasa. Esta biomasa procede de madera de eucalipto, tanto de las cortezas y residuos forestales como del licor negro obtenido del proceso de cocción de la madera que eran residuos generados en el proceso de producción de una industria papelera.

La granulometría de las cenizas de biomasa se ha realizado con la ayuda de técnicas de láser, obteniéndose todos los resultados en tanto por ciento en volumen. En la figura 5.9 se recoge la distribución diferencial y la distribución acumulada para las cenizas de biomasa. Asumiendo que la densidad de todas las partículas es la misma, la distribución en peso es la misma que en volumen. En la figura 5.10 se incluye una fotografía de las cenizas de biomasa utilizadas en esta investigación.

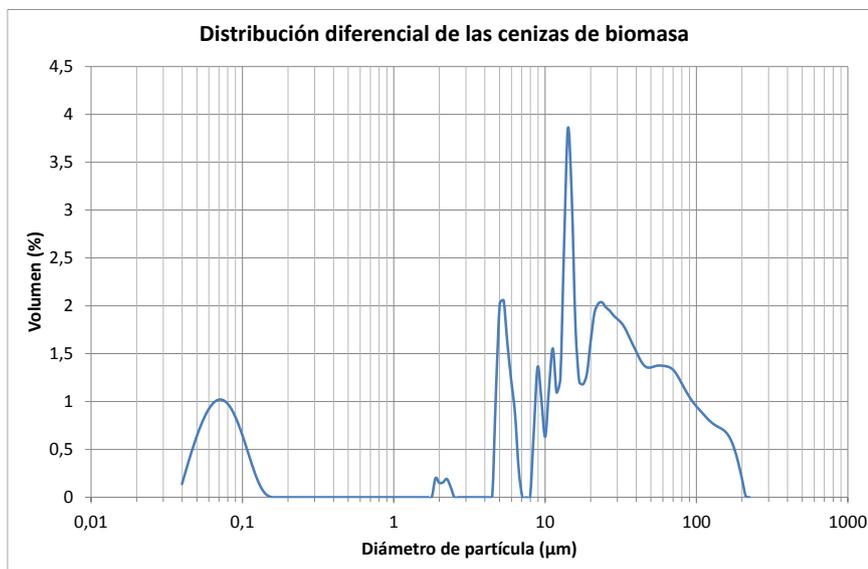


Figura 5.9a. Granulometría de las cenizas de biomasa (distribución diferencial)

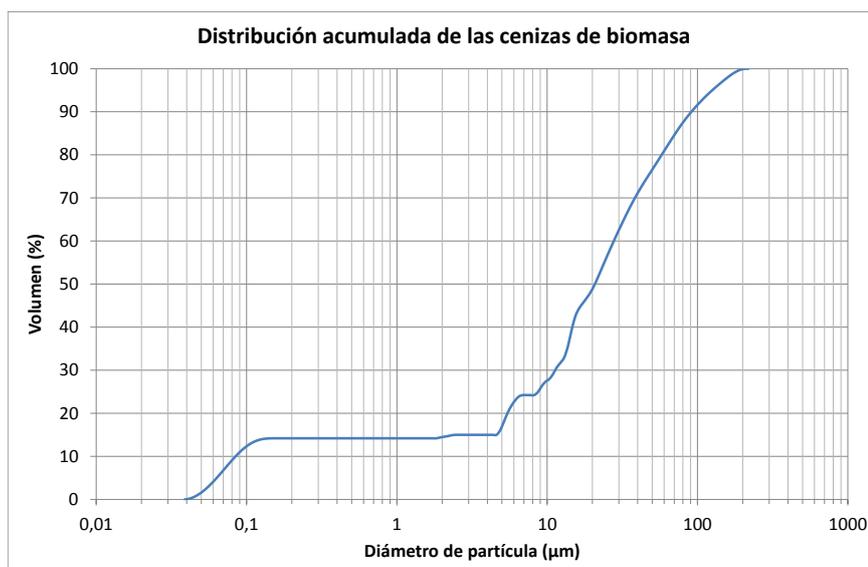


Figura 5.9b. Granulometría de las cenizas de biomasa (Distribución acumulada)

Se observa que el máximo tamaño de las partículas de cenizas es de 200 μm , un 90% en volumen está por debajo de 90 μm , y solo un 10% está por debajo de los 0,08 μm .



Figura 5.10. Cenizas de biomasa

La superficie seca se ha obtenido utilizando el método BET (Brunauer-Emmett-Teller), en la tabla 5.8 se ha incluido los resultados.

Tabla 5.8. Método BET

Propiedad	Cenizas
Densidad real (g/m^3)	2,615
Superficie seca (m^2/g)	3,23

Con el fin de caracterizar las cenizas de biomasa empleadas en este estudio, también se han realizado los ensayos incluidos en la tabla 5.9.

Tabla 5.9. Otros ensayos de las cenizas de biomasa

Propiedad	Normativa	Cenizas
Límite líquido	UNE 103103	entre 38 y 51
Límite plástico	UNE 103104	entre 38 y 42
Índice de plasticidad	UNE 103103 y UNE 103104	entre 0 y 12
Equivalente de arena	UNE 103109	6,5
Demanda de agua en el ensayo de consistencia normal (g)	UNE-EN 196-3	175
Estabilidad volumétrica	A (mm)	4,0
	C (mm)	UNE-EN 196-3 6,5
	C – A (mm)	2,5
Tiempo de fraguado	Inicio	2h 15 min
	Fin	UNE 83-454 2h 50 min

En la tabla 5.10 se pueden observar la composición química del cemento y de las cenizas de biomasa.

Las condiciones que deben cumplir las cenizas volantes para poder ser utilizadas como adición del hormigón se incluyen en el artículo 30.1 de la EHE-08. La pérdida por calcinación a 975°C es muy alta por lo que ninguna de los dos cumple con el límite propuesto en la EHE-08 ($\leq 5,0\%$).

De los análisis químicos se puede comprobar que las cenizas no cumplen los contenidos máximos ni de anhídrido sulfúrico ni de cloruros. Se observa que tanto en la composición del cemento como en la de las cenizas de biomasa, los componentes mayoritarios son el CaO y el SiO₂, si bien en el caso de las cenizas de biomasa, el contenido de estos componentes es mucho menor, por ello, es previsible, que su poder cementante sea menor.

Tabla 5.10. Composición química

Componente	Cenizas de biomasa (wt. %)	Cemento (wt. %)
CaO	34,9	66,1
SiO ₂	11,6	16,9
SO ₃	11,4	3,5
K ₂ O	6,5	0,80
MgO	4,4	1,4
Al ₂ O ₃	4,4	2,8
Cl	2,7	0,076
Fe ₂ O ₃	2,6	5,2
P ₂ O ₅	1,6	0,092
Na ₂ O	1,4	0,68
MnO	1,4	0,058
TiO ₂	0,25	0,29
SrO	0,21	0,069
V ₂ O ₅	0,18	---
ZnO	0,057	0,094
NiO	0,040	---
Rb ₂ O	0,037	---
CuO	0,022	0,096
ZrO ₂	0,020	0,009
Br	0,007	---
Carbonatos	-	0,99
LOI 550°C	4,0	1,82
LOI 950°C	15,8	

Con el fin de obtener un mayor conocimiento del poder cementante de las cenizas de biomasa, se lleva a cabo una campaña experimental específica, en la que se estudia la evolución de la resistencia a

penetración de una pasta compuesta únicamente por cenizas de biomasa y agua (con una relación agua/cenizas igual a 0,45), en función de la temperatura de curado.

Para ello, se ha utilizado el instrumental descrito en la norma UNE-EN 1015-9 [EN 20] para la determinación del periodo de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco, y se ha diseñado un ensayo que permite observar la influencia de la temperatura en la evolución de la resistencia a penetración en la pasta de cenizas de biomasa. Este procedimiento posibilitará la obtención de curvas de evolución de la resistencia a penetración en función de la temperatura en la pasta de cenizas de biomasa, lo que, en cierto modo, da una idea de cómo influye la temperatura en la activación del poder cementante de las cenizas de biomasa.

Se fabrican tres especímenes de pasta de ceniza de biomasa utilizando moldes metálicos rígidos con un diámetro interior de 100 mm y un alto de 75 mm, abiertos por su parte superior. Se llena la mitad del molde y se deja caer el molde desde una altura de, aproximadamente 0,5 cm, de forma que la base del molde contra una superficie plana, horizontal y de alta rigidez; esto se repite 20 veces con el fin de que la mezcla se compacte. Se llena el molde hasta que rebose y se deja caer otras 20 veces del mismo modo que se ha descrito anteriormente, con el fin de que la mezcla quede bien compactada y no queden coqueras. Se enrasa y se tapa utilizando la base de otro molde idéntico. Posteriormente se sella la junta con al menos tres capas de cinta adhesiva. Cada uno de estos tres moldes se cura a una temperatura distinta (5°C, 20°C y 45°C) en cámaras de temperatura controlada, justo al acabar el proceso de amasado y fabricación de las probetas de ensayo.

Para hacer la medición, en primer lugar se coloca una báscula encima de la base de una taladradora manual, con una sonda de penetración cuya cara de penetración, con sección circular de 30 mm² de superficie, es plana y perpendicular al eje de desplazamiento de la sonda, tal y como se describe en la norma UNE-EN 1015-9 [EN 20]. Se pone la probeta (destapada) en una báscula que está encima de la base de la de la taladradora. Se tara el peso del molde. Se gira la palanca de la taladradora manual hasta que haga tope, de forma que la sonda de penetración se introduce en la probeta a ensayar. Cuando el peso registrado por la báscula se estabiliza, se anota junto con el día y la hora de ensayo. Se desplaza la palanca hasta su posición inicial y se retira la probeta. Seguidamente, se vuelve a tapar y sellar la probeta ensayada tal y como se había hecho después de su fabricación y se vuelve a poner en la cámara de la temperatura que le corresponda. Debido a que el ensayo se realiza a temperatura ambiente (18-20°C), el proceso de ensayo debe hacerse de forma rápida para minimizar el tiempo en el que la probeta se encuentra a una temperatura distinta a la temperatura de curado asignada. En una misma probeta se hacen varias mediciones a distintas edades, teniendo especial cautela en el hecho de que los puntos de ensayo estén separados, al menos, 20 mm entre sí. En la figura 5.11 se muestra una fotografía de un momento del ensayo.

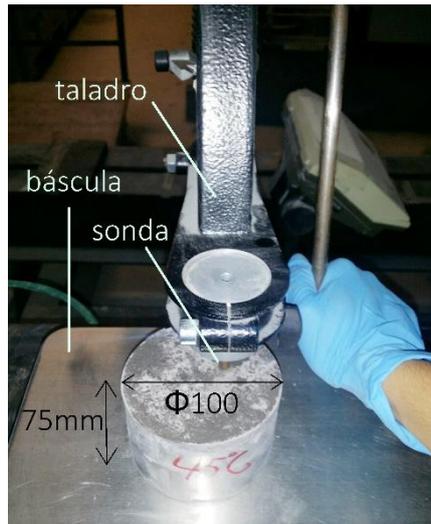


Figura 5.11. Ensayo de pasta de cenizas de biomasa

Durante el primer día, para todas las probetas, se hacen 3 medidas a tres edades. A partir del primer día, las medidas se van espaciando más en el tiempo conforme aumenta la edad. Cuando en una probeta se llega a una medición de 30 Kg en la báscula, en ensayo se detiene y se da por finalizado.

Se halla la resistencia a penetración de cada medición. Teniendo en cuenta que la medición de la báscula “m” se registra en Kg y que la sonda de penetración tiene un área “A” de 30 mm², la resistencia a penetración “Sp” se calcula utilizando la ecuación (5.1), cuyo resultado se expresa en Megapascales:

$$Sp = \frac{m \times 10}{A} \quad (5.1)$$

En la figura 5.12 se puede observar la evolución de la resistencia a penetración de la pasta de cenizas de biomasa, para cada temperatura de curado. Con una temperatura de curado de 45°C, la evolución es parabólica y se alcanzan los 10 MPa de resistencia a penetración antes de 1 día de edad. A 20°C la resistencia a penetración presenta una evolución lineal y son necesarios 7 días para alcanzar los 10 MPa. A 5°C, la influencia negativa de la baja temperatura se hace patente, la evolución de la resistencia a penetración tiene una tendencia logarítmica y a 7 días solo se alcanzan los 1,5 MPa, cuya resistencia equivale a la que presenta la pasta curada a 20°C a, aproximadamente 1 día o la pasta curada a 45°C a, solamente, 7 horas. Por tanto, se concluye que las cenizas de biomasa tienen un cierto poder cementante que depende fuertemente de la temperatura de curado: para temperaturas bajas, la pasta de cenizas de biomasa y agua no endurece, mientras que a 45°C, se endurece rápidamente.

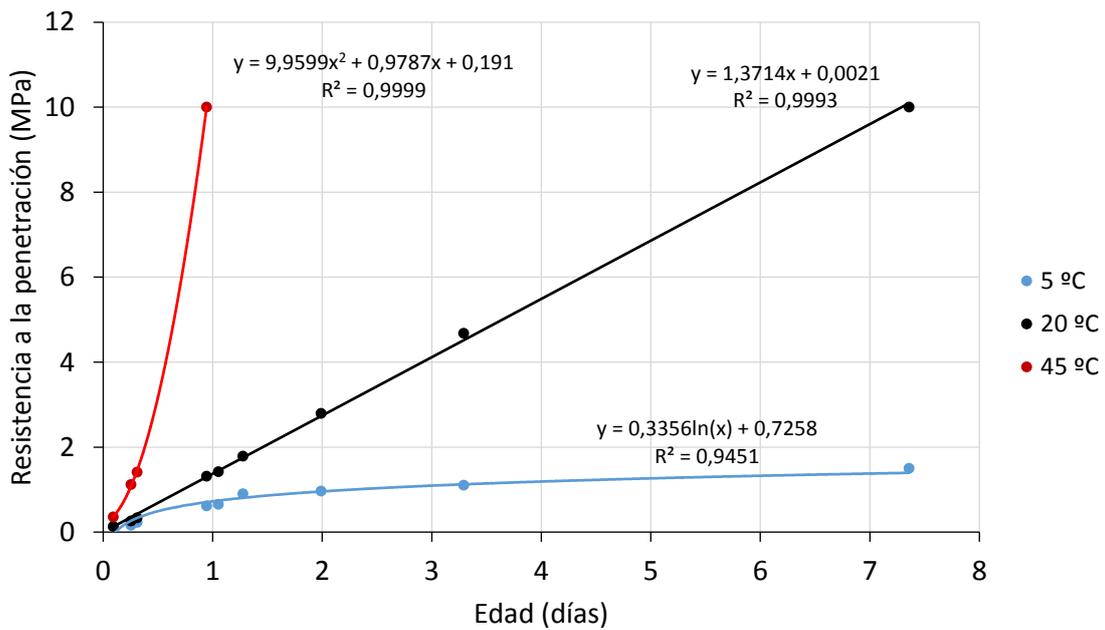


Figura 5.12. Evolución de la resistencia a penetración de la pasta de cenizas de biomasa en función de la temperatura de curado

A la vista de los resultados, se concluye que la temperatura de curado tiene un fuerte efecto en el desarrollo del poder cementante de las cenizas de biomasa.

5.2.2. Dosificación y datos básicos de los hormigones del grupo C

Para obtener un eco-hormigón con un menor impacto ambiental, se ha decidido utilizar todo el árido reciclado resultante del triturado de estas traviesas de hormigón, utilizando así la mayor cantidad de material posible, evitando la generación de un nuevo residuo resultante de las fracciones que desecharían si sólo se sustituyese el árido reciclado grueso y eliminando el consumo energético que supondría el tamizado de los áridos reciclados para separar fracciones distintas.

Para que las granulometrías del árido conjunto de los hormigones C con árido reciclado fuesen lo más parecido posible a la del árido conjunto del hormigón C0, de la cantidad de árido reciclado total sustituido en cada uno de los hormigones, el 47% sustituye a la arena natural A5 y un 53% sustituye a la grava natural G4; debido a que el árido reciclado, que contiene un 47% de arena reciclada y un 53% de gravilla reciclada, con granulometrías similares a las del A5 y G4. En este caso igual que para el caso de los hormigones B, las sustituciones de árido reciclado se refieren al árido total. No se han hecho sustituciones mayores debido a que para la sustitución del 31% del árido total, la fracción 4/12 se sustituye completamente.

En el caso de los hormigones con cenizas, el porcentaje de sustitución se calcula respecto de la cantidad de cemento de la dosificación de referencia, o lo que es lo mismo, de la suma de la cantidad de cemento y la de cenizas. El porcentaje máximo considerado ha sido del 30% porque suele ser el límite máximo utilizado en las investigaciones encontradas con este material.

Por último, se estudia la influencia de la variación de la relación agua/cemento en el hormigón de referencia (C0). Se hacen dos variantes con respecto al hormigón de referencia, variando la relación

agua/cemento; CO-1 ($a/c=0,425$) y CO-2 ($a/c=0,40$). No se ha estudiado un rango mayor de relaciones agua/cemento debido a que, una vez se han hecho pruebas, se ha comprobado que con relaciones a/c más bajas de 0,40, el hormigón no tiene apenas trabajabilidad y con a/c más altas a 0,45 el hormigón presenta segregación por exceso de agua.

En la tabla 5.11 se incluye las dosificaciones de todos los hormigones del grupo C.

Tabla 5.11. Dosificación de hormigones C

Material (kg/m ³)	CO	CH8	CH20	CH31	CC15	CC30	CO1	CO2
CEM I 52.2 R-SR 3	400	400	400	400	340	280	400	400
Cenizas de biomasa	---	---	---	---	60	120	---	---
Árido reciclado (ARH2)	---	145	363	563	---	---	---	---
Arena 0/2 (A3)	308	308	308	308	308	308	308	308
Arena 0/5 (A4)	608	539	437	343	608	608	608	608
Gravilla 4/12 (G2)	300	223	108	2	300	300	300	300
Grava 10/20 (G3)	600	600	600	600	600	600	600	600
Agua / cemento efectiva	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,425	0,40

En el caso de las dosificaciones con ceniza, la relación a/c que figura en la tabla se refiere a la cantidad de agua entre la suma de la cantidad de cemento más cenizas de biomasa. En la figura 5.13, se observa las curvas granulométricas conjuntas y se observa que las curvas conjuntas son muy similares a las curvas de referencia.

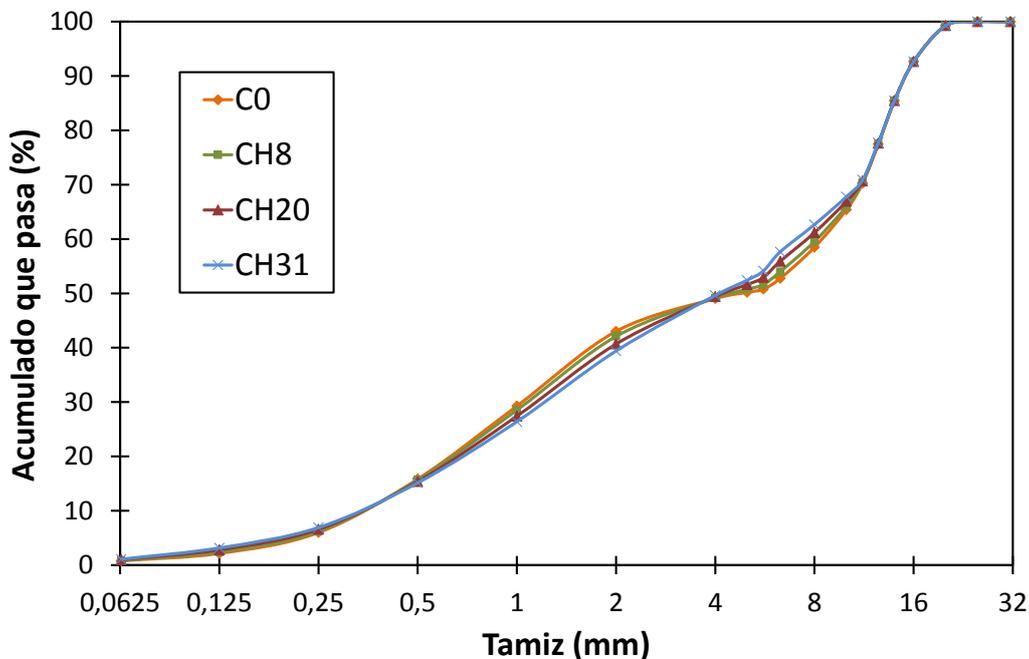


Figura 5.13. Curvas de granulometrías conjuntas de hormigones C

5.3. Morteros

5.3.1. Materiales para la fabricación los morteros

Los materiales utilizados para la fabricación de todos los morteros han sido utilizados en los hormigones clase B. Se trata de un cemento I 52.5 N/SR, las arenas naturales A1 y A2 utilizadas en los hormigones autocompactantes estudiados y una arena reciclada que es, básicamente, árido ARH1 tamizado (grupo B), en el que se escoge la fracción 0/4 y se deshecha el resto. Se ha calculado la absorción de esta arena reciclada resultante de tamizar el árido reciclado ARH1; ya que, previsiblemente, la absorción calculada para el ARH1 difiere ligeramente a la absorción de, únicamente, la fracción 0/4 del ARH1. La absorción de la fracción 0/4 del ARH1 es de 6,43%.

5.3.2. Dosificaciones de morteros

En la tabla 5.12 se muestran las dosificaciones de morteros clase M y en la tabla 5.13 la de los morteros clase ME. Los materiales utilizados coinciden con algunos de los utilizados en los hormigones en los hormigones del grupo B.

Los morteros de tipo M, tienen una composición muy habitual en morteros: una proporción cemento/arena de 1/3. La relación agua/cemento va variando a lo largo del ensayo, ya que se hacen mediciones con distintas relaciones agua/cemento, tal y como se explica en el Capítulo 4, para hacer diversas mediciones con el cementómetro.

El hormigón tipo ME, corresponde a los morteros equivalentes del B0, BH20 y BH50, adaptando la definición de mortero equivalente para hormigones con árido reciclado.

Tabla 5.12. Dosificaciones de los morteros tipo M

Componente	M0	MH25	MH50	MH75	MH100
CEM I 52.5 N/SR (g)	450	450	450	450	450
Arena natural (A2) (g)	1350	1012,5	675	337,5	---
Arena reciclada (ARH1 tamizado) (g)	---	337,5	675	1012,5	1350

Tabla 5.13. Dosificaciones de los morteros tipo ME

Mortero (kg/m ³)	ME0	MEH20	MEH50
Cemento I 52.5 N/SR	335	335	335
Filler	320	320	320
Arena 0/2.5 (A1)	340	340	340
Arena 0/5 (A2)	470	348	162
Arena reciclada 0/4 (ARH1 tamizada)	0	122	308
Agua	167,5	167,5	167,5
Aditivo	5,4	5,4	5,4

Capítulo 6. Definición empírica de la relación a/c efectiva

Capítulo 6. Definición empírica de la relación a/c efectiva

6.1. Motivación de este estudio

Una forma de estudiar la influencia de los áridos reciclados en la resistencia de morteros y hormigones es ensayar probetas fabricadas con distintos porcentajes de sustitución de árido reciclado y comparar los resultados con los obtenidos con la dosificación de referencia con el 0% de sustitución de árido reciclado, es decir, la de mortero o hormigón convencional. Pero para que estos morteros u hormigones sean comparables, es necesario que, el único factor que varíe en la dosificación sea el porcentaje de sustitución de árido reciclado. Como es sabido, la relación a/c, para ser más concretos, la relación a/c efectiva, influye en los resultados de resistencias.

Para poder comparar hormigones o morteros con distintos porcentajes de sustitución, es necesario que la relación a/c efectiva no varíe y, por tanto, no sea una variable más a tener en cuenta.

Por ello, es de vital importancia saber cuál es la relación a/c efectiva en función de la absorción de los áridos, de modo que se pueda hacer las correcciones necesarias para que se cumpla la igualdad de la relación a/c entre las muestras que se deseen comparar.

Como ya se ha comentado en el capítulo 2 de esta tesis, una definición clara del término “relación a/c efectiva” es la siguiente: “La cantidad total de agua que reacciona con el cemento, dividida entre la cantidad de cemento “. Las discrepancias surgen a la hora de definir la cantidad de agua que absorben los áridos reciclados y que por lo tanto no está disponible para reaccionar con el cemento.

6.2.- Objetivo del estudio

El objeto de este estudio es obtener una definición de la relación agua cemento efectiva en función de la absorción de los áridos. De este modo se podrá determinar empíricamente un criterio para poder obtener una determinada relación agua/cemento efectiva en función de la absorción de los áridos. Para ello, se pretende hallar la relación entre la absorción de los áridos y el ratio a/c efectiva basado en un desarrollo experimental, mediante la búsqueda de relaciones entre el ratio a/c y las frecuencias de microondas, en morteros cuyos áridos tienen una absorción distinta.

6.3.- Bases del estudio y metodología

Se sabe que la cantidad de agua que reacciona con el cemento en una mezcla está acotada entre la cantidad de agua total añadida y la cantidad de agua añadida menos la cantidad de agua que los áridos de la mezcla pueden absorber. Esto se puede representar con la ecuación 6.1, siempre y cuando el árido de añadida en la mezcla esté completamente seco.

$$\text{agua que reacciona} = \text{agua añadida} - \alpha * \text{capacidad de absorción de áridos} \quad (6.1)$$

α es un coeficiente con valor entre cero y uno. Si α tomase el valor cero se estaría asumiendo que todo el agua añadida está disponible para reaccionar con el cemento. Si α tomase el valor 1, se estaría tomando como verdadero la suposición de que todo el agua que pueden absorber los áridos es absorbida y por tanto, no está disponible para reaccionar con el cemento, es decir, sería equivalente a suponer que para tener una misma relación a/c entre dos morteros u hormigones con distinto porcentaje de sustitución de árido reciclado, sería necesario hacer una corrección aumentando el agua en una cantidad igual al agua total de absorción (corrección del 100% de la absorción de los áridos reciclados).

Ya que la cantidad de cemento no varía, si se divide la expresión anterior entre la cantidad de cemento, resulta la ecuación 6.2.

$$a/c \text{ efectiva} = a/c \text{ real} - \alpha * \frac{\text{capacidad de absorción áridos}}{\text{cemento}} \quad (6.2)$$

Por otra parte, existe una relación entre la frecuencia de microondas y el ratio a/c, de hecho, con el cementómetro se puede calcular la relación a/c, previa calibración. Este aparato está calibrado y diseñado para medir frecuencias de microondas y hallar internamente las relaciones a/c reales correspondientes para determinados tipos de cemento y utilizando áridos naturales (cuya variación de absorción es mínima, casi depreciable (0,19% en la arena A2) y, por tanto, la relación a/c real y la relación a/c efectiva es prácticamente la misma). Basándose en la existencia de una relación desconocida entre la frecuencia de microondas y el ratio a/c efectiva se desarrolla la primera parte de este estudio.

Si existiese un árido natural con absorción del 0%, todo el agua añadida reaccionaría con el cemento, es decir, la relación a/c real sería la misma que la relación a/c efectiva. Midiendo la frecuencia que corresponde a varios ratios a/c efectiva de ese mortero fabricado con árido de absorción nula, se podría hallar una función que proporcionase el valor de la relación a/c efectiva según el valor de frecuencia medida.

El siguiente paso sería calcular la relación a/c efectiva utilizando la expresión anterior en morteros cuyas absorciones fuesen variando; por ejemplo, manteniendo la dosificación y haciendo únicamente sustituciones de árido natural por árido reciclado.

Como no se dispone de un árido natural con absorción cero, no se puede hallar la curva que relacione frecuencia con a/c efectiva, pero sí se puede hallar un estrecho huso que en el que se sabe que se hallará dicha curva de correlación, como se expondrá en los siguientes párrafos.

Se sabe que la relación a/c efectiva está acotada entre el valor de a/c real (sin tener en cuenta la influencia de la absorción de los áridos) y un valor mínimo del ratio a/c, que es el resultante de tomar como hipótesis que toda el agua que podrían absorber los áridos, es absorbida y, por tanto, no reacciona con el cemento. En la ecuación 6.3 se incluye esta condición.

$$a/c \text{ efectiva} \in [a/c \text{ mínima}, a/c \text{ real}] \quad (6.3)$$

La metodología a seguir es la que se describe a continuación:

1. Utilizando un árido natural, con una absorción baja, se halla un estrecho huso, calculando las curvas que relacionan a/c con la frecuencia; una de las curvas relaciona a/c real y la otra relaciona a/c mínima (corrigiendo agua de absorción), el ratio a/c efectivo estará entre dichas curvas. De este modo, para cada frecuencia, se acota el a/c efectiva correspondiente a dicha frecuencia, en un pequeño intervalo.
2. Se ensayan morteros con distintos porcentajes de sustitución. Para cada uno de ellos, se miden las frecuencias que corresponden a varias relaciones a/c.
3. Utilizando las expresiones de estimación de la relación a/c efectiva del huso, se halla, para todas las relaciones a/c reales de cada dosificación, qué relación a/c efectiva máxima y mínima le corresponden.
4. Tomando como cierto el valor de la cota inferior de a/c para cada relación a/c de cada mezcla (y poniendo en cada mezcla su correspondiente capacidad de absorción), se calcula mediante mínimos cuadrados, el valor de α de la ecuación 6.2, que minimiza el error cuadrático medio de las estimaciones de a/c efectiva.
5. Se repite dicho proceso, tomando como valor real de la relación a/c efectiva los valores calculados con el huso superior.

6.4.-Desarrollo de la campaña experimental y análisis de resultados

Para este estudio se han utilizado los morteros clase M (M0, MH25, MH50, MH75 y MH100) y todos los áridos se han añadido secos (con humedad cero). El árido natural utilizado tiene una absorción de 0,19% y el árido reciclado tiene una absorción de 6,43 %.

De acuerdo con la metodología descrita en el apartado anterior, los pasos que se han seguido son:

1. Las curvas que relacionan a/c real y a/c mínima con la frecuencia se hallan para el mortero M0. En la figura 6.1 se incluyen estas relaciones.

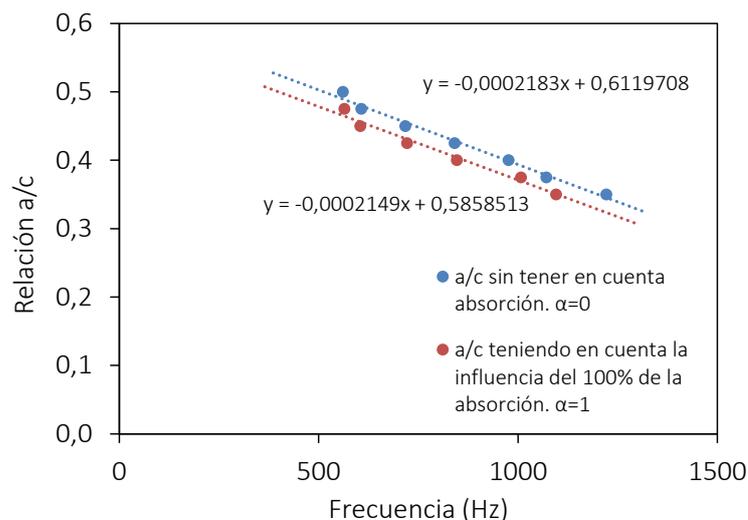


Figura 6.1. Huso de ratio a/c efectivo en función de la frecuencia

2. Se han ensayado los morteros M25, M50, M75 y M100. Para cada dosificación se hace una amasada, dicha amasada comienza con una relación a/c real baja, entorno a un ratio a/c de

0,35 (en algunas de las dosificaciones la relación a/c real tiene que ser mayor debido a que la alta absorción de los áridos hace que la mezcla no pueda ser homogénea, ya que no tiene el agua mínima necesaria para formar una pasta).

Se hacen más de 12 medidas de frecuencia para esa primera relación a/c real. Se halla la frecuencia media que corresponde a cada relación a/c real.

Se añade el agua necesaria para llegar a la siguiente relación a/c real, aumentando el ratio a/c en 0,05 y se repite la operación de hacer 12 medidas de frecuencia y hallar la media. Este proceso se repite todas las veces posibles hasta que la mezcla ya tiene un exceso de agua y está demasiado líquida; es decir, se va a medir la frecuencia media correspondiente a cada relación a/c real, desde la menor a/c real que sea medible hasta la mayor, con incrementos de 0,05. En la tabla 6.1 se incluyen la frecuencia media para cada relación a/c real y para cada mortero.

- Utilizando las expresiones de estimación halladas en la figura 6.1, se hallan, para todas las relaciones a/c reales de cada dosificación, la cota máxima y mínima de la relación a/c efectiva que le corresponden. En la tabla 6.1 se muestran la cota inferior y superior de la a/c efectiva estimadas mediante las funciones límite del huso. y en las figuras 6.2 y 6.3 la relación entre el a/c real frente a la cota mínima y la cota máxima, respectivamente, de la relación a/c efectiva.

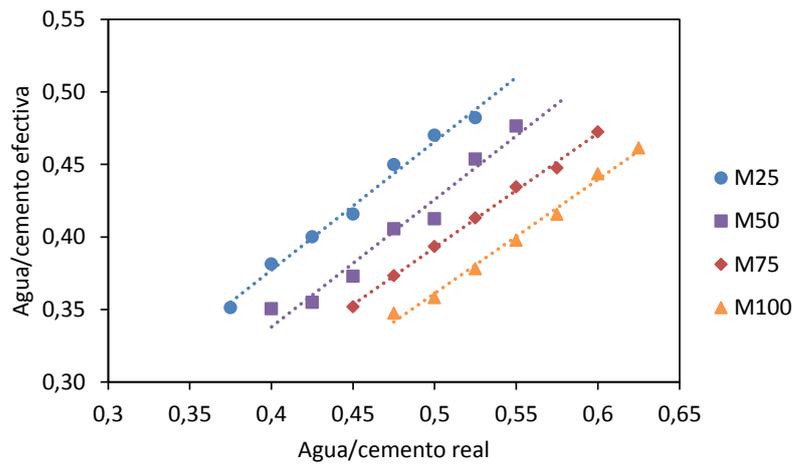


Figura 6.2. Relación a/c real frente a cota mínima del a/c efectiva

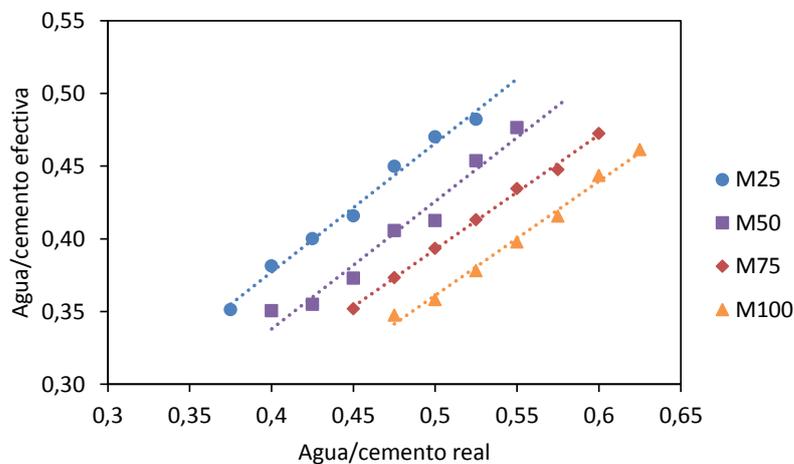


Figura 6.3. Relación a/c real frente a cota máxima del a/c efectiva

Tabla 6.1. Frecuencias medias para cada a/c real y a/c efectivas estimadas con el huso

Mortero	a/c real	Frecuencia media	Cota inferior de a/c efectiva	Cota superior de a/c efectiva
MH25	0,375	1194,25	0,33	0,35
	0,400	1056,00	0,36	0,38
	0,425	970,75	0,38	0,40
	0,450	898,50	0,39	0,42
	0,475	742,88	0,43	0,45
	0,500	649,75	0,45	0,47
	0,525	594,25	0,46	0,48
MH50	0,400	1197	0,33	0,35
	0,425	1177	0,33	0,36
	0,450	1095	0,35	0,37
	0,475	945	0,38	0,41
	0,500	913	0,39	0,41
	0,525	725	0,43	0,45
	0,550	621	0,45	0,48
MH75)	0,450	1191	0,33	0,35
	0,475	1093	0,35	0,37
	0,500	1001	0,37	0,39
	0,525	911	0,39	0,41
	0,550	813	0,41	0,43
	0,575	753	0,42	0,45
	0,600	639	0,45	0,47
MH100)	0,475	1211	0,33	0,35
	0,500	1162	0,34	0,36
	0,525	1071	0,36	0,38
	0,550	981	0,38	0,40
	0,575	899	0,39	0,42
	0,600	771	0,42	0,44
	0,625	690	0,44	0,46

4. Tomando como cierto el valor de la cota inferior de a/c para cada relación a/c de cada mezcla y poniendo en cada mezcla su correspondiente capacidad de absorción, incluida en la tabla 6.2, se ha calculado mediante mínimos cuadrados, el valor de α de la ecuación 6.2, que minimiza el error cuadrático medio de las estimaciones de a/c efectiva.

Tabla 6.2. Capacidad máxima de absorción de los áridos

Propiedad	M0	MH25	MH50	MH75	MH100
Agua para saturar arena natural (g)	2,6	1,9	1,3	0,6	0,0
Agua para saturar arena reciclada (g)	0,0	22,7	45,4	68,1	90,9
Capacidad total de absorción (g)	2,6	24,6	46,7	68,8	90,9
Capacidad de absorción total / cemento	0,006	0,062	0,117	0,172	0,227

El valor de α que minimiza el error cuadrático de la estimación de la cota inferior de relación a/c efectiva es 0,7775; que equivale a decir que, sería necesario hacer una corrección del a/c añadiendo al agua real un 77,75% del agua de absorción de los áridos. En la tabla 6.3 se recogen los valores de la relación a/c efectiva calculada con límite inferior de huso, el a/c efectiva estimada según absorción y $\alpha = 0,7775$ y la diferencia entre ambas.

Tabla 6.3. Relación a/c efectiva calculada con la ecuación 6.2 y $\alpha = 0,7775$

	a/c real	a/c efectiva con cota inferior	a/c efectiva estimada con $\alpha = 0,7775$	Diferencia
MH25	0,375	0,33	0,33	-0,0021
	0,400	0,36	0,35	-0,0068
	0,425	0,38	0,38	-0,0001
	0,450	0,39	0,40	0,0094
	0,475	0,43	0,43	0,0009
	0,500	0,45	0,45	0,0059
	0,525	0,46	0,48	0,0190
MH50	0,400	0,33	0,31	-0,0194
	0,425	0,33	0,33	0,0013
	0,450	0,35	0,36	0,0087
	0,475	0,38	0,38	0,0014
	0,500	0,39	0,41	0,0196
	0,525	0,43	0,43	0,0042
	0,550	0,45	0,46	0,0068
MH75	0,450	0,33	0,32	-0,0136
	0,475	0,35	0,34	-0,0097
	0,500	0,37	0,37	-0,0044
	0,525	0,39	0,39	0,0012
	0,550	0,41	0,42	0,0052
	0,575	0,42	0,44	0,0173
	0,600	0,45	0,47	0,0178
MH100	0,475	0,33	0,30	-0,0272
	0,500	0,34	0,32	-0,0127
	0,525	0,36	0,35	-0,0073
	0,550	0,38	0,37	-0,0016
	0,575	0,39	0,40	0,0057
	0,600	0,42	0,42	0,0032
	0,625	0,44	0,45	0,0108

5. Se repite dicho proceso, tomando como valor real de la relación a/c efectiva los valores calculados con el huso superior. El valor de α que minimiza el error cuadrático total es 0,6432, es decir, una corrección del agua añadiendo un 64,32% del agua de absorción de los áridos. En

la tabla 6.4 se incluyen los valores de la relación a/c efectiva calculada con límite superior de huso, el a/c efectiva estimada según absorción y $\alpha = 0,6432$ y la diferencia entre ambas.

Tabla 6.4. Relación a/c efectiva calculada con la ecuación 6.2 y $\alpha = 0,6432$

	a/c real	a/c efectiva con cota superior	a/c efectiva estimada con $\alpha = 0,6432$	Diferencia
MH25	0,375	0,35	0,34	-0,0159
	0,400	0,38	0,36	-0,0211
	0,425	0,40	0,39	-0,0147
	0,450	0,42	0,41	-0,0054
	0,475	0,45	0,44	-0,0144
	0,500	0,47	0,46	-0,0097
	0,525	0,48	0,49	0,0031
MH50	0,400	0,35	0,32	-0,0258
	0,425	0,36	0,35	-0,0051
	0,450	0,37	0,37	0,0020
	0,475	0,41	0,40	-0,0058
	0,500	0,41	0,42	0,0122
	0,525	0,45	0,45	-0,0038
	0,550	0,48	0,47	-0,0015
MH75	0,450	0,35	0,34	-0,0126
	0,475	0,37	0,36	-0,0090
	0,500	0,39	0,39	-0,0041
	0,525	0,41	0,41	0,0013
	0,550	0,43	0,44	0,0049
	0,575	0,45	0,46	0,0168
	0,600	0,47	0,49	0,0169
MH100	0,475	0,35	0,33	-0,0187
	0,500	0,36	0,35	-0,0044
	0,525	0,38	0,38	0,0007
	0,550	0,40	0,40	0,0061
	0,575	0,42	0,43	0,0132
	0,600	0,44	0,45	0,0102
	0,625	0,46	0,48	0,0176

6.5- Conclusiones de este estudio

Como se puede comprobar, el coeficiente α es mayor en la expresión calculada con los datos de cota inferior de a/c efectiva. Esto es coherente con la fórmula 6.1 ya que a mayor α menor relación a/c efectiva resultante de dicha fórmula.

Puesto que el coeficiente de corrección α se encuentra entre 0,6432 y 0,7775, se puede afirmar que en morteros con distintas sustituciones de árido reciclado, para obtener una relación a/c efectiva igual, es necesario corregir el agua añadiendo una cantidad de agua que se encuentra entre el 64% y el 78% del agua que se necesitaría para saturar los áridos que componen la mezcla.

Por ello, se recomienda hacer la corrección añadiendo una cantidad de agua que se sitúe entre el 64% y el 78% de la capacidad de absorción de los áridos que forman parte de la mezcla. Una posible corrección sería añadir el 71% (punto medio del intervalo hallado) del agua que se necesitaría para saturar los áridos, en el caso de que se hallan añadido los áridos secos a la mezcla.

Capítulo 7. Factores que influyen en la evolución de la resistencia a compresión y en sus correlaciones con END

Capítulo 7. Evolución de la resistencia a compresión y en sus correlaciones con ensayos no destructivos

7.1. Introducción

En este capítulo se estudia cómo influyen algunos factores en la evolución de la resistencia a compresión y en sus correlaciones con ensayos no destructivos (UPV, índice de rebote, conductividad eléctrica), tanto a edades tempranas como a 28 días. Los factores estudiados son: materiales reciclados (áridos reciclados de hormigón fino y grueso o cenizas de biomasa), temperatura de curado y relación agua/cemento. Se estudia además el efecto que tiene la temperatura en la influencia que tienen los materiales reciclados en la evolución de la resistencia a compresión y en su correlación con algunos ensayos no destructivos (velocidad de ultrasonidos e índice de rebote)

7.2. Factores que influyen en la evolución de la resistencia a compresión

7.2.1. Temperatura de curado

Las figuras 7.1, 7.2 y 7.3 muestran la evolución de la resistencia a compresión de cada uno de los 11 hormigones estudiados, a tres temperaturas: 5°C, 20°C (temperatura estándar) y 45°C.

Durante los primeros días, los hormigones curados a 45°C desarrollan una mayor resistencia que los curados a 5°C y a 20°C, en todos los hormigones estudiados. Sin embargo, en los 9 hormigones estudiados que no contienen cenizas de biomasa (figuras 7.1 y 7.2), a los 28 días se observa que las probetas curadas a 20°C presentan una mayor resistencia que las de 45°C y que las curadas a 5°C.

Por tanto, tomando la resistencia de probetas curadas a 20°C se podría estar sobreestimando la resistencia a compresión (tanto si la temperatura de curado en obra es mayor como si es menor que la estándar), si bien, en la mayoría de los hormigones, esta sobreestimación no tiene una gran magnitud (figuras 7.1 y 7.2).

Por el contrario, para los hormigones con cenizas de biomasa la resistencia desarrollada por las probetas curadas a 45°C es ligeramente superior o igual a la de las curadas a 20°C (figura 7.3), a cualquier edad (de las estudiadas). Esto se debe a una mayor activación de las cenizas de biomasa debido a la temperatura; tal y como se explica que en el capítulo 5, a mayores temperaturas, las cenizas endurecen mucho más rápido y alcanzan mayores valores de resistencia (figura 5.12).

Las bajas temperaturas (5°C) ralentizan la evolución de la resistencia. Durante los primeros 7 días, las probetas curadas a 5°C presentan resistencias a compresión considerablemente inferiores a las obtenidas a la temperatura de referencia (20°C).

Para los hormigones de referencia (B0 y C0) y para los que contienen bajos porcentajes de sustitución de material reciclado (CH8 y CC15), a 28 días, la diferencia entre las probetas curadas a estas dos temperaturas (5°C y 20°C) es casi despreciable.

Sin embargo, para los hormigones con altos contenidos de árido reciclado o cenizas de biomasa (CH20, CH31 y CC30), la resistencia a 28 de las probetas a 5°C sigue siendo considerablemente menor que la registrada a la misma edad en las probetas curadas la temperatura estándar (20°C).

La evolución de la resistencia a compresión es mucho más vulnerable a las bajas temperaturas en el hormigón con un 30% de sustitución de cemento por cenizas de biomasa (CC30) que en los hormigones con altos porcentajes de árido reciclado.

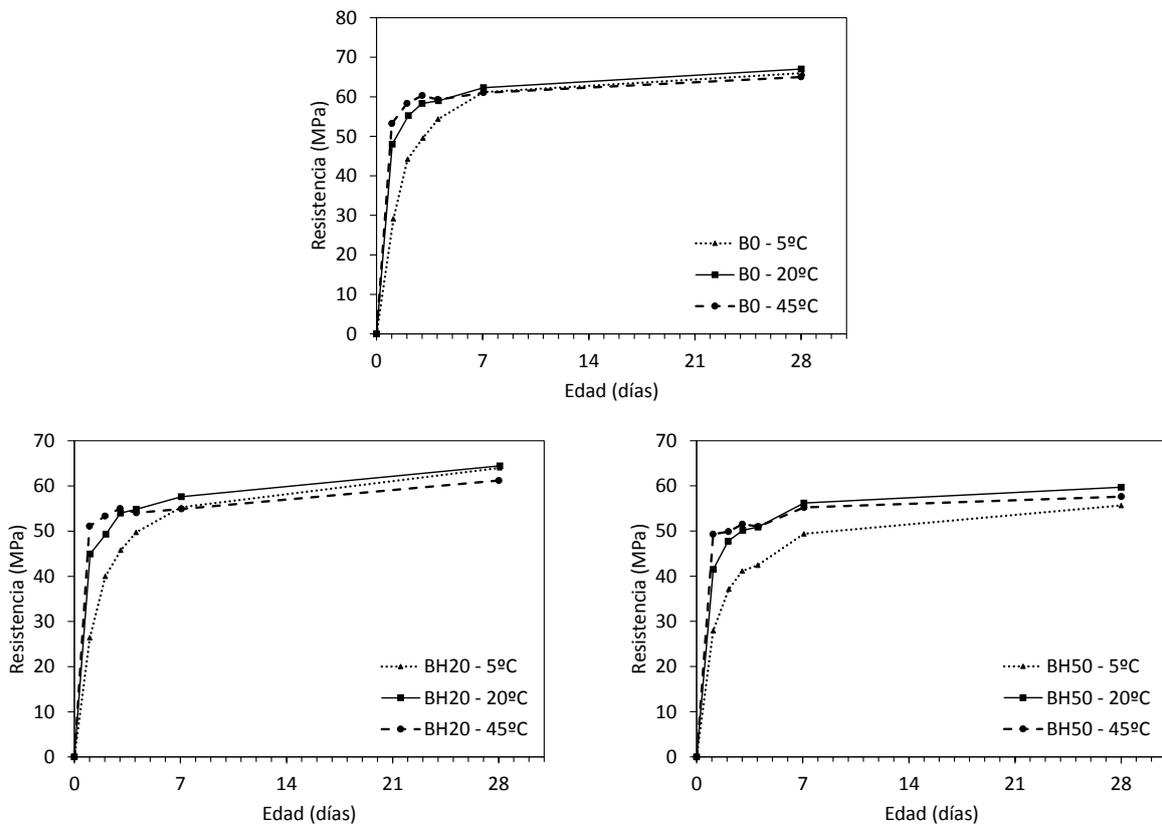


Figura 7.1. Evolución de la resistencia a compresión (B0 y BH)

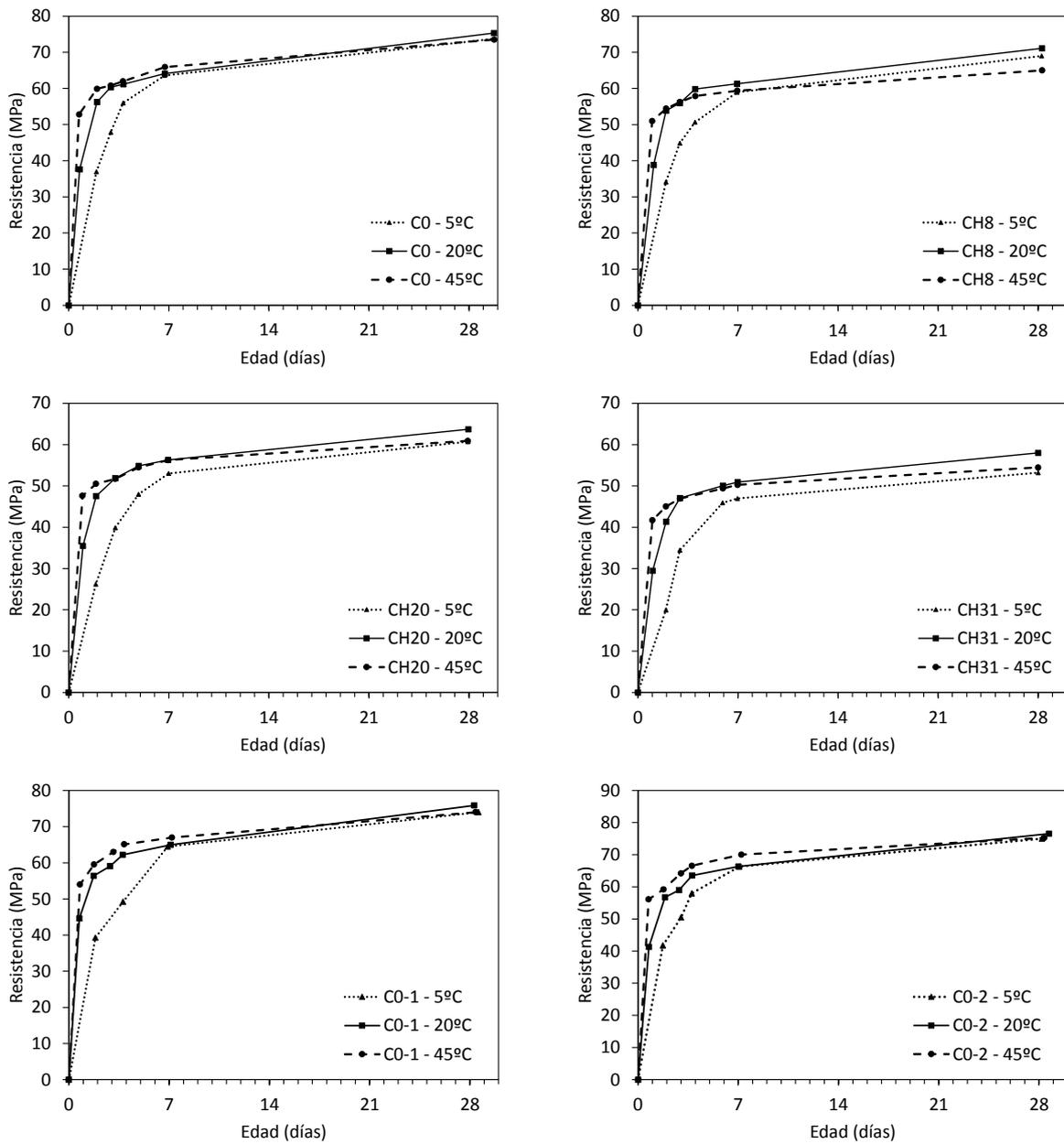


Figura 7.2. Evolución de la resistencia a compresión (CO y CH)

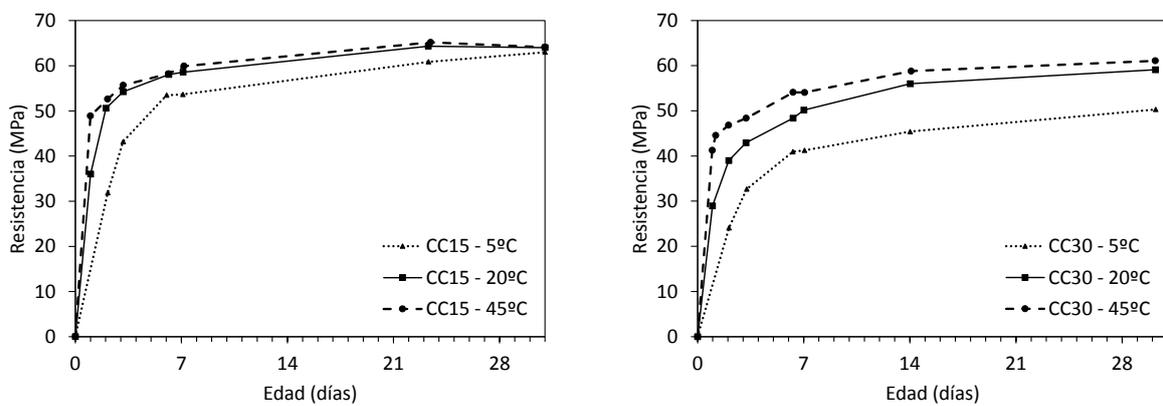


Figura 7.3. Evolución de la resistencia a compresión (CC)

7.2.2. Eco-materiales a temperatura estándar

La sustitución de un porcentaje de árido natural por árido reciclado de hormigón (fino y grueso) provoca una disminución de la resistencia a compresión a todas las edades estudiadas, tanto en el caso del hormigón autocompactante (figura 7.4a) como en el del vibrado (figura 7.5a).

Tanto el hormigón vibrado como el autocompactante presentan una disminución de la resistencia en función de la cantidad total de árido reciclado fino y grueso utilizado. Esta disminución es lineal en función del porcentaje de sustitución (figuras 7.4b y 7.5b) a 28 días. A 3 y 7 días no se observa una linealidad tan clara en los hormigones autocompactantes (figura 7.4b).

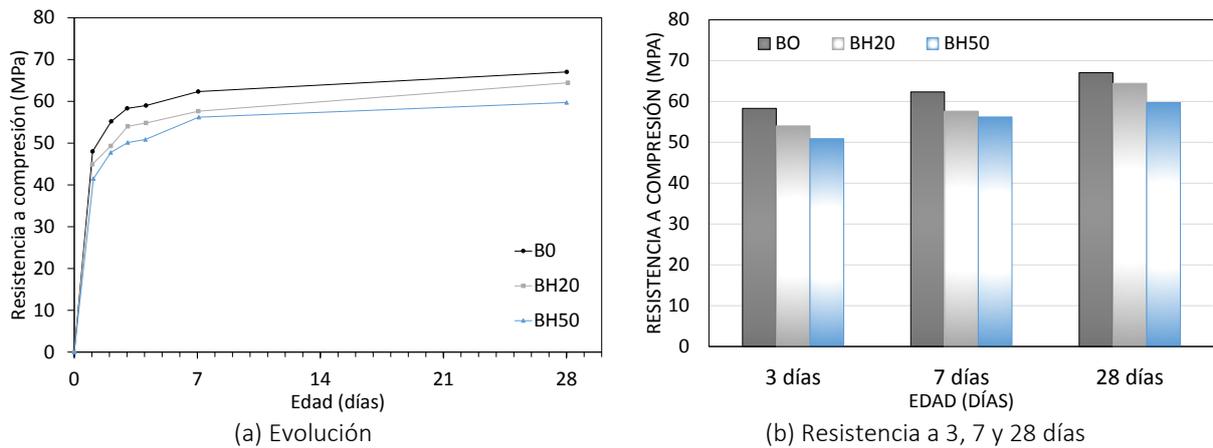


Figura 7.4. Comparativa de la resistencia a compresión (B0 y BH)

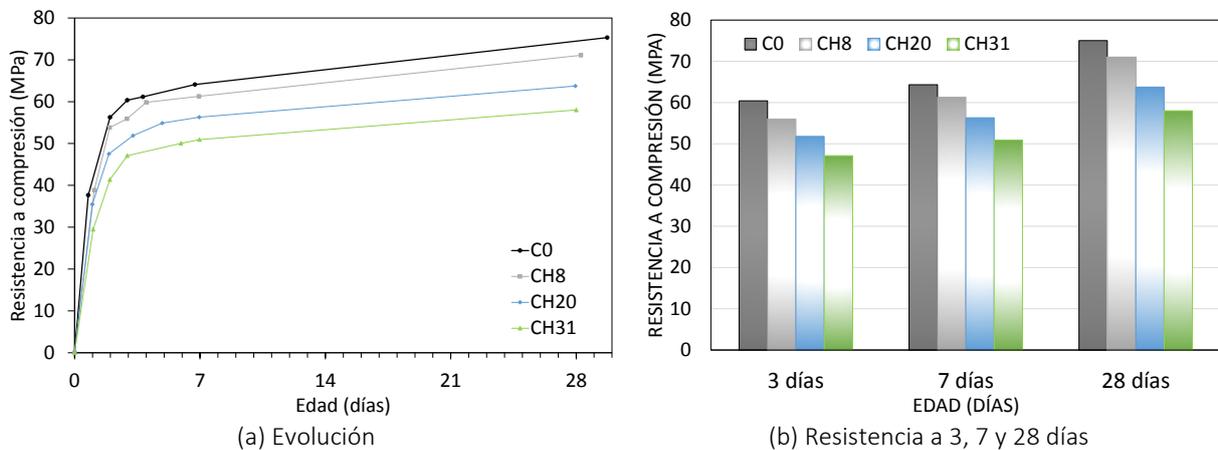


Figura 7.5. Comparativa de la resistencia a compresión (C0 y CH)

En cuanto a la influencia de las cenizas de biomasa, se observa que la adición de cenizas de biomasa influye negativamente en la resistencia a compresión, sobre todo durante los primeros tres días (figura 7.6a). En la figura 7.6b se representa el porcentaje de pérdida de resistencia (con respecto a la del C0) debido a la adición de cenizas de biomasa.

En estudios con cenizas volantes de carbón [DEMI04, FANG15], también se observa una disminución de la resistencia a compresión debido a esta adición, en probetas a 3, 7, 28 y 120 o 90 días. En ambos estudios se observa que la pérdida de resistencia a compresión es mayor cuanto menor es el tiempo de curado. Dicha afirmación también es aplicable a los hormigones del presente estudio con cenizas

de biomasa a partir de 2 días (figura 7.6b), excepto para el CC15, ya que a 28 días, registra pérdidas iguales e incluso ligeramente superiores a las registradas a edades tempranas, si bien todas las pérdidas se sitúan por debajo del 15% para el CC15.

De Belie [DEBE08] estudia la evolución de la resistencia a compresión en hormigones con distintos porcentajes de adición de cenizas volantes, a edades tempranas. Observa que con un 10% de cenizas volantes, la resistencia a compresión apenas varía con respecto a la del hormigón de referencia a todas las edades, por el contrario, con un 40% de cenizas volantes, la disminución de resistencia es del 70% (con respecto a la de referencia) a un día. Véase que, en esta investigación, con un 30% de cenizas de biomasa, la pérdida de resistencia (figura 7.6b) a 1 día es del 30%. Por tanto, parece que las variaciones de resistencia a compresión debidas a la adición de cenizas de biomasa a edades tempranas, tienen una tendencia similar a las de los hormigones con cenizas volantes de carbón.

Para el CC15, las pérdidas de resistencia se sitúan entre el 8% y el 14%, respecto a los valores obtenidos en el hormigón de referencia. En cuanto al CC30, a 3 días se observa una baja del 30%, pero cabe apuntar que esta baja tan importante, se ve atenuada en gran medida con el paso de los días, situándose a 7 días en un diferencial del 22%, valor que se mantiene estable a 28 días. A 90 días de edad, con una temperatura de curado estándar, la pérdida de resistencia a compresión del CC30 (con respecto a la del C0) se sitúa en torno al 24%.

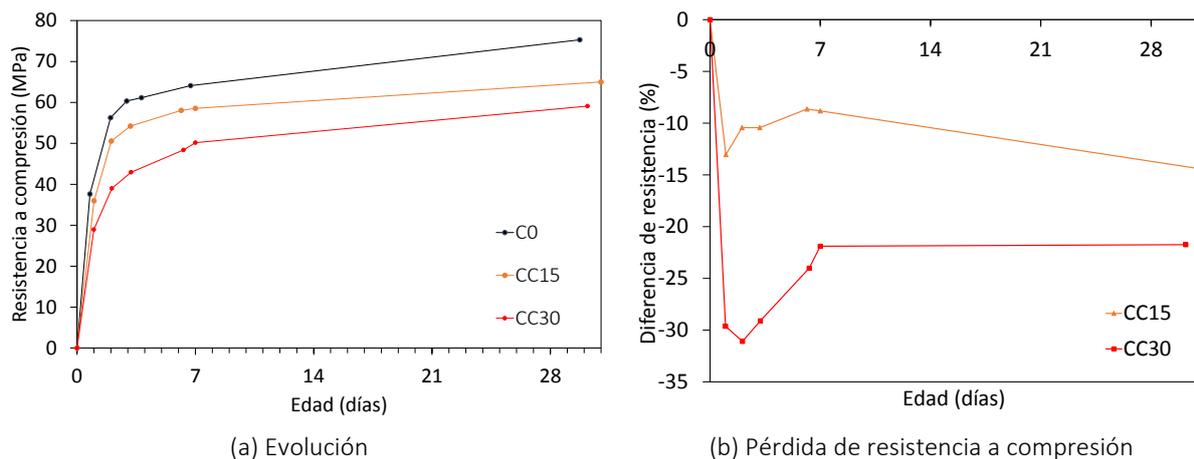


Figura 7.6. Comparativa de la resistencia a compresión (C0 y CC)

7.2.3. Eco-materiales en función de la temperatura de curado

Una vez estudiadas por separado la influencia de la temperatura y la influencia de los eco-materiales en la resistencia a compresión, en este apartado se analizará el efecto de la temperatura de curado en la influencia que tienen los eco-materiales en la resistencia a compresión.

- **Áridos reciclado fino y grueso de hormigón.**

Centrándose en una temperatura de curado determinada (en cualquiera de las estudiadas), se puede observar que existe una disminución de la resistencia a compresión en función de la cantidad de árido natural sustituido por reciclado, tanto a 28 días como durante todo el proceso de evolución de la resistencia a edades tempranas. Para una misma temperatura de curado, las curvas de evolución de la resistencia a compresión se mantienen prácticamente paralelas entre sí, y desplazadas hacia abajo

conforme aumenta el porcentaje de sustitución, tanto para el hormigón vibrado como para el autocompactante (figuras 7.7 y 7.8).

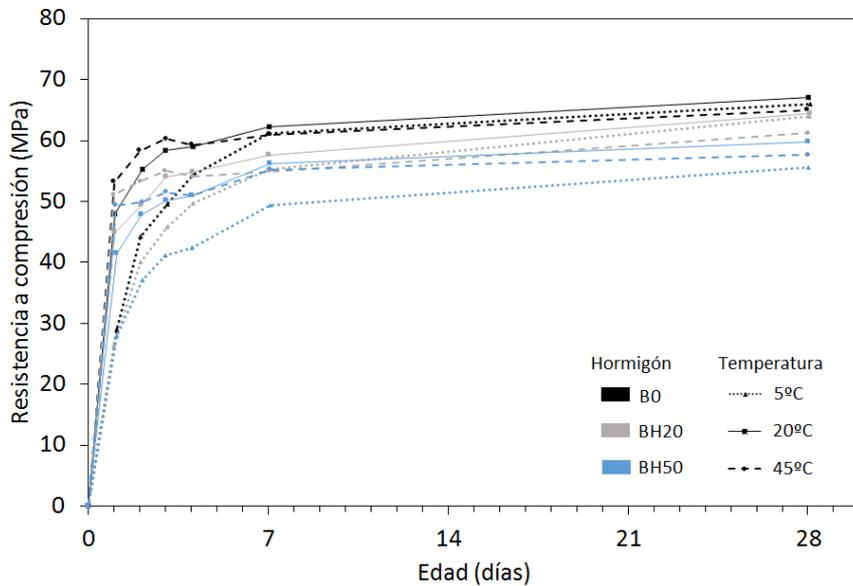


Figura 7.7. Comparación de la evolución de la resistencia a compresión (B0 y BH)

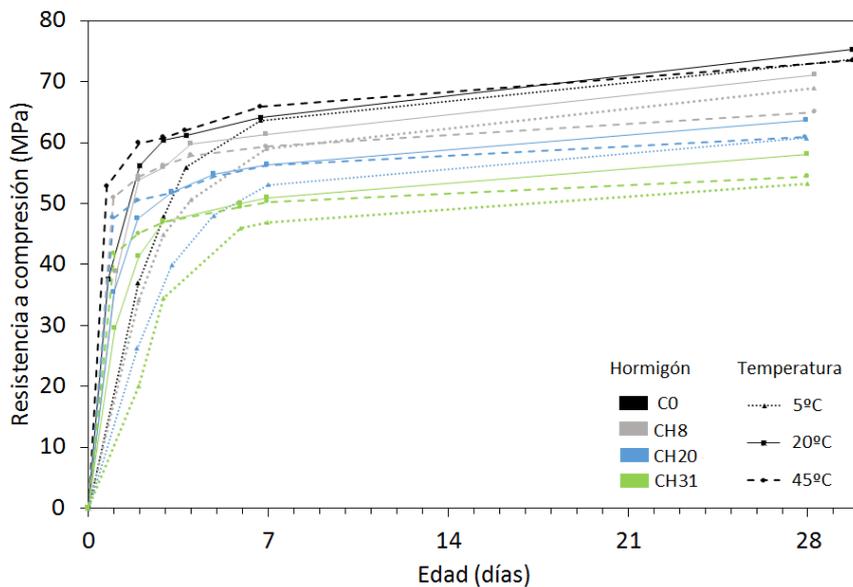


Figura 7.8. Comparación de la evolución de la resistencia a compresión (C0 y CH)

Según la normativa UNE-EN 12390-2 para el cálculo de la resistencia característica, las probetas son curadas a 20°C de temperatura y con una humedad mayor al 95%. Las figuras 7.9 y 7.10 muestran la pérdida o ganancia de resistencia a compresión (en porcentaje) de las probetas curadas a 5°C y a 45°C tomando como referencia los resultados de las probetas curadas a 20°C, con el fin de observar las diferencias de evolución de la resistencia a compresión debidas a un incremento o una disminución de la temperatura de curado.

Al comparar la evolución de la resistencia del hormigón curado a temperatura standard (20°C), con la evolución de la resistencia a compresión a otras temperaturas extremas (5°C y 45°C en este caso), se puede observar cómo influye la temperatura de curado en la evolución de la resistencia a compresión.

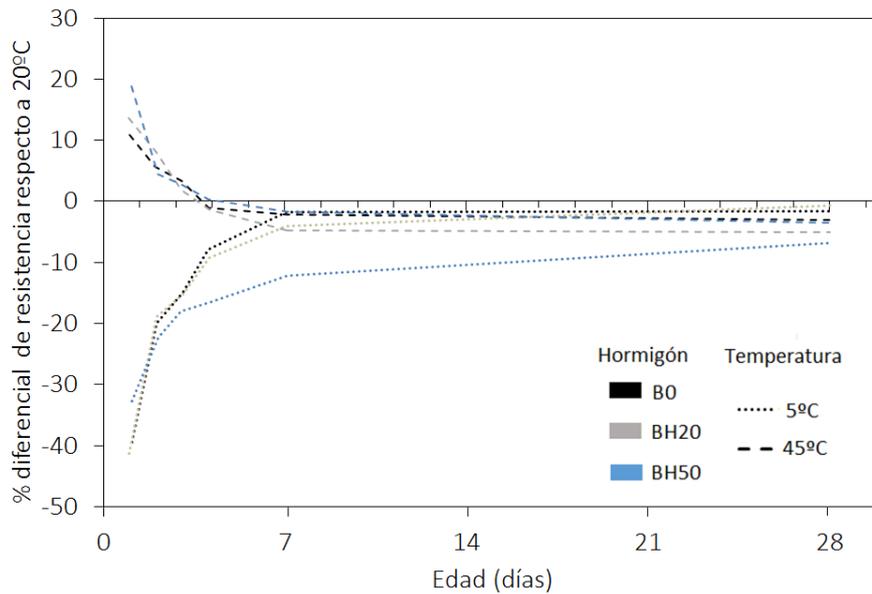


Figura 7.9. Comparación de la diferencia de resistencia a compresión (B0 y BH)

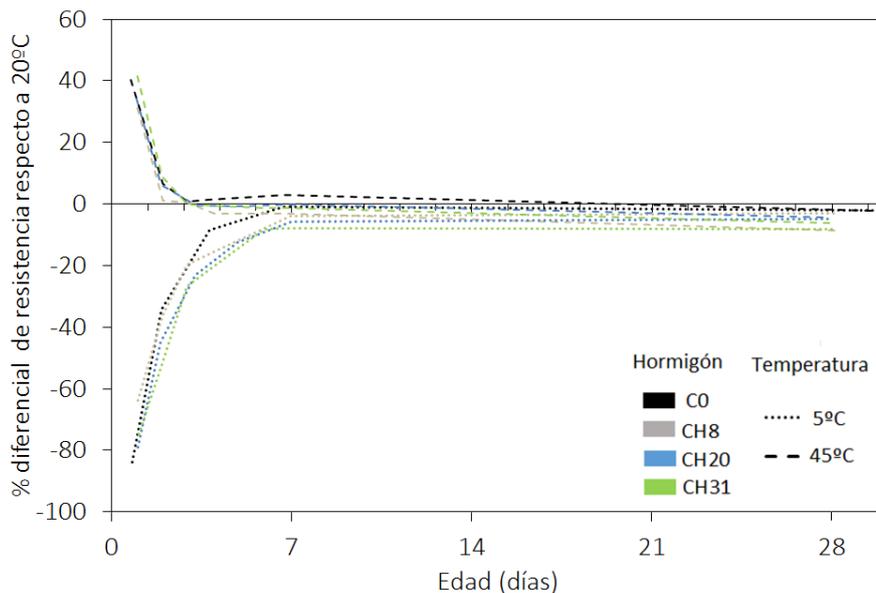


Figura 7.10. Comparación de la diferencia de resistencia a compresión (C0 y CH)

A edades muy tempranas, la influencia de la temperatura es más notoria y, conforme pasan los días, la influencia de la temperatura es menor, y siempre negativa, situándose a 28 días en pérdidas menores del 10% en todos los casos.

Se observa que, para todos los hormigones tipo CH, las diferencias debido al incremento o disminución de la temperatura de curado son muy similares para los distintos hormigones estudiados. La cinética de influencia de las temperaturas es prácticamente la misma independientemente del porcentaje de sustitución de árido reciclado fino y grueso. En los hormigones autocompactantes B0 y

BH20 ocurre algo similar. Por el contrario, en el hormigón autocompactante con un 50% de árido reciclado fino y grueso (BH50), se observa una influencia considerable de la temperatura en la evolución de la resistencia a compresión, en el caso de temperaturas bajas. Esto podría apuntar a que los hormigones con altos contenidos de árido reciclado pueden ser más susceptibles a las bajas temperaturas a edades tempranas, si bien esta influencia solo se observa en el caso del hormigón BH50.

En las probetas curadas a 45°C, a un día de edad, se observa un incremento de la resistencia de entre un 10% y un 20% en los hormigones autocompactantes tipo B, y de en torno a un 40% en los hormigones vibrados (tomando como referencia el dato de la misma edad de las probetas curadas a 20°C). Este efecto de aumento de la resistencia debido a una mayor temperatura de curado se va reduciendo rápidamente conforme pasan los días. A 3 días, el efecto de la temperatura elevada (45°C) es nulo (menor del 5%).

En el caso de los especímenes curados a 5°C, también se observa una mayor incidencia del cambio de temperatura durante los 3 primeros días, aunque, en este caso, se trata de una influencia negativa en el desarrollo de resistencia. A edad de 1 día, las probetas curadas a 5°C presentan una resistencia a compresión entre un 64% y un 84% más baja que las probetas curadas a 20°C en los hormigones C0 y CH, y en torno a un 40% en los B0 y BH. Este efecto negativo de una temperatura de curado se ve atenuado conforme pasan los días. A 4 días las pérdidas se sitúan por debajo del 10% para todos los hormigones.

Los resultados obtenidos son similares en los hormigones autocompactantes (figura 7.9) y en los hormigones vibrados (figura 7.10), con un aspecto de embudo horizontal.

- **Cenizas de biomasa.**

En cuanto a los hormigones con cenizas de biomasa, se observa que, para todas las temperaturas, la resistencia es menor, cuanto mayor es la cantidad de cemento sustituido por cenizas de biomasa (figura 7.11), si bien cabe destacar que este efecto negativo es más acusado en temperaturas muy bajas (5°C).

En la figura 7.11 se puede observar que las curvas de evolución de la resistencia a compresión de las distintas dosificaciones (con distintos porcentajes de cenizas de biomasa) están más próximas en el caso de temperatura de curado de 45°C, se alejan un poco con temperatura de curado 20°C y, están mucho más alejadas en el caso de curado a 5°C. De este hecho se puede concluir que la temperatura de curado influye en el efecto que las cenizas de biomasa tienen sobre la resistencia a compresión.

A menor temperatura, mayor es el efecto negativo de las cenizas de biomasa en la resistencia a compresión. Esto es debido a que, pese a que las cenizas de biomasa tienen un cierto poder cementante, éste apenas se activa a temperaturas bajas (figura 5.12). Cabe apuntar que a un día, la pérdida de resistencia debida a las bajas temperaturas en porcentaje es incluso mayor en el caso del C0 que de los hormigones CC, pero la tendencia a partir de 2 días es de que, a mayor cantidad de cenizas de biomasa, mayor porcentaje de pérdida de resistencia, tal y como se puede observar en la figura 7.12.

Cabe destacar que los porcentajes de pérdida de resistencia debido a las bajas temperaturas son muy similares para los tres hormigones (C0, CC15 y CC30) durante los 3 primeros días, a partir de entonces, estos porcentajes de pérdida empiezan a ser distintos: mientras que para el hormigón de referencia apenas existe pérdida de resistencia debido a las bajas temperaturas a partir de 7 días, para los

hormigones CC15 se sitúa entre el 9% (7 días) y el 1,5% (28 días), y para el CC30 entre el 18% y el 15% (7 y 28 días respectivamente).

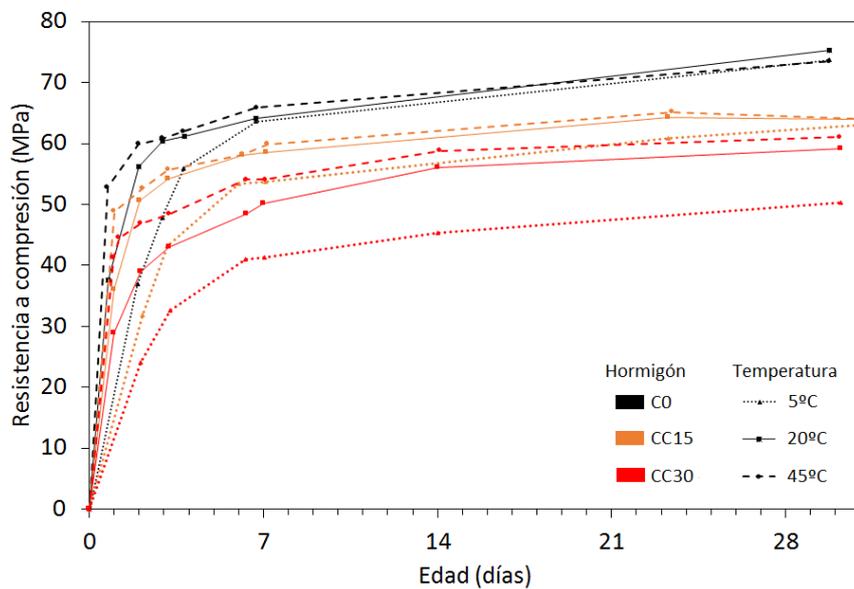


Figura 7.11. Comparación de la evolución de la resistencia a compresión (C0 y CC)

Al contrario que ocurría con las sustituciones de árido natural por árido reciclado, en el caso de las sustituciones de cemento por cenizas de biomasa, los hormigones con cenizas de biomasa presentan una resistencia ligeramente mayor con una temperatura de curado de 45°C que con 20°C a todas las edades, incluso a 28 días (figura 7.12). Es decir, para temperaturas altas, los hormigones con cenizas de biomasa se comportan mejor que a temperatura estándar, en lo que a desarrollo de resistencia a compresión se refiere. Por el contrario, a temperaturas bajas, la influencia de la sustitución de cemento por cenizas de biomasa tiene una mayor importancia, ya que produce una disminución significativa de la resistencia a compresión, entorno al 15% de pérdida de resistencia a 28 días, debido a la disminución de temperatura, en el caso del hormigón CC30.

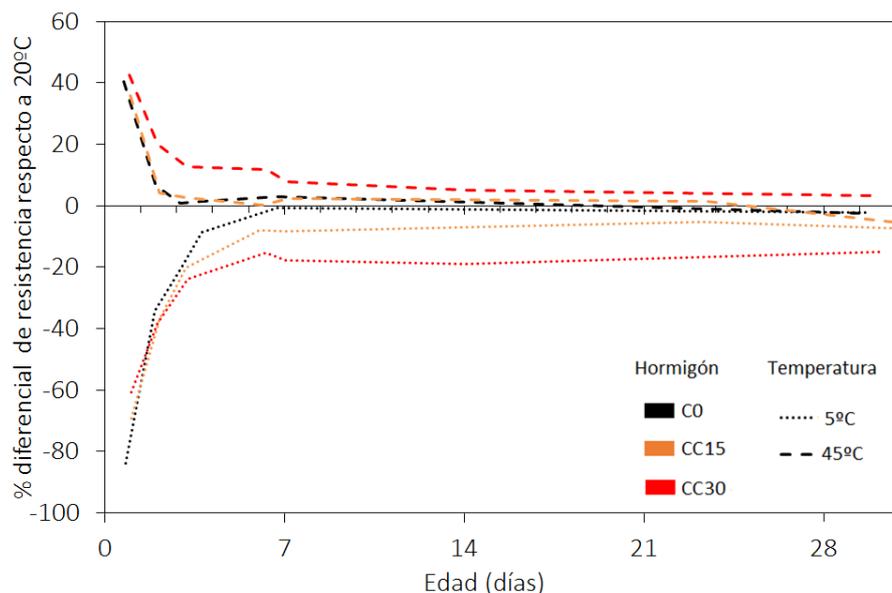


Figura 7.12. Comparación de la diferencia de resistencia a compresión (C0 y CC)

Si se representan estas curvas en un mismo gráfico, diferenciando únicamente el tipo de hormigón (BH, CH o CC) mediante colores y la temperatura mediante el tipo de línea, se observa un hecho que ya se ha apuntado anteriormente, y es que independientemente del tipo de árido, de la cantidad de cemento, de la cantidad de material reciclado (ya sean áridos reciclados o cenizas de biomasa), en todos ellos, la influencia de la temperatura en la evolución de la resistencia a compresión sigue un patrón claro: la evolución de la resistencia se ve muy afectadas por la temperatura de curado durante los primeros días pero, conforme pasa el tiempo, la influencia disminuye.

En la figura 7.13 se puede observar que todas las curvas se enmarcan en un embudo horizontal, cuyo ancho aumenta al disminuir la cantidad de cemento: los hormigones C0 y CH son los que tienen una cantidad de cemento mayor, estos hormigones, con 400 kg/m^3 , son los que presentan un “embudo” más estrecho, es decir, presentan una menor influencia de la temperatura en la evolución de la resistencia (a edades mayores de 7 días). El hormigón CC15 tiene una cantidad de cemento por metro cúbico (340 kg/m^3) similar a la de los hormigones BH (335 kg/m^3) y el hormigón CC30 tiene solo 280 kg de cemento por metro cúbico de hormigón.

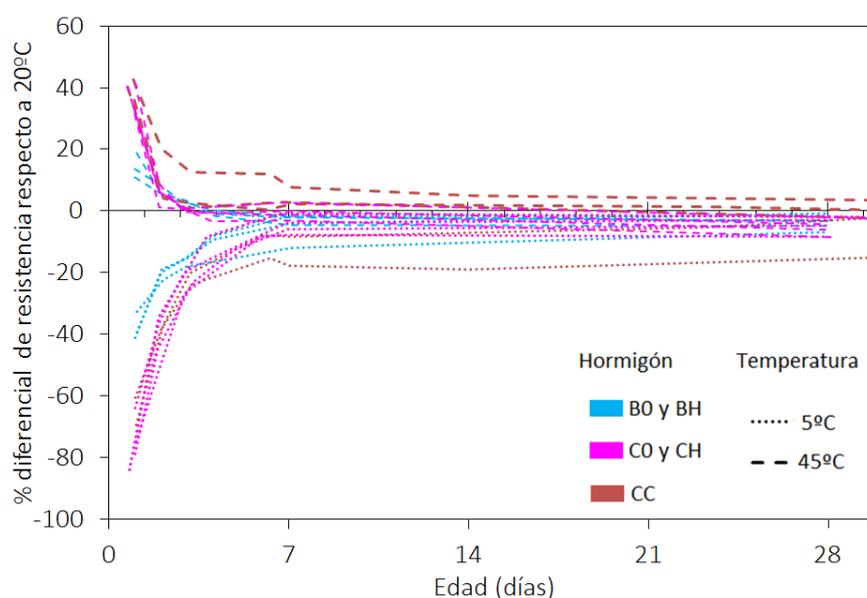


Figura 7.13. Comparación de la diferencia de resistencia a compresión (B0, BH, C0, CH y CC)

En cuanto a la influencia de la adición de cenizas de biomasa en la resistencia a compresión a 90 días, en la figura 7.14 se puede observar cómo, incluso a largo plazo, la temperatura de curado influye en el efecto de las cenizas de biomasa:

- En el hormigón convencional, el curado a 45°C produce un descenso de la resistencia a largo plazo en comparación a los valores obtenidos a 20°C . Por el contrario, en los hormigones con cenizas de biomasa, este incremento de temperatura de curado produce un aumento de la resistencia a compresión a largo plazo, ya que estas cenizas de biomasa tienen un cierto poder cementante que se activa en función de la temperatura de curado.
- En el hormigón de referencia, las bajas temperaturas prácticamente no influyen en la resistencia a 90 días. Por el contrario, en los hormigones con cenizas de biomasa, las bajas temperaturas de curado hacen que la resistencia a compresión a 90 días sea mucho menor que la registrada en probetas curadas a temperatura estándar.

- Se observa que, cuanto menor es la temperatura de curado, mayor es la influencia negativa de las cenizas de biomasa en la resistencia a compresión a largo plazo.
- A 90 días de edad, un 30% de sustitución de cemento por cenizas de biomasa supone una disminución de la resistencia a compresión, con respecto a la del hormigón de referencia, del 33% en hormigones curados a 5°C, del 24% con temperaturas de curado de 20°C, y de solo un 14% para temperaturas de curado de 45°C. Por tanto, se puede concluir que la temperatura de curado influye en el efecto que tiene la adición de cenizas de biomasa en la resistencia a compresión, incluso a largo plazo. Por ello, en caso de hormigonado a bajas temperaturas, se recomienda tomar especiales precauciones en el uso de hormigones con cenizas de biomasa.

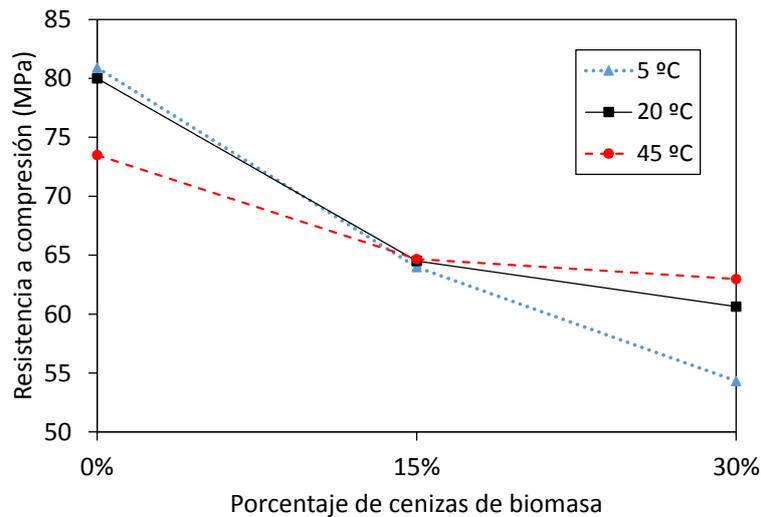


Figura 7.14. Resistencia a compresión a 90 días en función de la temperatura (C0 y CC)

7.2.4. Relación agua/cemento

En las plantas de hormigón, debido al desconocimiento del valor exacto de la humedad de los áridos, la relación agua/cemento puede variar levemente entre unas amasadas y otras. Por ello, es interesante observar la influencia de pequeñas variaciones de la relación agua/cemento en la evolución de la resistencia a compresión, en los parámetros de madurez y en las correlaciones con ensayos no destructivos.

En la figura 7.15 se muestra influencia del ratio agua/cemento en la evolución de la temperatura en función de la temperatura de curado. Se recuerda que, el hormigón de referencia C0 tiene una relación agua/cemento de 0,45. Los hormigones C0-1 y C0-2, tienen la misma dosificación que el de referencia C0 a excepción de la relación a/c, que es 0,425 y 0,40 respectivamente. Obviamente, para las tres temperaturas de curado, se observa que cuanto menor es la relación agua/cemento, mayor es la resistencia, tanto a 28 días como a edades tempranas. También, se observa que la influencia de la variación del ratio a/c no depende, al menos de forma clara, en la temperatura de curado.

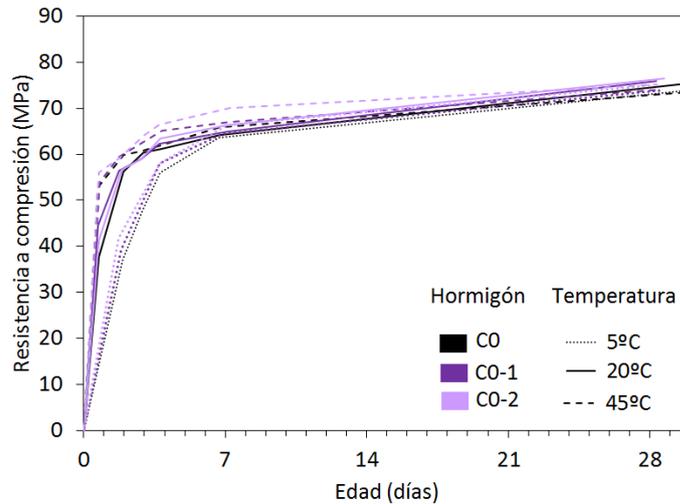


Figura 7.15. Comparación de la evolución de la resistencia a compresión (C0, C0-1 y C0-2)

7.3. Factores que influyen en la correlación entre resistencia a compresión y ensayos no destructivos

A temperatura estándar, se ha estudiado la influencia de los materiales reciclados en las correlaciones entre resistencia a compresión y tres ensayos no destructivos: velocidad de ultrasonidos, índice de rebote y conductividad eléctrica interna.

Además, para las correlaciones con velocidad de ultrasonidos y con índice de rebote, se estudia también la influencia de la temperatura de curado en cada correlación, así como la influencia de los eco-materiales y de la relación agua/cemento en función de la temperatura de curado.

7.3.1. Eco-materiales a temperatura estándar

7.3.1.1 Árido reciclado

En este apartado se analizará la influencia de la utilización de los eco-materiales utilizados en este estudio, en las correlaciones de ensayos no destructivos y resistencia a compresión, a temperatura estándar (20 °C).

Debido a que la resistencia a compresión, la velocidad de ultrasonidos y el índice de rebote son mediciones tomadas en las mismas probetas, no es necesario hacer corrección de madurez, ya que las probetas tienen la misma edad equivalente cuando se efectúan ambas mediciones.

En las figuras 7.16 y 7.17 se observa una clara influencia del contenido de áridos reciclados en las correlaciones entre resistencia a compresión y velocidad de ultrasonidos. La función de ajuste propuesta para la correlación entre velocidad de ultrasonidos y resistencia a compresión es lineal, para cada uno de los hormigones estudiados. En investigaciones con hormigones convencionales, también se propone una relación lineal entre la velocidad de ultrasonidos y la resistencia a compresión a edades tempranas, a partir de una resistencia de 10 MPa [YE01, TRTN14].

Se observa que, tanto en los hormigones vibrados como en los autocompactantes, las rectas de ajuste de correlación, se desplazan hacia abajo a medida que aumenta el porcentaje de árido reciclado de hormigón fino y grueso, es decir, para una misma velocidad de ultrasonidos, la resistencia a

compresión correspondiente es menor, cuanto mayor sea el porcentaje de sustitución de árido reciclado.

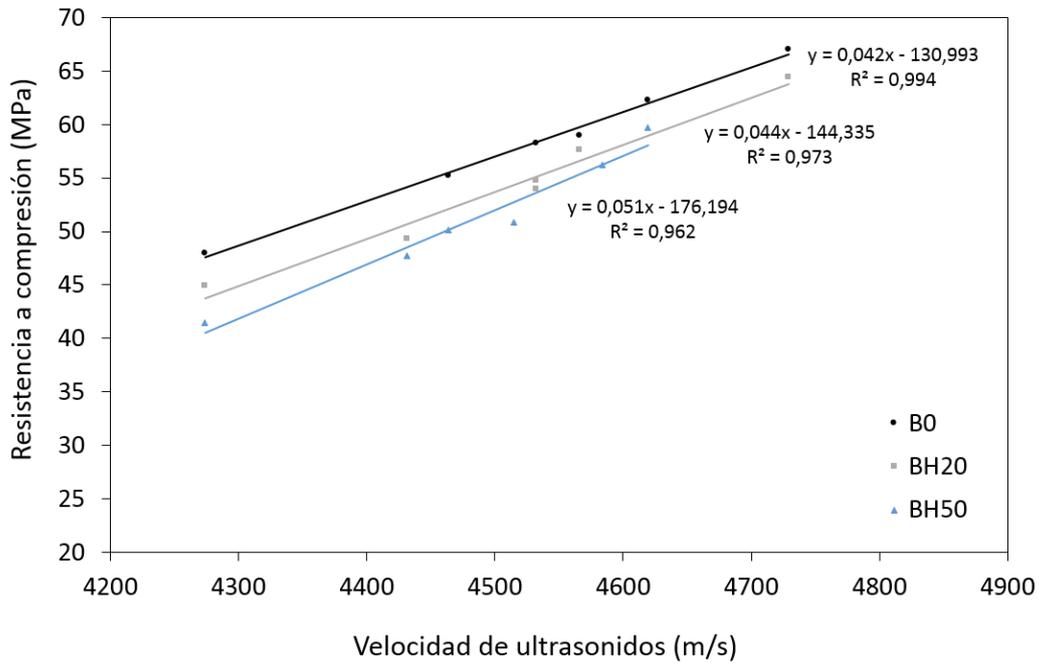


Figura 7.16. Resistencia a compresión en función de la velocidad de ultrasonidos (BO y BH)

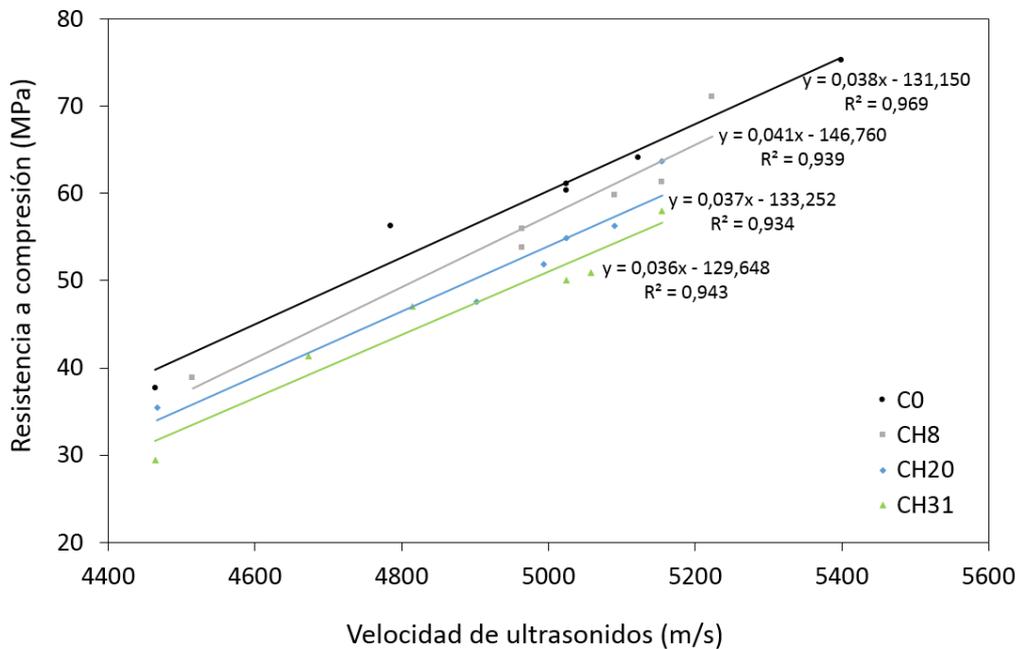


Figura 7.17. Resistencia a compresión en función de la velocidad de ultrasonidos (CO y CH)

Para el hormigón vibrado (figura 7.17), las cuatro rectas de ajuste son prácticamente paralelas y su descenso es proporcional a la cantidad de árido reciclado. En el caso de los hormigones autocompactantes (figura 7.16), con un 50% de árido reciclado, la recta de ajuste de la correlación dista de ser paralela a las demás rectas de correlación. Por ello, al menos en el hormigón

autocompactante estudiado, un alto porcentaje de árido reciclado supone no solo un desplazamiento hacia debajo de las rectas de correlación, sino que además, supone un cambio notable en su pendiente.

Estos resultados contrastan con los obtenidos por otros autores [MAIO03, LATI12] que estudian influencia de los áridos reciclados gruesos en las correlaciones de resistencia a compresión-UPV: Debido a la disminución de la densidad que supone el reemplazo de árido natural por árido reciclado, estas curvas de correlación se desplazan hacia arriba, es decir, para una misma velocidad de ultrasonidos, la resistencia correspondiente es mayor cuanto mayor es la cantidad de árido reciclado sustituido. Según lo expuesto en la presente investigación parece que el árido reciclado fino y grueso utilizado de forma conjunta tiene un efecto contrario a lo observado para hormigones con árido reciclado grueso, por lo que parece que el árido reciclado fino tiene un papel determinante en esta diferencia entre estudios. Cabe destacar que las sustituciones que se han hecho apenas han modificado la densidad del hormigón: la variación de densidad media entre el hormigón de referencia B0 y el BH50 es menor del 3%, y entre el C0 y el CH31 del 3%, variaciones que se dan incluso entre dos probetas de un mismo hormigón en algunas ocasiones.

En cuanto a la influencia de los áridos reciclados de hormigón (finos y gruesos) en las correlaciones entre índice de rebote y resistencia a compresión, se puede afirmar que los áridos reciclados influyen en dichas correlaciones (figura 7.18 y 7.19).

En el caso de los hormigones autocompactantes estudiados, se observa un cierto paralelismo entre las rectas de ajuste (figura 7.18) y un descenso de las mismas lo que conlleva que, para un mismo valor de índice de rebote, la resistencia correspondiente sea menor, cuanto mayor sea la cantidad de árido reciclado.

En el caso de los hormigones vibrados estudiados (figura 7.19), no se observa un patrón claro de influencia de los áridos reciclados en las correlaciones, pero se observa que, al menos en el rango de resistencias estudiadas, para un mismo índice de rebote, la resistencia correspondiente es menor, cuanto mayor es el contenido de árido reciclado.

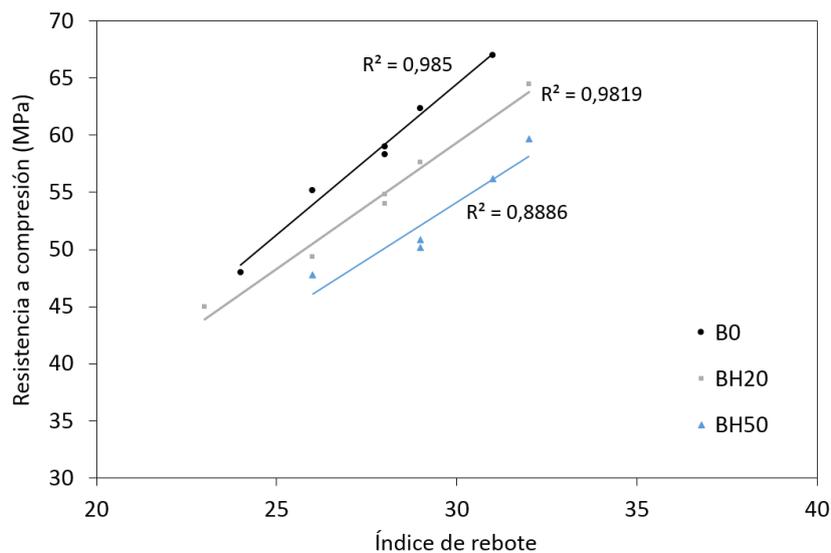


Figura 7.18. Resistencia a compresión en función del índice de rebote (B0 y BH)

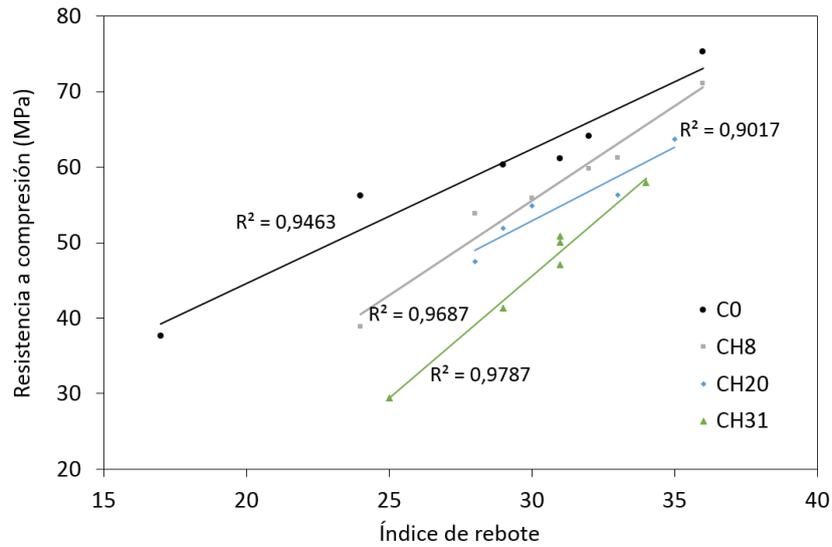


Figura 7.19. Resistencia a compresión en función del índice de rebote (CO y CH)

Para los hormigones vibrados también se ha estudiado la influencia de los áridos reciclados en la evolución de la conductividad así como en sus correlaciones con la resistencia a compresión. Como se puede observar en la figura 7.20, el porcentaje de árido reciclado sustituido influye en la conductividad del hormigón: a partir de 48 horas, se observa como la utilización de áridos reciclados de hormigón (finos y gruesos) aumentan la conductividad del hormigón.

Durante las primeras 12 horas, cuando el hormigón aún está fraguando, la conductividad no guarda una relación clara con la cantidad de árido reciclado: el hormigón CH31 presenta unos valores no coherentes con la hipótesis de que la sustitución de áridos reciclados aumenta la conductividad. Debido a que los datos de resistencia han sido obtenidos a partir de 24 horas, este hecho no influirá en las correlaciones entre resistencia a compresión y conductividad.

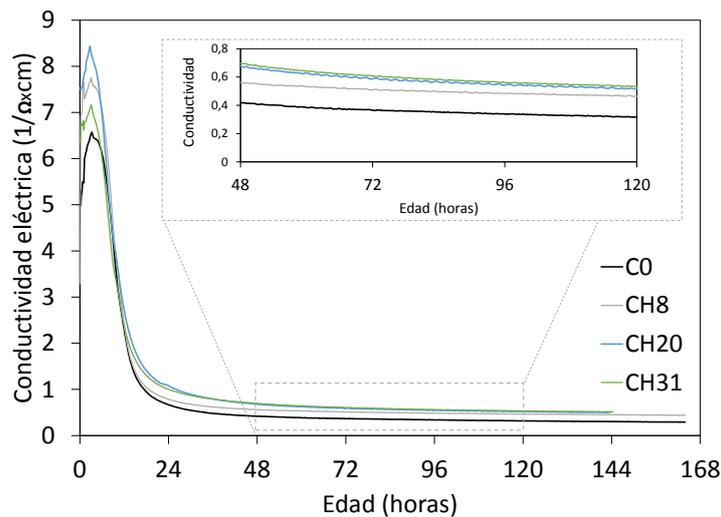


Figura 7.20. Evolución de la conductividad eléctrica (CO y CH)

En la figura 7.21 se puede observar fácilmente que, en las edades señaladas (2, 3 y 6 días), la conductividad eléctrica aumenta con el porcentaje de árido reciclado y que, a medida que transcurren los días y el hormigón va madurando, la conductividad desciende.

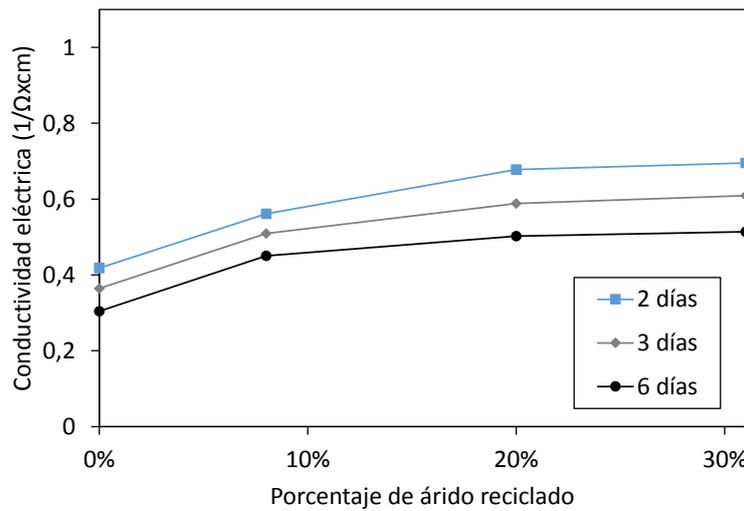


Figura 7.21. Conductividad eléctrica en función del porcentaje de árido reciclado (CO y CH)

Los datos de resistencia a compresión y la conductividad se miden en especímenes de tamaños sustancialmente distintos (resistencia a compresión en probetas cúbicas de 100 mm de lado, y conductividad en probeta prismática de 300 mm x 200 mm x 110 mm). Por ello, es necesario efectuar la corrección de madurez, con el fin de correlacionar los datos de resistencia con los datos de conductividad registrados a las mismas edades equivalentes (véase capítulo 8). Para hacer las correcciones por madurez, se calculan las edades equivalentes de todos y cada uno de los datos de conductividad (ecuación 2.5) y resistencia obtenidos en la campaña experimental. Para hacer el cálculo de la edad equivalente, además de la energía de activación de los hormigones según ASTM C1074-11 [RN04], son necesarios los datos de temperatura interna, que se han registrados mediante sensores internos en probetas de ambos tamaños para cada hormigón (figura 7.22).

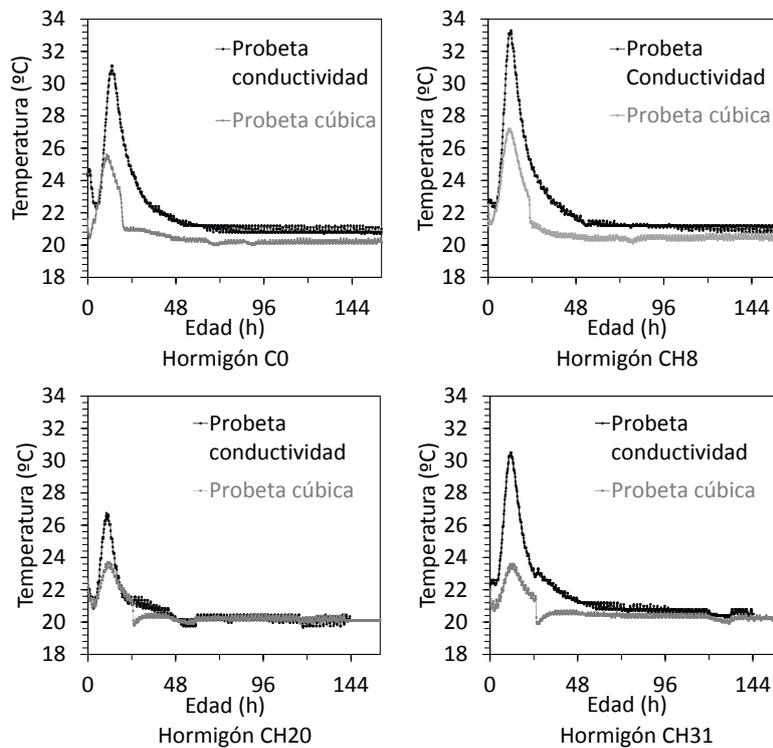


Figura 7.22. Temperatura interna (CO y CH)

En la figura 7.23 se muestra la correlación entre la resistencia a compresión y la conductividad para los hormigones C0 y CH. La correlación de la raíz cuadrada de la conductividad frente a la resistencia a compresión, tiene un buen ajuste lineal para cada uno de los hormigones. Se observa que la sustitución de áridos reciclados de hormigón (finos y gruesos) influye en dicha correlación. Parece que con altos contenidos de árido reciclado, la recta de ajuste es considerablemente más tendida (menor pendiente en valor absoluto) que la del hormigón de referencia y el hormigón con bajo contenido de árido reciclado (CH8). Por tanto, una variación de 0,1 mS/cm en la conductividad implica una variación de resistencia mucho mayor en el caso del C0 y del CH8, que en el caso de los hormigones con cantidades importantes de árido reciclado (CH20 y CH31).

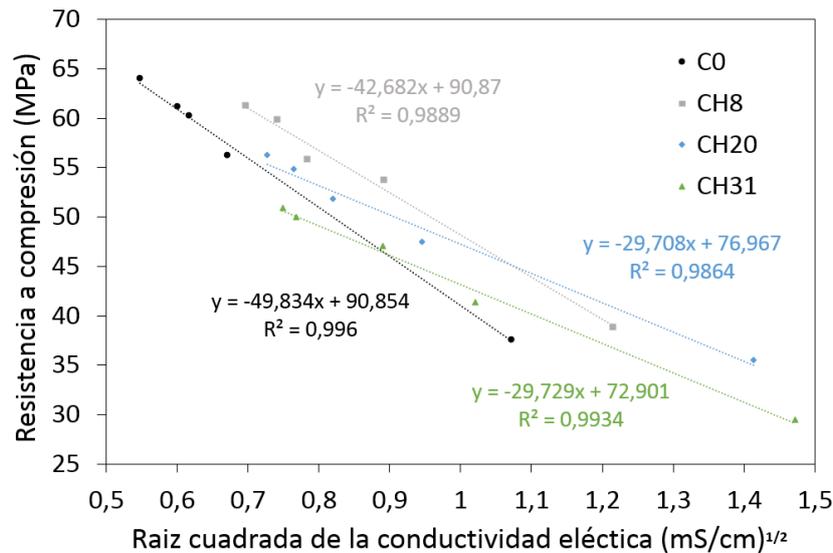


Figura 7.23. Resistencia a compresión en función de la conductividad eléctrica (C0 y CH)

7.3.1.2. Cenizas de biomasa

En la figura 7.24 se observa que a relación entre velocidad de ultrasonidos y resistencia a compresión es prácticamente lineal. La cantidad de cenizas de biomasa influye en la correlación de forma clara: cuanto más cantidad de ceniza, más se desplazan hacia abajo las curvas de correlación. Esto se traduce en que, para una misma velocidad de ultrasonidos, la resistencia a compresión correspondiente es menor cuanto mayor sea el ratio de cenizas de biomasa. Por tanto, cabe señalar que las cenizas de biomasa influyen en las correlaciones existentes entre velocidad de ultrasonidos y resistencia a compresión. Por el contrario, según Demirboga [DEMI04], el uso de cenizas volantes de carbón como adición no parece afectar en dicha correlación.

Parece que la utilización de cenizas de biomasa, no solo afecta a la cinética de adquisición de resistencia, sino que, además, afecta a la microestructuración del hormigón debido a la variación de la velocidad de desarrollo de dichas propiedades, lo que se traduce en el hecho de que para una misma velocidad de ultrasonidos, a mayor cantidad de cenizas de biomasa, la resistencia a compresión correspondiente es menor.

Pese a que las variaciones de resistencia entre distintas mezclas no son constantes con el tiempo (figura 7.6), la variación que hay entre las curvas de correlación de velocidad de ultrasonidos frente a resistencia a compresión es prácticamente constante, ya que las rectas que relacionan estas variables son prácticamente paralelas (figura 7.24). Por tanto, al comparar las curvas de correlación entre

velocidad de ultrasonidos y resistencia a compresión, se observa que la diferencia entre el valor resistencia correspondiente a una misma velocidad de ultrasonidos, correspondiente a distintas mezclas, es prácticamente constante. Este desplazamiento de curvas se puede cifrar en 4,5 MPa para la dosificación CC15 y de 10,6 MPa para CC30 (figura 7.24).

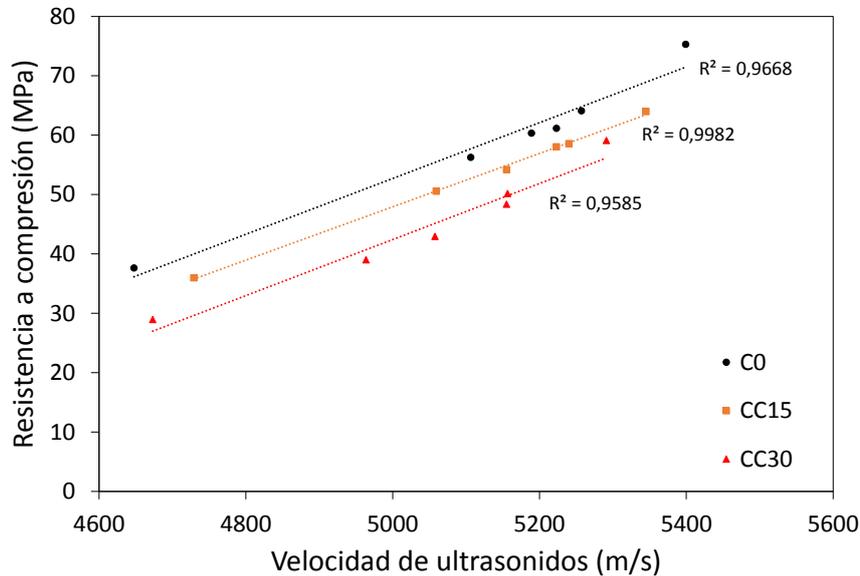


Figura 7.24. Resistencia a compresión en función de velocidad de ultrasonidos (C0 y CC)

Por otra parte, en la gráfica de evolución de la resistencia (figura 7.6), se observa una diferencia de resistencias en el tramo estabilizado en torno a 5,8 MPa para CC15 y de 14,6 MPa para CC30. El diferencial constante entre dos curvas de “velocidad de ultrasonidos” frente a “resistencia a compresión” obtenido a cualquier edad (4,5 MPa en CC15 y 10,6 MPa en CC30), es prácticamente igual a las diferencias que hay entre la resistencia a compresión cuando esta ya está estabilizada (5,8 MPa en CC15 y 14,6 MPa en CC30) dividida por un valor prácticamente constante, en los casos estudiados. Parece ser que la diferencia entre las resistencias correspondientes a una misma velocidad de ultrasonidos (a cualquier edad) está relacionada con la diferencia de resistencia de los hormigones una vez esta se ha estabilizado, de modo que, se podría estimar qué grado de repercusión en la resistencia, tendrá una sustitución de cemento por cenizas de biomasa, de forma anticipada.

En cuanto a la influencia de las cenizas de biomasa en las correlaciones entre índice de rebote y resistencia a compresión (figura 7.25), con un 30% de sustitución de cemento por cenizas de biomasa (CC30) se observa que en la mayor parte de los casos, para un mismo índice de rebote la resistencia es menor cuanto más cantidad de cenizas tenga.

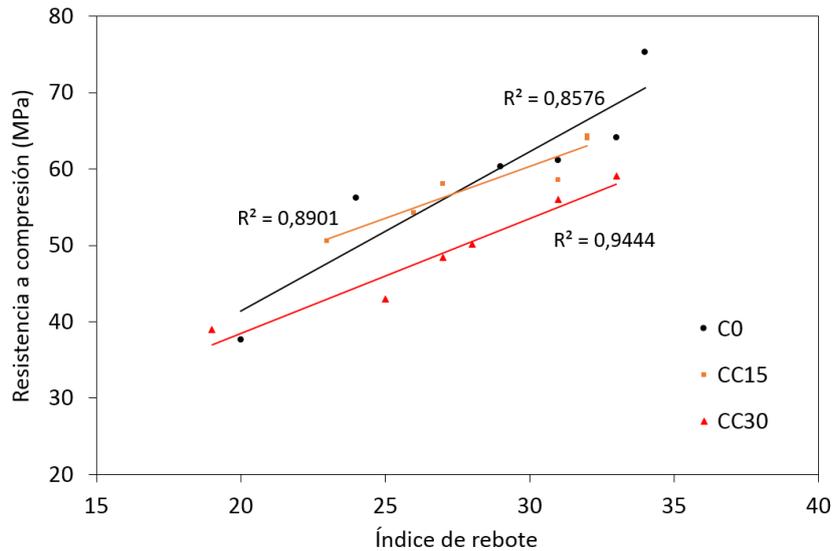


Figura 7.25. Resistencia a compresión en función del índice de rebote (C0 y CC)

La figura 7.26 muestra la evolución de la conductividad para las diferentes mezclas. Se observa que las cenizas de biomasa afectan a la cinética de evolución de la conductividad. Durante las primeras 6-8 horas, cuando el hormigón está fresco, se observan grandes diferencias entre las dosificaciones con distintos porcentajes de cenizas de biomasa. A partir de entonces se observa un cierto paralelismo entre las curvas de evolución, sobre todo a partir de 24 horas de edad, cuando la variación de conductividad con respecto al tiempo se suaviza y se puede observar de forma clara la dependencia de la conductividad respecto al porcentaje de cenizas empleado; cuanto mayor es el porcentaje de cemento sustituido por cenizas, mayor es la conductividad. A partir de 4 días, la conductividad parece estar estabilizada. Sólo se han tomado valores hasta 7 días (168 horas) por una cuestión de disponibilidad y operatividad del equipo, por lo que el análisis de la evolución de la conductividad y de sus correlaciones con la resistencia a compresión será únicamente para edades tempranas (hasta 7 días).

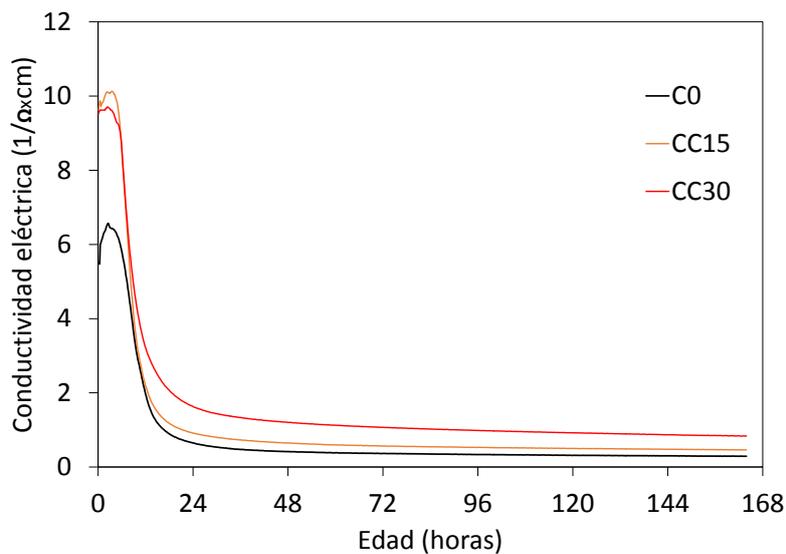


Figura 7.26. Evolución de la conductividad eléctrica (C0 y CC)

En la figura 7.27 se puede observar fácilmente que la conductividad eléctrica aumenta con el porcentaje de cenizas de biomasa y que, a medida que transcurren los días y el hormigón va madurando, la conductividad desciende, al igual que ocurriría en los hormigones con árido reciclado.

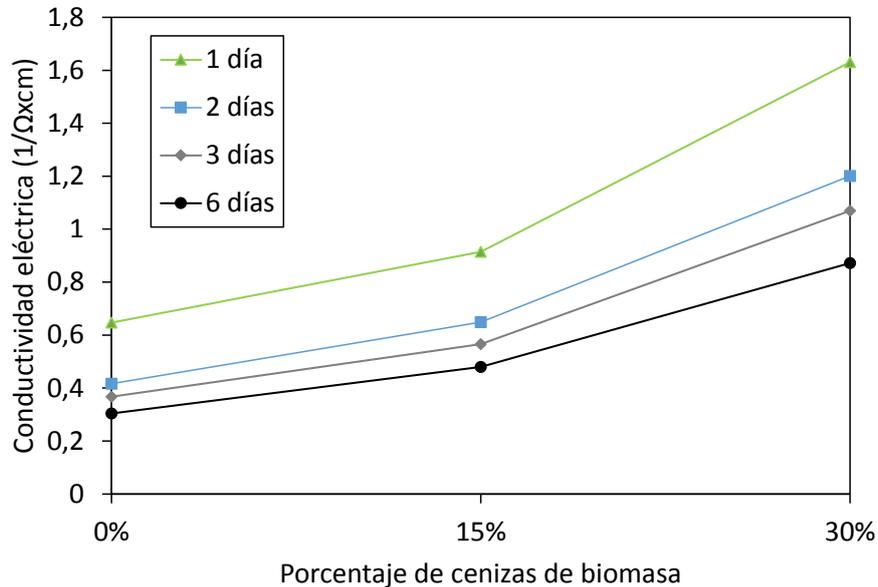


Figura 7.27. Conductividad eléctrica en función del porcentaje de árido reciclado (CO y CC)

Como ya se ha comentado anteriormente, los datos de resistencia a compresión y la conductividad se miden en especímenes de tamaños sustancialmente distintos, por lo que es necesario efectuar la corrección de madurez, con el fin de correlacionar los datos de resistencia con los datos de conductividad registrados a las mismas edades equivalentes.

En la figura 7.28 se muestran los datos de temperatura interna, que se han registrados mediante sensores internos en probetas de ambos tamaños para cada hormigón.

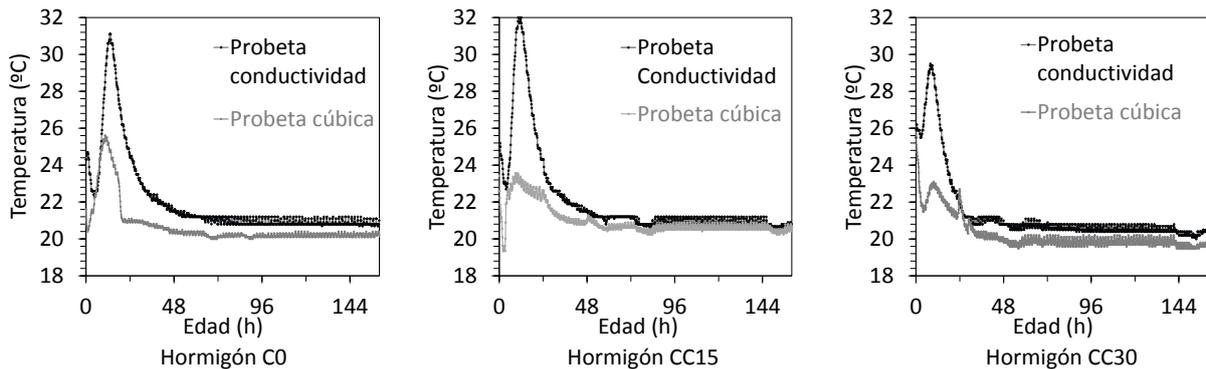


Figura 7.28. Temperatura interna (CO y CC)

Una vez hechas las correcciones de madurez, se correlacionan los datos de conductividad y resistencia a compresión, para cada hormigón, a la misma edad equivalente. En la figura 7.29 puede apreciarse que para resistencias superiores a 30 MPa existe una relación lineal entre la resistencia a compresión y la raíz cuadrada de la conductividad.

Se observa que para un porcentaje de sustitución de cenizas de biomasa del 15% (CC15), la relación entre conductividad eléctrica y resistencia a compresión apenas varía. Por el contrario, con un 30% de cenizas de biomasa (CC30) se observan diferencias muy importantes (entorno a un 20% de diferencia entre resistencias para un mismo valor de conductividad). Por tanto, la relación entre la conductividad y la resistencia varía en gran medida cuando se sustituye una cantidad importante de cemento por cenizas de biomasa.

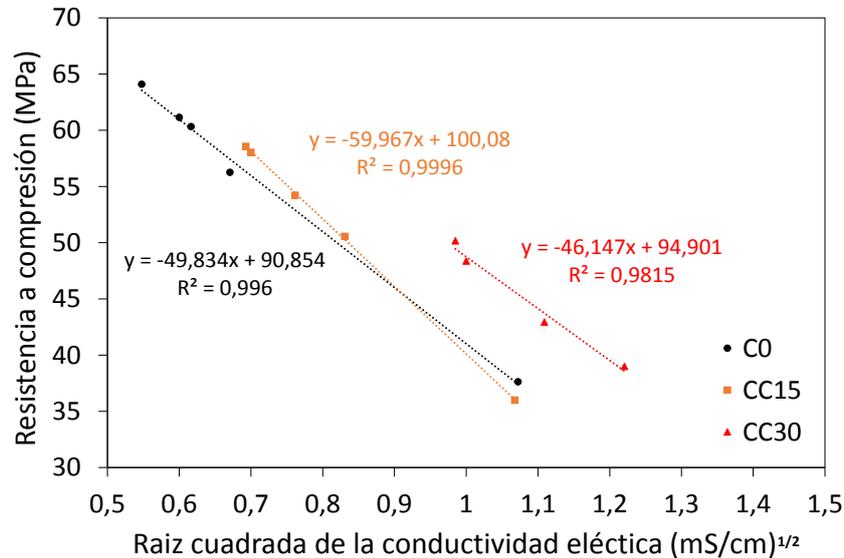


Figura 7.29. Resistencia a compresión en función de la conductividad eléctrica (CO y CC)

7.3.2. Temperatura de curado

En una estructura existen puntos que han desarrollado distintas temperaturas internas debido a las variaciones de espesor, de volumen de hormigón que rodea cada punto, de proximidad a los contornos y de superficie de contorno. Estos factores y la temperatura exterior a la que está sometida la estructura, hacen variar en gran medida la temperatura interna durante el curado, la cual probablemente influya en las correlaciones entre la velocidad de ultrasonidos y la resistencia a compresión y, por tanto, en la estimación de la resistencia mediante este ensayo no destructivo.

En este apartado se estudia la influencia de la temperatura de curado en las correlaciones entre resistencia a compresión y velocidad de ultrasonidos. En caso de que la temperatura influya de forma notable en dichas correlaciones, teniendo en cuenta que diferentes puntos de la estructura se encuentran a temperaturas distintas durante el periodo de fraguado y endurecimiento, se podría llegar a concluir que es importante tener en cuenta la zona de medición de ultrasonidos y comprobar que dicha zona y las probetas o testigos a partir de los cuales se hicieron las curvas de calibración, han estado sometidas a unas temperaturas similares durante el fraguado y endurecimiento. De lo contrario, se podría estar incurriendo en un grave error de estimación de la resistencia, pudiendo ser necesarias correcciones. Observar cual es la tendencia de variación de las curvas de correlación en función de la temperatura de curado es uno de los objetivos de este estudio.

En las figuras 7.30, 7.31 y 7.32 se muestran las correlaciones entre velocidad de ultrasonidos y resistencia a compresión para los hormigones B0 y BH, CO y CH y CC respectivamente.

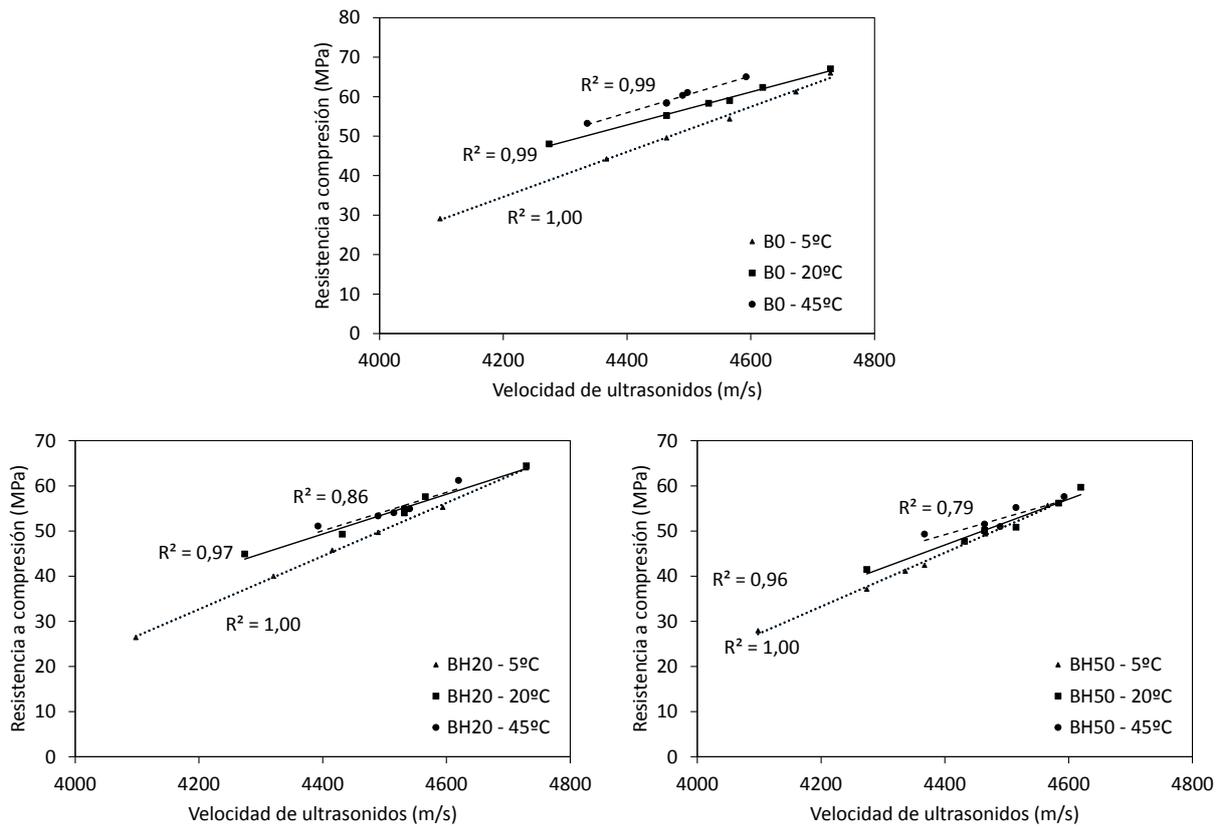


Figura 7.30. Resistencia a compresión en función de la velocidad de ultrasonidos (BO y BH)

Como se puede observar en la figura 7.30, estas correlaciones dependen en gran medida de la temperatura de curado, sobre todo, a edades más tempranas. Esta dependencia no es lineal: la diferencia entre las correlaciones correspondientes a temperaturas de curado de 20°C y 45°C (diferencia de 25°C) es mucho menor que la diferencia entre correlaciones de 20°C y 5°C (diferencia 15°C). Por tanto, a temperaturas mayores que la estándar, si se utiliza la curva de correlación hallada con temperatura estándar para estimar la resistencia, se comete un error de subestimación de la resistencia, casi despreciable en la mayoría de los casos. Por el contrario, para temperaturas menores que la estándar, si se estima la resistencia con la correlación hallada con temperaturas estándar, a edades tempranas se comete un grave error de sobreestimación de la resistencia, lo que conlleva una falta de seguridad inadmisibles. A 28 días, el error cometido debido a la diferencia de temperaturas es mucho menor, casi despreciable. Por tanto, para este tipo de hormigones, autocompactantes, la temperatura es un factor a tener en cuenta a la hora de estimar la resistencia con ultrasonidos a edades tempranas. Cabe apuntar que se observa que el ajuste lineal de las correlaciones entre velocidad de ultrasonidos y resistencia a compresión se ajusta con un R^2 menor, cuanto más se aumenta la cantidad de árido reciclado

En el caso de los hormigones C vibrados, en la figura 7.31, se observa como también existe una dependencia muy similar a las de los hormigones B (autocompactantes), por lo que la temperatura de curado también debe ser tomada en cuenta a edades tempranas, si bien en este caso cabe destacar que las correlaciones tienen una R^2 similar en todos los casos.

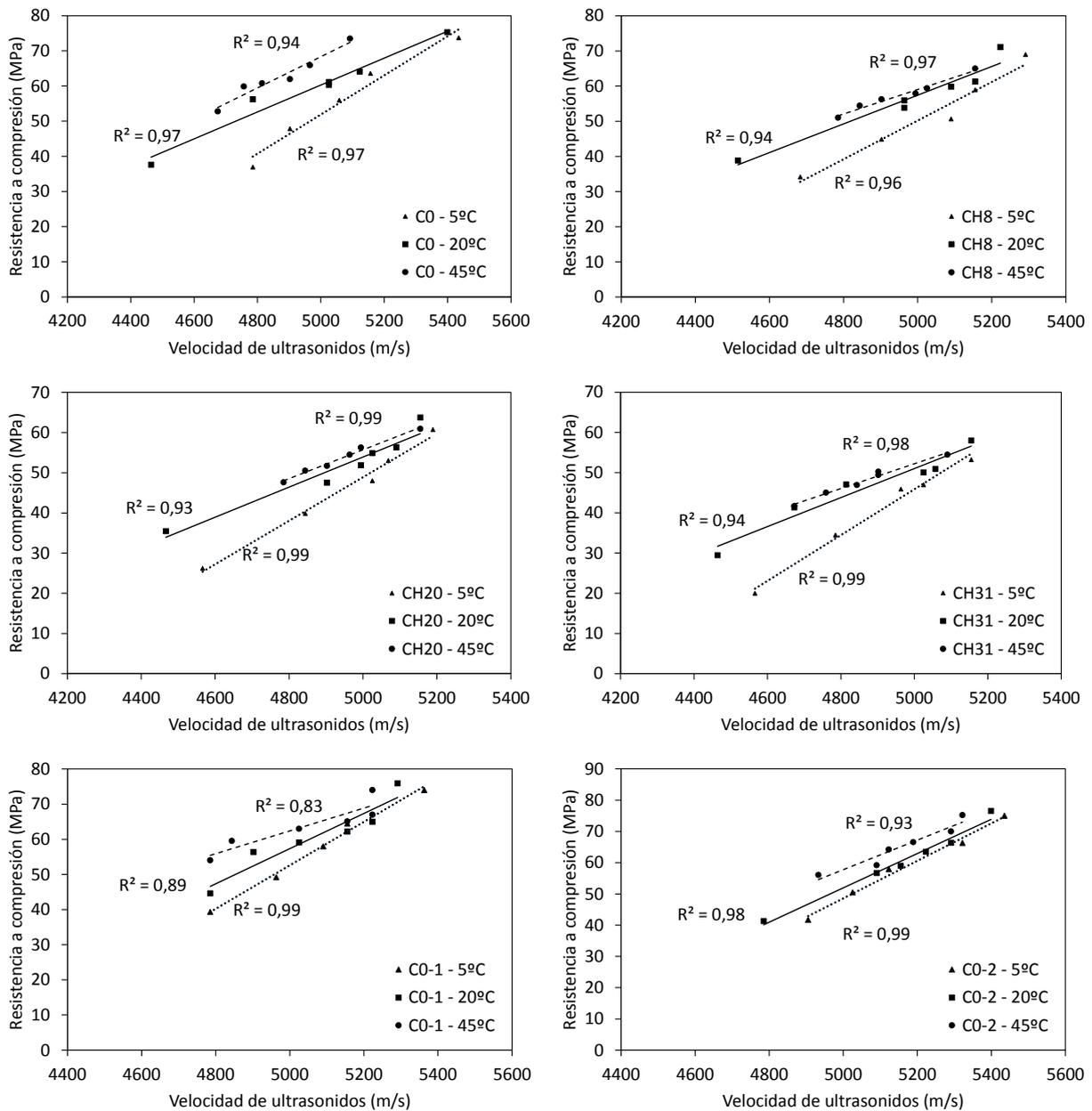


Figura 7.31. Resistencia a compresión en función de la velocidad de ultrasonidos (CO y CH)

En el caso de los hormigones con cenizas de biomasa (CC), se incrementa el error de subestimación en los hormigones a temperatura de curado mayor que la estándar. Por el contrario, con bajos porcentajes de adición de cenizas de biomasa, el error de sobreestimación debido a temperaturas por debajo de la estándar se ve aminorado, aunque sigue siendo inadmisiblemente igualmente (figura 7.32). Por ello, y a la vista de los gráficos, se puede afirmar que en los hormigones y eco-hormigones vibrados de alta resistencia, la correlación entre la velocidad de ultrasonidos y la resistencia a compresión depende en gran medida de la temperatura de curado.

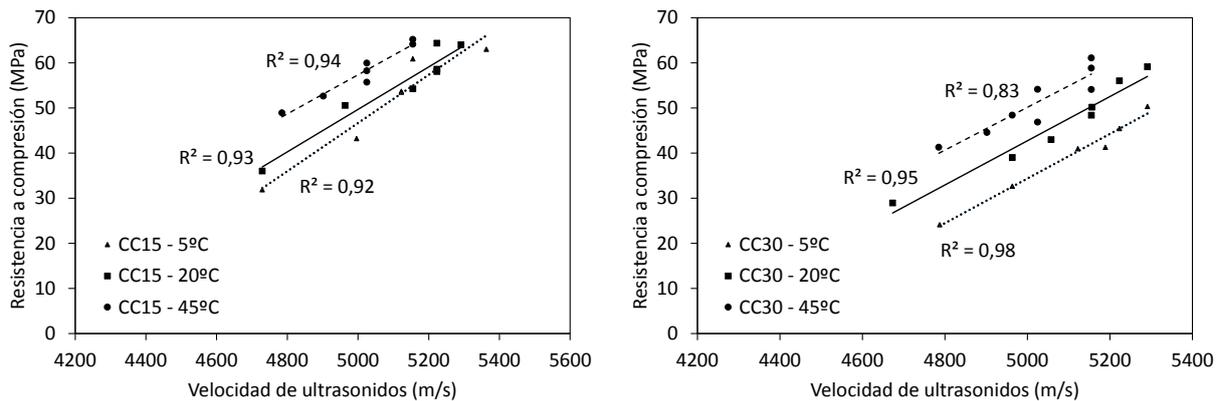


Figura 7.32. Resistencia a compresión en función de la velocidad de ultrasonidos (CC)

Como conclusión general aplicable a todos los hormigones estudiados en este punto (hormigones y eco-hormigones, vibrados y autocompactantes, con áridos reciclados finos y gruesos o con cenizas de biomasa), se puede afirmar que:

- Se observa una influencia de la temperatura en las curvas de correlación entre velocidad de ultrasonidos y resistencia a compresión, sobre todo, a edades tempranas. Para una misma velocidad de ultrasonidos, la resistencia a compresión es distinta en función de la temperatura de curado.
- Dicha dependencia no es lineal en función de la temperatura; la diferencia entre la correlación 20°C y 45°C es mucho menor que la diferencia entre 20°C y 5°C, pese a que la diferencia de temperatura es mayor en el primer caso.
- A temperaturas mayores que la estándar, si se utiliza la curva de correlación hallada con temperatura estándar se comete un pequeño error de subestimación de la resistencia en el caso de los hormigones sin materiales reciclados o en hormigones con árido reciclado. En el caso de hormigones con cenizas de biomasa, el error de subestimación que se cometería es ya digno de consideración.
- A temperaturas menores que la estándar, si se estima la resistencia con la correlación hallada con temperaturas estándar, a edades tempranas se comete un grave error de sobreestimación de la resistencia, lo que conlleva una falta de seguridad inadmisibles.
- Estos errores debido a las diferencias de temperatura de curado del hormigón de ensayo y del hormigón de las curvas de estimación es casi despreciable a 28 días en todos los hormigones excepto en los que tienen cenizas de biomasa. Este hecho era previsible, ya que, como se expone en el capítulo 4 de caracterización de materiales, la activación del poder cementante de las cenizas de biomasa depende de la temperatura de curado, por lo que las propiedades de los hormigones con adiciones de cenizas de biomasa son más susceptibles a los cambios de temperatura de curado durante el fraguado y endurecimiento.

Teniendo en cuenta estas tendencias de influencia de la temperatura comunes a los 9 hormigones estudiados en este apartado, se propone una aplicación práctica de estas conclusiones:

En una estructura existen distintos puntos que han desarrollado distintas temperaturas internas debido a las variaciones de espesor, de volumen de hormigón que rodea cada punto, de proximidad a los contornos y de superficie de contorno. Estos factores provocan variaciones de temperatura de

interna durante el fraguado, las cuales influyen en las correlaciones entre ultrasonidos y resistencia a compresión. La figura 7.33 muestra la evolución de la temperatura interna de dos probetas; una probeta cilíndrica de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura y otra probeta cilíndrica de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Para obtener dicha evolución se han instrumentado las dos probetas citadas con sensores de temperatura interna. Se han registrado las temperaturas internas cada 10 minutos desde el instante en que se produce el hormigonado. En dicha figura se puede observar una clara diferencia en la evolución de la temperatura interna durante el fraguado y endurecimiento.

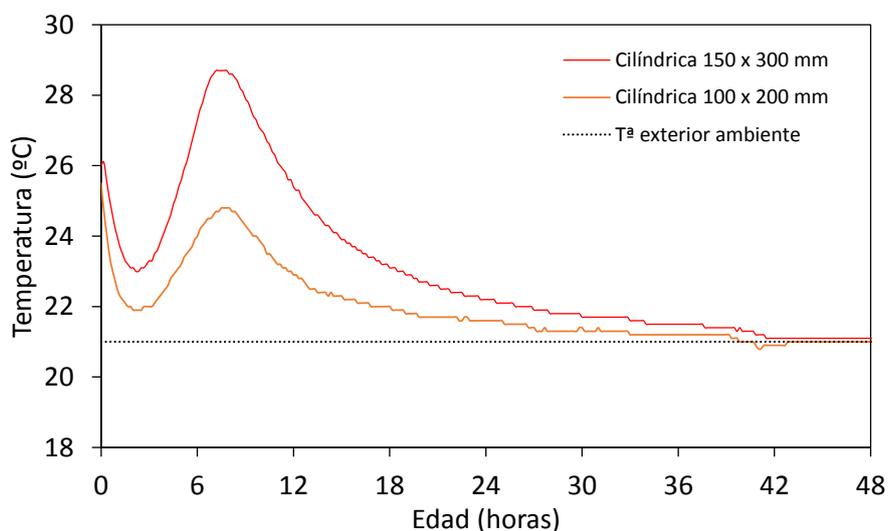


Figura 7.33. Evolución de la temperatura interna de dos probetas de distinto tamaño

Como se puede observar en las figuras 7.30, 7.31, 7.32, la temperatura influye en las correlaciones entre velocidad de ultrasonidos y resistencia a compresión.

Teniendo en cuenta estos dos hechos: diferentes puntos de la estructura se encuentran a temperaturas distintas durante el periodo de fraguado y endurecimiento, y que la temperatura influye en las correlaciones entre velocidad de ultrasonidos y resistencia a compresión, se concluye que es importante tener en cuenta la zona de medición de ultrasonidos y comprobar que las probetas o testigos a partir de los cuales se hicieron las curvas de calibración, han estado sometidas a unas temperaturas similares durante el fraguado y endurecimiento. De lo contrario, se podría estar incurriendo en un grave error de estimación de la resistencia. Debido a este hecho, en el caso de la utilización de testigos para hallar la curva de correlación de ultrasonidos y resistencia a compresión, para estimar la resistencia a compresión haciendo mediciones in situ, se recomienda extraer los testigos de la zona que presumiblemente haya alcanzado menores temperaturas durante su fraguado, siempre que esto sea posible, teniendo en cuenta el volumen de hormigón, la superficie de exposición y la orientación de la estructura (soleamiento); de este modo, la curva de estimación de la resistencia hallada mediante el ensayo de testigos se quedará del lado de la seguridad.

Índice de rebote

En todos los hormigones estudiados se ha observado una cierta influencia de la temperatura en las correlaciones entre índice de rebote y resistencia a compresión, si bien no se ha encontrado una tendencia común entre ellos (figuras 7.34, 7.35, 7.36). Para cada hormigón y temperatura, la correlación se ajusta a una recta.

Únicamente en los hormigones autocompactantes (figura 7.34) se ha encontrado una cierta tendencia común de la influencia de la temperatura en las correlaciones entre índice de rebote y resistencia a compresión. En este tipo de hormigones, tanto en el de referencia (B0) como en los eco-hormigones con árido reciclado (BH20 y BH50), se observa cómo la pendiente de dicha recta de correlación es menor, cuanto mayor es la cantidad de árido reciclado. Por tanto, una variación de 1 en el índice de rebote, equivale a una variación mayor de resistencia a compresión, cuanto menor sea la temperatura de curado.

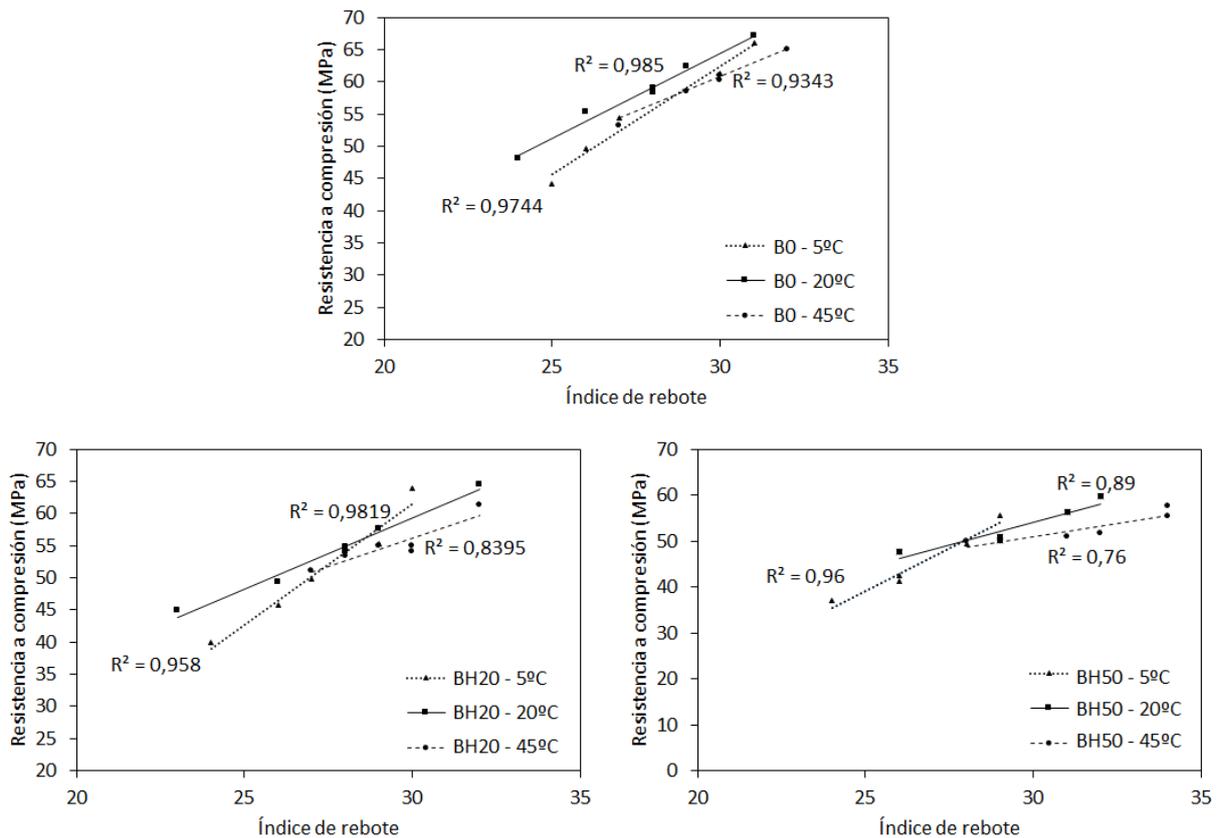


Figura 7.34. Resistencia a compresión frente a índice de rebote (B0 y BH)

En La figura 7.35 se puede observar la influencia de la temperatura en estas correlaciones para los hormigones C0 de referencia, CH (con distintos porcentajes de árido reciclado) y los dos hormigones basados en el de referencia en el que únicamente se varía la relación a/c (C0-1 y C0-2). Dentro de este grupo de hormigones, en los que no se sustituye árido reciclado (C0, C0-1 y C0-2), se observa una mayor influencia de las altas temperaturas, mientras que, para los hormigones con árido reciclado (CH), parece que existe una mayor influencia de las bajas temperaturas, en cualquier caso, no se observa una tendencia común de la influencia de la temperatura en estas correlaciones.

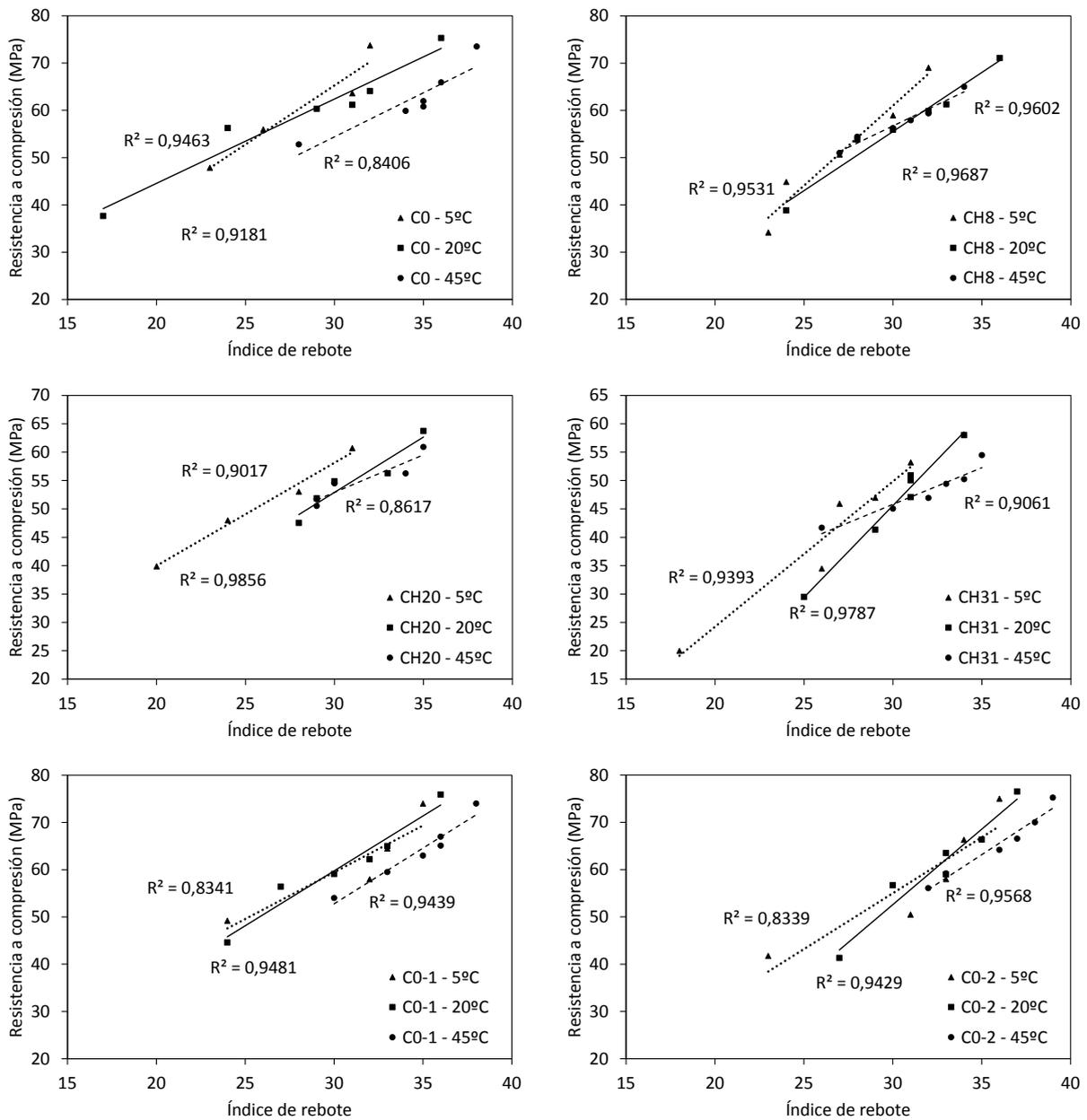


Figura 7.35. Resistencia a compresión frente a índice de rebote (CO y CH)

En la figura 7.36 se muestran las correlaciones entre resistencia a compresión e índice de rebote para las tres temperaturas de curado estudiadas para los hormigones con cenizas de biomasa. Parece que las bajas temperaturas tienen una mayor influencia en las correlaciones de estos hormigones (CC), pero no se observa ninguna tendencia clara debida a la modificación de la temperatura de curado.

Por tanto, se puede afirmar que, para todos los hormigones estudiados, tanto los de referencia como los eco-hormigones con materiales reciclados, la temperatura de curado influye en las correlaciones entre resistencia a compresión e índice de rebote, pero no se observa una tendencia común.

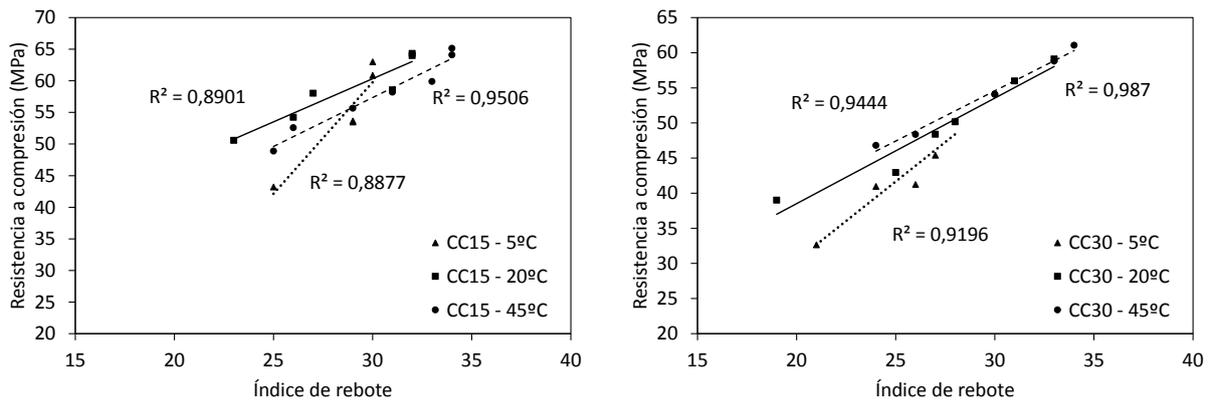


Figura 7.36. Resistencia a compresión frente a índice de rebote (CC)

7.3.3. Eco-materiales en función de la temperatura de curado

7.3.3.1 Árido reciclado

Velocidad de ultrasonidos

En la figura 7.37 se representa de forma conjunta las correlaciones entre la resistencia a compresión y la velocidad de ultrasonidos para los hormigones B0 y BH y en la 7.38 para los hormigones C0 y CH. Se observa un cierto paralelismo entre las curvas de correlación de una misma temperatura así las líneas de correlación presentan una pendiente similar para cada temperatura. Esto puede indicar que la temperatura de curado influye en la pendiente de la recta de correlación entre velocidad de ultrasonidos y resistencia a compresión, independientemente de la cantidad de árido reciclado que contenga el hormigón.

En cuanto a la influencia de los áridos reciclados, tanto en el hormigón autocompactante (figura 7.37) como en el hormigón vibrado (figura 7.38), se observa un desplazamiento hacia abajo de las curvas de correlación conforme aumenta el porcentaje de sustitución de áridos naturales por áridos reciclados en todas las temperaturas (a excepción del BH50 a 5°C). Por tanto, la tendencia de influencia de los áridos reciclados en estas curvas de correlación, observada en el apartado 7.3.1.1 a temperatura estándar, también es aplicable para todas temperaturas: para una misma velocidad de ultrasonidos, la resistencia correspondiente es menor cuanto mayor sea la cantidad de áridos reciclado. Este hecho se observa en todas las temperaturas estudiadas, pero, cabe destacar que la influencia de los áridos reciclados en las curvas de correlación varía en función de la temperatura de curado.

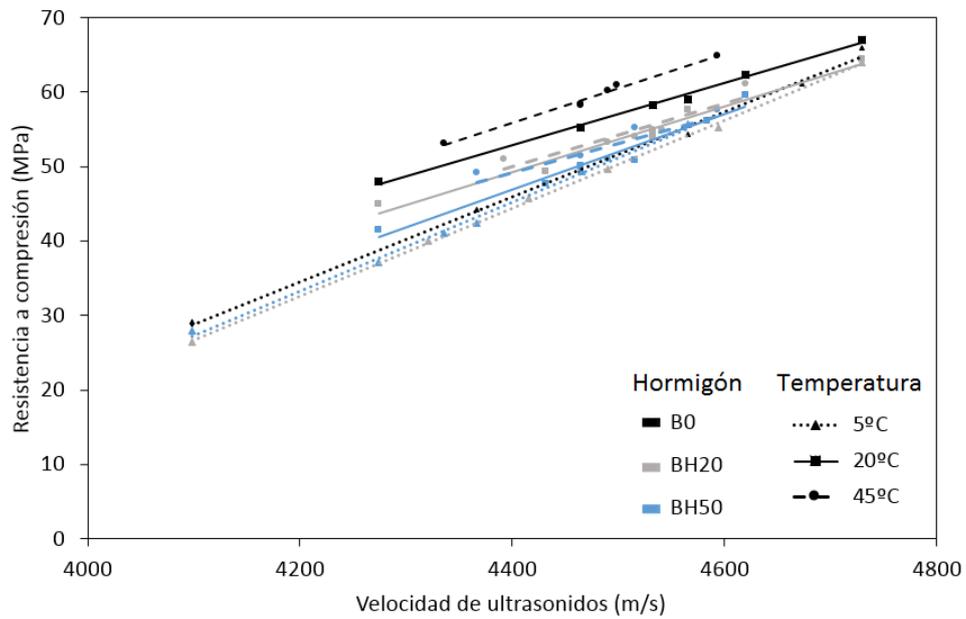


Figura 7.37. Comparación de resistencia a compresión vs. velocidad de ultrasonidos (B0 y BH)

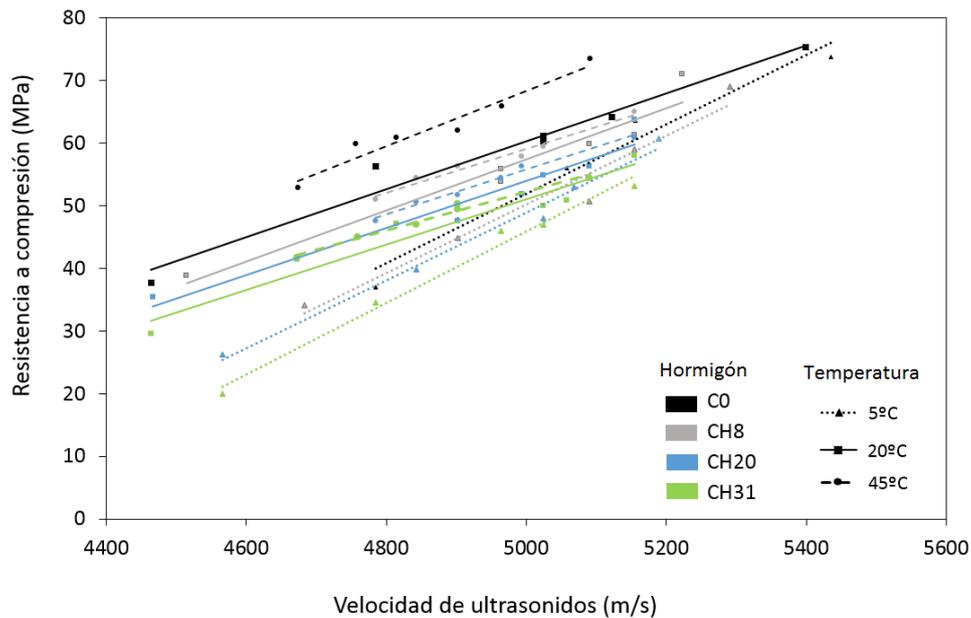


Figura 7.38. Comparación de resistencia a compresión vs. velocidad de ultrasonidos (C0 y CH)

Se observa que, cuanto mayor es la temperatura de curado, mayor es la influencia de los áridos reciclados en las curvas de correlación, tanto en el hormigón vibrado como en el autocompactante. La influencia de los áridos reciclados en estas curvas de correlación es mucho menor en los hormigones curados a 5°C. De hecho, la correlación para el hormigón autocompactante con un 50% de árido reciclado (BH50), con una temperatura de curado de 5°C presenta un pequeño desplazamiento hacia arriba con respecto a la correlación del BH20 de esa misma temperatura (efecto contrario que en el resto de los casos), aunque dicho desplazamiento es tan pequeño que pueden considerarse las curvas prácticamente coincidentes.

Índice de rebote

En cuanto a la influencia de los áridos reciclados en las correlaciones entre índice de rebote y resistencia a compresión, en los hormigones vibrados, se observa una tendencia clara para todos los hormigones excepto para el CH8. Así la utilización de árido reciclado, provoca un descenso de las rectas de ajuste de esta correlación (figura 7.39 y 7.40); tanto a temperatura estándar (20°C) como a temperaturas más bajas y más altas.

La influencia de los áridos reciclados en estas curvas de correlación es similar para todas las temperaturas, si bien, esta influencia parece ser ligeramente inferior a temperaturas altas (rectas de los distintos hormigones más juntas a 45°C).

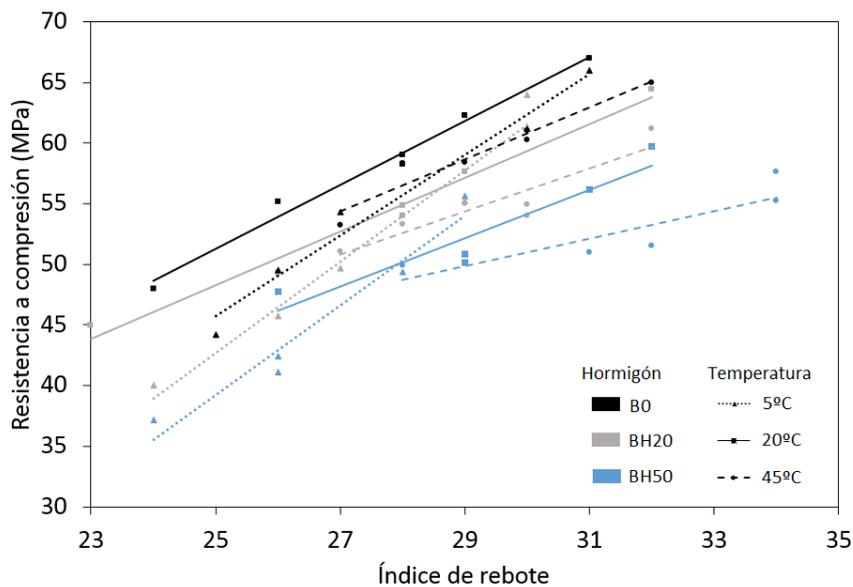


Figura 7.39. Comparación de resistencia a compresión vs. índice de rebote (BO y BH)

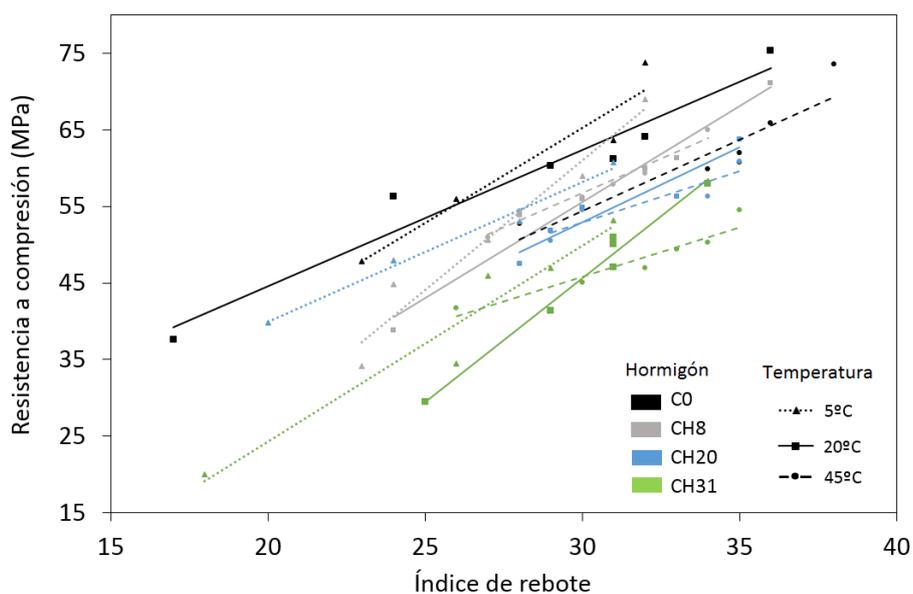


Figura 7.40. Comparación de resistencia a compresión vs. índice de rebote (CO y CH)

7.3.3.2. Cenizas de biomasa

Velocidad de ultrasonidos (UPV)

En la figura 7.41 se puede observar que igual que ocurre en los hormigones convencionales y con los eco-hormigones con áridos reciclados, en los hormigones con cenizas de biomasa, para cada temperatura existe un cierto paralelismo entre las rectas de correlación (entre UPV y resistencia a compresión) de los hormigones con distintos porcentajes de cenizas de biomasa, que se desplazan hacia abajo al aumentar el contenido de material reciclado. Esto puede indicar que la temperatura de curado influye en la pendiente de la recta de correlación entre velocidad de ultrasonidos y resistencia a compresión, independientemente de la cantidad de cenizas de biomasa.

Como ya se ha apuntado anteriormente, la influencia de los áridos reciclados en las curvas de correlación es mucho menor en los hormigones curados a 5°C. Por el contrario, en el caso de la sustitución de parte del cemento por cenizas de biomasa, a bajas temperaturas (5°C), la influencia de la utilización de este material reciclado (cenizas de biomasa) en las correlaciones, es similar a la observada a 20°C y 45°C (figura 7.41); esto puede ser debido a la influencia de la temperatura en la activación del poder puzolánico de las cenizas de biomasa anteriormente analizada (Véase capítulo 5).

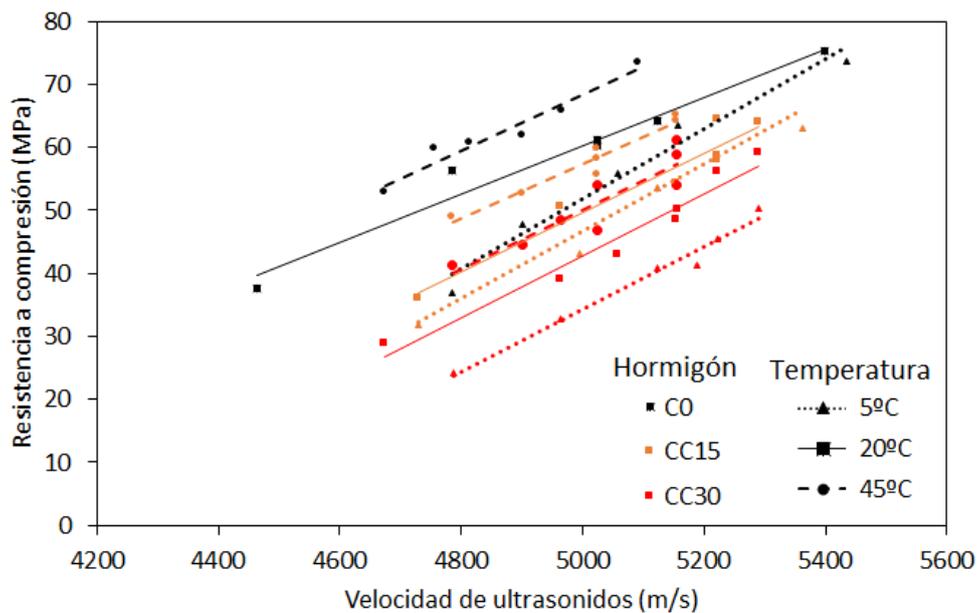


Figura 7.41. Comparación de resistencia a compresión vs. velocidad de ultrasonidos (CO y CC)

Índice de rebote

De la figura 7.42 se puede concluir que las correlaciones entre resistencia a compresión e índice de rebote no guardan una relación clara en función de la temperatura ni en función de la cantidad de cenizas de biomasa.

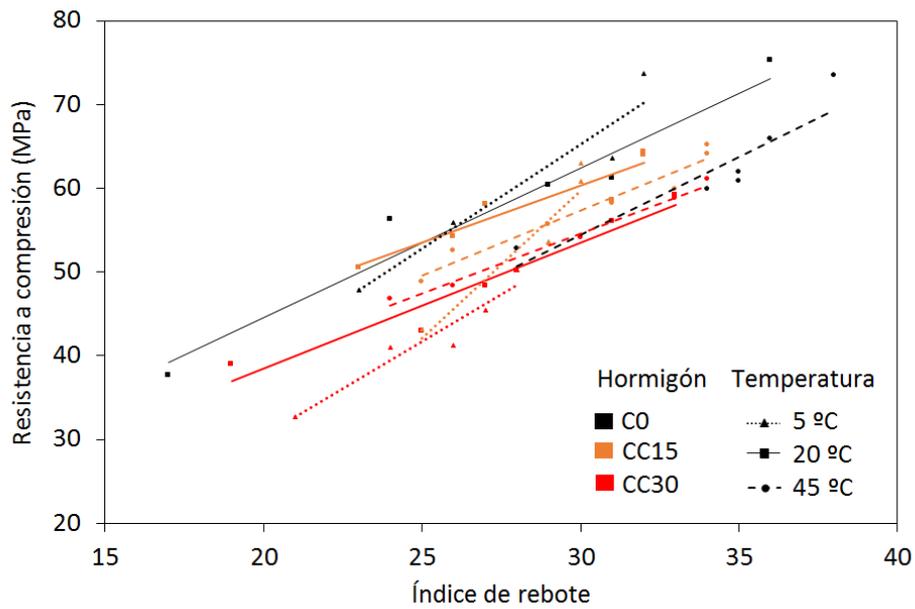


Figura 7.42. Comparación de resistencia a compresión vs. índice de rebote (CO y CC)

7.3.4. Relación agua/cemento en función de la temperatura de curado

Velocidad de ultrasonidos (UPV)

En la figura 7.43, se puede observar la influencia del ratio agua/cemento en las correlaciones entre velocidad de ultrasonidos y resistencia a compresión para distintas temperaturas de curado.

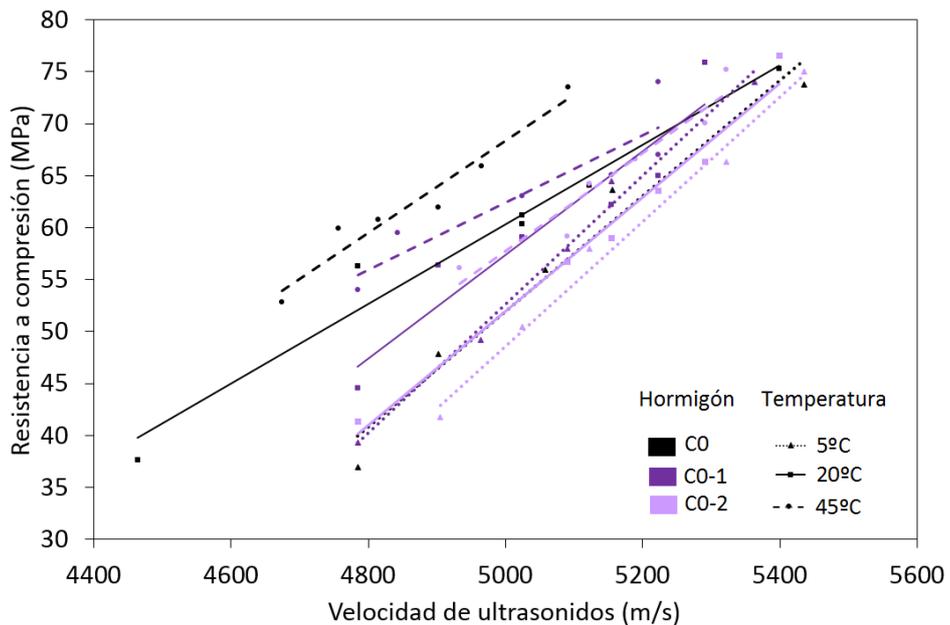


Figura 7.43. Comparación de resistencia a compresión vs. UPV (CO, CO-1 y CO-2)

Para la temperatura de curado estándar (20°C), se observa que, sobre todo a edades tempranas, cuanto menor es el ratio agua/cemento, menor es la resistencia a compresión correspondiente a una

velocidad de ultrasonidos determinada. Esto mismo se observa para una temperatura de curado de 45°C. Por el contrario, para temperaturas de curado muy bajas (5 °C), las curvas de correlación están muy próximas y no se observa una influencia clara del ratio agua/cemento en estas curvas de correlación.

Se concluye que el ratio agua/cemento influye en la correlación entre velocidad de ultrasonidos y la resistencia a compresión, si bien esta influencia es dependiente de la temperatura de curado; mientras que a temperaturas de curado de 45°C y de 20°C se observa una influencia clara (sobre todo a edades tempranas), con 5°C de temperatura de curado, las curvas de correlación se aproximan y no se observa una tendencia clara de la influencia del ratio agua/cemento.

Índice de rebote

En la figura 7.44 se puede observar las correlaciones de índice de rebote y resistencia a compresión, para tres hormigones en los que se varía únicamente el ratio agua/cemento.

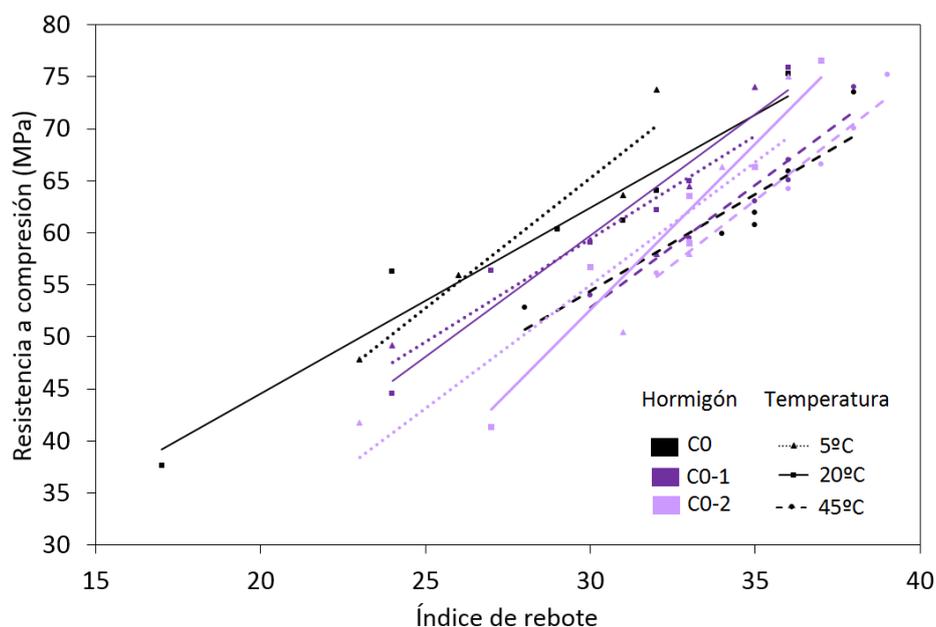


Figura 7.44. Comparación de la resistencia a compresión vs. índice de rebote (C0, C0-1 y C0-2)

Se observa una influencia del ratio agua/cemento en dichas correlaciones, tanto a temperatura estándar (20°C) como a 5°C, sobre todo a edades tempranas. Las correlaciones correspondientes a temperaturas de curado de 5°C y 20°C de los distintos hormigones están claramente separadas y, a edades tempranas, para un mismo valor de índice de rebote la resistencia a compresión correspondiente es menor, cuanto menor es el ratio agua/cemento. Por el contrario, para altas temperaturas (45°C), estas curvas de correlación están muy próximas y no se observa una influencia clara del ratio agua/cemento en dichas correlaciones.

7.4. Conclusiones de este capítulo

A temperatura estándar de curado, la sustitución de un porcentaje de árido natural por árido reciclado de hormigón (fino y grueso) provoca una disminución de la resistencia a compresión a todas las edades estudiadas, tanto en el caso del hormigón autocompactante como en el del vibrado. Esta disminución es lineal en función de la cantidad de árido a 28 días, tal y como apuntan estudios anteriores.

En cuanto a la influencia de las cenizas de biomasa a temperatura estándar de curado, se observa que la sustitución de cemento por cenizas de biomasa influye negativamente en la resistencia a compresión, sobre todo durante los primeros tres días. Para el CC15, las pérdidas de resistencia se sitúan entre el 8% y el 14%, respecto a los valores obtenidos en el hormigón de referencia. En cuanto al CC30, a 3 días se observa una baja del 30%, pero cabe apuntar que esta baja tan importante, se ve atenuada en gran medida con el paso de los días, situándose a 7 días en un 22%, valor que se mantiene estable a 28 días. Las variaciones de resistencia a compresión debidas a la adición de cenizas de biomasa a edades tempranas observadas en el presente estudio tienen una tendencia similar a las de los hormigones con cenizas volantes de carbón en estudios anteriores.

La temperatura de curado influye en gran medida en el efecto que tiene la adición de cenizas de biomasa en la resistencia a compresión: cuanto menor es la temperatura, mayor influencia negativa tienen las cenizas en la evolución de la resistencia. A altas temperaturas (45 °C), la resistencia es ligeramente superior a la obtenida con temperaturas de 20 °C. Por el contrario, con bajas temperaturas de curado (5 °C), la resistencia a compresión es mucho menor que la registrada a 20 °C. Incluso a 90 días de edad, en los hormigones con cenizas de biomasa, la resistencia a compresión de las probetas curadas a 5°C es sustancialmente menor que las probetas curadas 20 °C o a 45 °C. Por tanto, en caso de hormigonado a bajas temperaturas, se recomienda tomar especiales precauciones con el uso de hormigones con cenizas de biomasa.

En los hormigones convencionales o con árido reciclado estudiados, la resistencia a 28 días de las probetas curadas a 45°C y a 5°C es menor que la de las probetas curadas a 20°C. Por tanto, cuando la temperatura difiere mucho de 20°C, las probetas de control de calidad (curadas a 20°C), mostrarán una resistencia superior a la resistencia real del hormigón de obra.

Existe una influencia clara de los áridos reciclados en las correlaciones entre resistencia a compresión y dos de los ensayos no destructivos: velocidad de ultrasonidos e índice de rebote. En ambas correlaciones se observa un desplazamiento de las curvas de correlación debido a la sustitución de árido reciclado: para un mismo valor de ensayo no destructivo (velocidad de ultrasonidos o índice de rebote) la resistencia correspondiente es menor cuanto mayor sea la cantidad de árido reciclado. En la correlación entre resistencia a compresión y conductividad eléctrica se observa una tendencia clara de la influencia de los áridos reciclados: cuanto mayor es la cantidad de árido reciclado, menor es el módulo de deformación correspondiente a un mismo valor de conductividad (excepto para hormigones con porcentajes muy bajos de árido reciclado (8%), con valores de módulo menores a 30 GPa).

En cuanto a la influencia del reemplazo parcial de cemento por cenizas de biomasa, a temperatura estándar, con pequeñas sustituciones (15%) no se observa apenas variación en las correlaciones de resistencia a compresión y los ensayos no destructivos. Con un 30% de sustitución de cenizas de biomasa ya se observan variaciones considerables.

Se observa una influencia de la temperatura en las curvas de correlación entre velocidad de ultrasonidos y resistencia a compresión, sobre todo, a edades tempranas. Para una misma velocidad de ultrasonidos, la resistencia a compresión es distinta en función de la temperatura de curado.

Estas curvas de correlación se desplazan hacia arriba cuanto mayor es la temperatura de modo que, para una misma velocidad de ultrasonidos, la resistencia a compresión correspondiente es mayor cuanto mayor haya sido su temperatura de curado. Por tanto, cuando la temperatura sea menor que la estándar se incurrirá en un error de sobreestimación de la resistencia a compresión. Debido a este hecho se proponen las siguientes recomendaciones:

- Para la estimación de la resistencia en estructuras, se recomienda usar una curva de correlación obtenida con probetas que hayan estado expuestas a temperaturas previsiblemente iguales o más bajas que las de la zona de medición, para no incurrir en una sobreestimación de la resistencia a compresión.
- Si se utilizan testigos de la propia estructura para hallar las curvas de correlación, se recomienda su extracción en las zonas que previsiblemente hayan estado sometidas a menor temperatura durante el fraguado y endurecimiento de la estructura.

Cuanto mayor es la temperatura de curado, mayor es la influencia de los áridos reciclados en las curvas de correlación velocidad de ultrasonidos-resistencia a compresión, tanto en los hormigones no autocompactantes como en los autocompactantes. Por el contrario, la influencia de las cenizas de biomasa en las curvas de correlación es levemente mayor a temperaturas bajas, probablemente debido a la minimización del efecto cementante de las cenizas.

Se observa que cuanto menor es la relación agua/cemento, mayor es la resistencia, tanto a 28 días como a edades tempranas, para cualquiera de las tres temperaturas de curado estudiadas. Parece que la influencia de la variación del ratio a/c no depende, al menos de forma clara, en la temperatura de curado.

En cuanto a la influencia de la temperatura de curado en las correlaciones entre resistencia a compresión e índice de rebote, se observa que para todos los hormigones estudiados, tanto los de referencia como los eco-hormigones con materiales reciclados, la temperatura de curado influye en las correlaciones entre resistencia a compresión e índice de rebote, pero no se observa una tendencia común.

Capítulo 8. Madurez: influencia de eco-materiales

Capítulo 8. Madurez: influencia de eco-materiales

8.1. Influencia de los áridos reciclados de hormigón (finos y gruesos) en la energía de activación y en las curvas resistencia a compresión - madurez

8.1.1. Influencia de los áridos reciclados en la energía de activación

Se ha calculado la energía de activación de los hormigones vibrados C0 y CH y de los hormigones autocompactantes B0 y BH. Tal y como se indica en el apartado 4.3.3 todas las energías de activación se han calculado mediante el ensayo de probetas de hormigón descrito en la ASTM C1074-11 [RN04].

En la figura 8.1 se muestra la influencia de los áridos reciclados en la energía de activación de los hormigones de referencia y hormigones con árido reciclado.

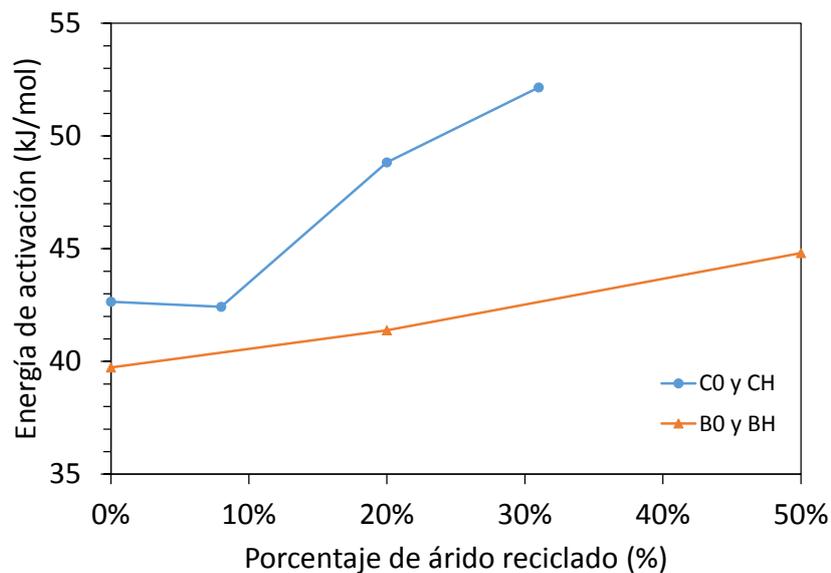


Figura 8.1. Energía de activación en función del porcentaje de árido reciclado

Se observa que, para porcentajes de sustitución muy bajos (8%) la energía de activación apenas se ve afectada e incluso es un poco menor que la obtenida para el hormigón de referencia correspondiente. Si bien para porcentajes más altos (a partir del 20%) tanto en el hormigón vibrado como en el autocompactante se observa un aumento de la energía de activación al aumentar la sustitución de árido reciclado.

La energía de activación calculada según la ASTM con tres temperaturas (en este caso 5°C, 20°C y 45°C) es aplicable en todo el rango de temperaturas estudiadas. En el caso de que todo el historial de

temperaturas de un hormigón vaya a estar previsiblemente por debajo de 20°C, o por encima, se puede tener en cuenta este hecho y hacer alguna corrección de la energía de activación.

Si se representa en el eje de abscisas los valores de 1/temperatura (en 1/kelvin), y en el eje de ordenadas el logaritmo de los valores de K obtenidos para cada temperatura (siendo K el cociente de la ordenada en el origen entre la pendiente de la recta 1/edad frente 1/resistencia) y se aproximan a una recta, la pendiente de esa recta es igual a $-E_a/R$ (siendo R la constante de los gases).

En las figuras 8.2 a 8.8 se puede observar que, para todos los hormigones estudiados (excepto para el BH50), si el hormigón está sometido de forma continua a un rango de temperaturas alto (mayor que 20°C), su energía de activación es menor que la energía de activación calculada según la ASTM (recta más tendida, pendiente menor en valor absoluto). Para un rango de temperaturas bajas (mucho menores que 20°C), su energía de activación es inferior a la calculada según las directrices de la ASTM.

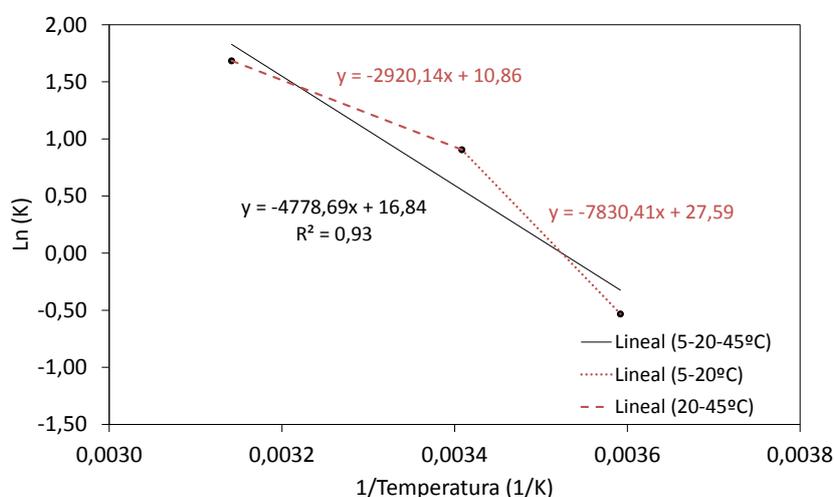


Figura 8.2. Inversa de la temperatura frente a $\ln(K)$ para hormigón B0

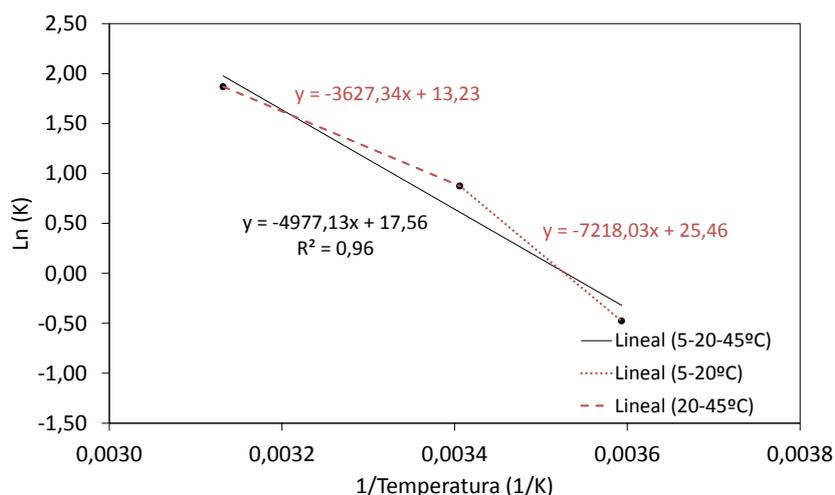


Figura 8.3. Inversa de la temperatura frente a $\ln(K)$ para hormigón BH20

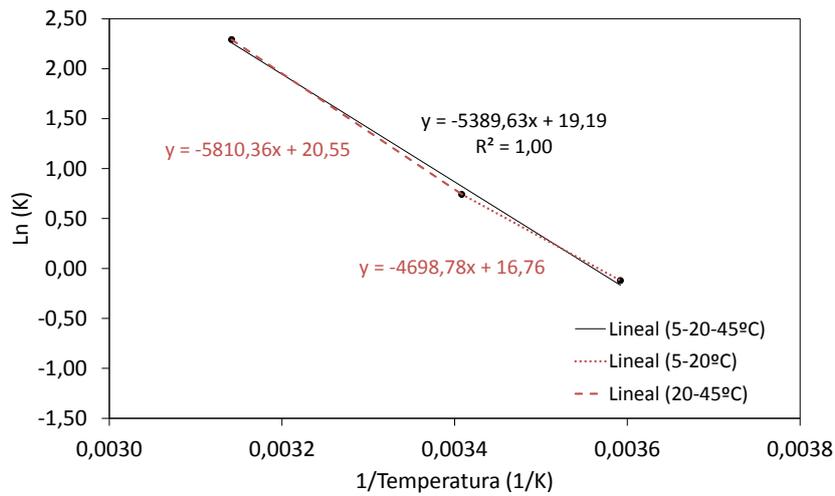


Figura 8.4. Inversa de la temperatura frente a Ln(K) para hormigón BH50

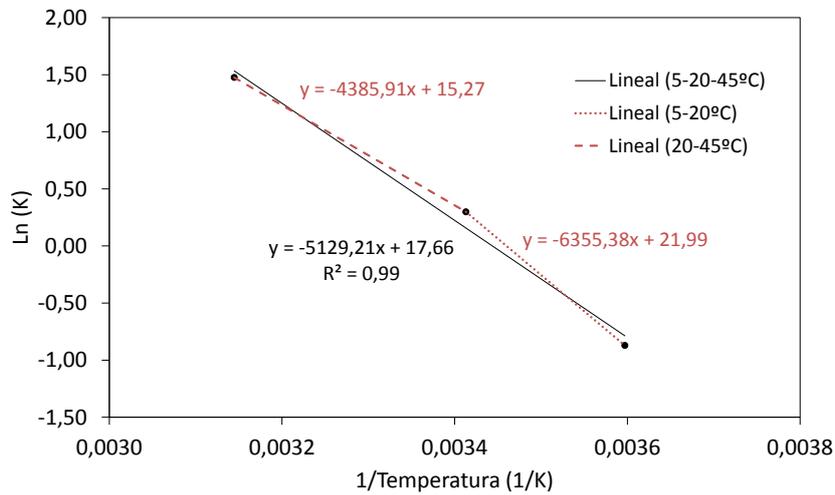


Figura 8.5. Inversa de la temperatura frente a Ln(K) para hormigón C0

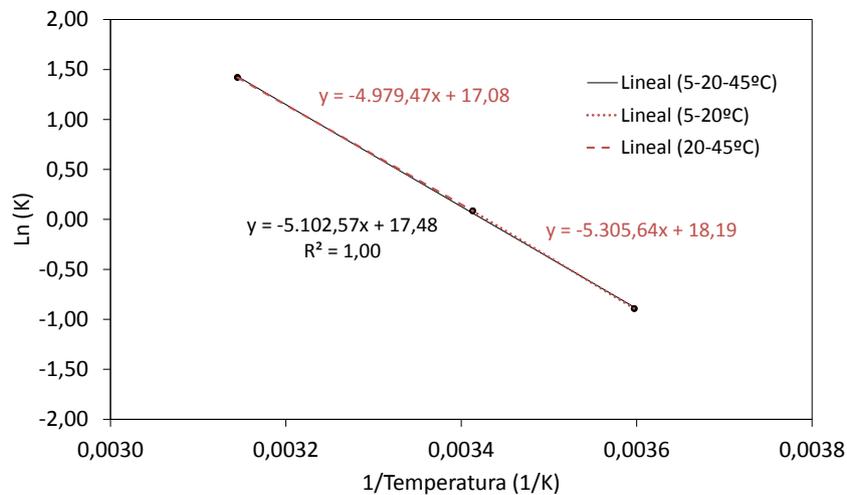


Figura 8.6. Inversa de la temperatura frente a Ln(K) para hormigón CH8

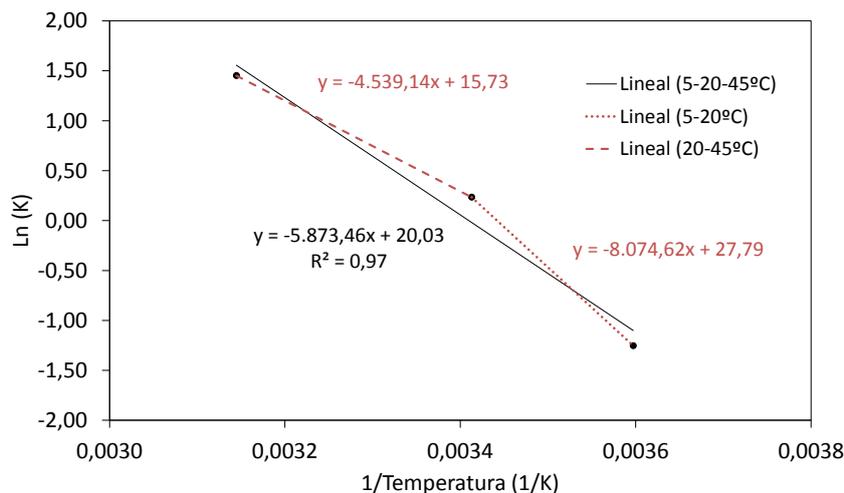


Figura 8.7. Inversa de la temperatura frente a Ln(K) para hormigón CH20

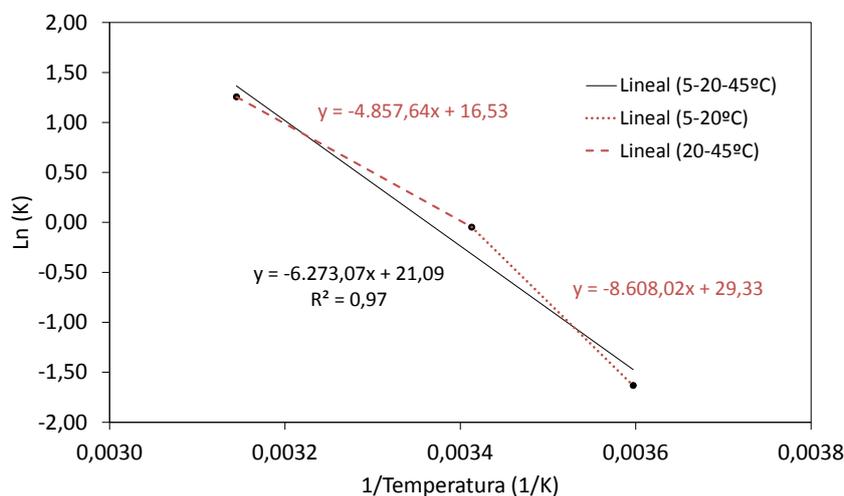


Figura 8.8. Inversa de la temperatura frente a Ln(K) para hormigón CH31

En la tabla 8.1 se puede observar un resumen de los resultados de energía de activación obtenidos. Los áridos reciclados producen un aumento de la energía de activación calculada según la ASTM, tanto en los hormigones autocompactantes como en los vibrados (a excepción del CH8 con bajo contenido de árido reciclado). Esto también ocurre con las energías de activación calculadas solo para bajas temperaturas o solo para altas temperatura, a excepción de los hormigones autocompactantes en el rango de temperaturas bajas (5-20°C). En los hormigones vibrados se observa que a mayor temperatura, menor es la influencia de los áridos reciclados en la energía de activación.

En todos los hormigones, vibrados y autocompactantes (a excepción del BH50), si se toma únicamente el rango de temperaturas bajas, la energía de activación es superior a la calculada con las tres temperaturas según la ASTM. Por el contrario, para temperaturas altas, la energía de activación es menor que la calculada según criterios de la ASTM. Por tanto, parece razonable recomendar que se tenga en cuenta esta variación de la energía de activación en caso de que el hormigón vaya a estar sometido a temperaturas muy altas (o muy bajas) de forma constante, si bien lo ideal es que la energía

de activación se calcule con tres temperaturas, siendo la temperatura intermedia sea similar a la temperatura media a la que estará sometido el hormigón.

Tabla 8.1. Resistencia estabilizada y energías de activación (B0, BH, C0 y CH)

Parámetro	Tª (°C)	B0	BH20	BH50	C0	CH8	CH20	CH31
S _∞ (MPa)	5	70,9	69,7	64,3	80,9	76,6	68,3	63,6
	20	70,0	69,3	63,6	80,0	76,0	68,0	63,2
	45	66,7	62,4	58,8	73,5	65,0	60,9	55,0
K _T (1/días)	5	0,587	0,621	0,886	0,418	0,410	0,286	0,195
	20	2,473	2,399	2,010	1,348	1,089	1,264	0,954
	45	5,388	6,484	2,886	4,374	4,143	4,273	3,513
Ea total ASTM (kJ/mol)	-	39,73	41,38	44,81	42,65	42,43	48,84	52,16
Ea tª baja (kJ/mol)	5-20	65,11	60,01	39,07	52,84	44,11	67,14	71,57
Ea tª alta (kJ/mol)	20-45	24,28	30,16	48,31	36,47	41,40	37,74	40,39

8.1.2. Bases teóricas y desarrollo metodológico de análisis

Existen múltiples ecuaciones de estimación de la resistencia a compresión en función de la madurez. Dos ecuaciones de estimación habituales son la exponencial (ecuación 2.2) y la ecuación hiperbólica (ecuación 2.7). Ambas relacionan la resistencia a compresión (con respecto a la resistencia estabilizada o resistencia a infinito) y la madurez, mediante una constante que depende del ratio agua cemento y del tipo de cemento; por tanto se podría deducir que, según esto, como C0, CH8, CH20, CH31 tienen la misma relación agua/cemento y están fabricados con el mismo tipo de cemento, la curva que relaciona S/S_∞ y M es una curva común para estos los cuatro hormigones.

Por todo ello, con el fin de concluir si este método es aplicable en eco-hormigones con áridos reciclados, cumpliéndose las premisas de igualdad de relación agua/cemento y de tipo de cemento, se procede al cálculo, comparación y análisis de las curvas de ratio S/S_∞ frente a índice de madurez o factor tiempo-temperatura (ecuación 2.3) y de las curvas ratio S/S_∞ frente a edad equivalente (ecuación 2.5). En ambos casos se harán dos variantes, en una de ellas, la resistencia se estimará con la ecuación exponencial (2.2) y en la segunda variante, se estimará utilizando la ecuación hiperbólica (2.7). Si es aplicable, los hormigones C0, CH8, CH20, CH31 deben tener una misma curva. Del mismo modo, las curvas de madurez de los hormigones B0, BH20 y BH50, deben confluir en una única curva.

Si esto se cumple, se podría afirmar que, si se tiene en cuenta la influencia de los áridos reciclados en la energía de activación, se puede aplicar las formulaciones exponenciales (2.2) o hiperbólica (2.7). Además, se podría llegar a concluir que la constante “k” (para la exponencial) y la constante “A” (para la hiperbólica) de dichas ecuaciones son comunes para los hormigones con un mismo hormigón de referencia, independientemente del porcentaje de árido reciclado.

8.1.3. Análisis de las curvas de madurez y de la influencia de los áridos reciclados

Seis probetas de cada hormigón se han instrumentado con sensores de temperatura interna (dos probetas por cada temperatura de curado), con el fin de obtener la evolución de la temperatura interna. En la figura 8.9 y 8.10 se muestran las evoluciones de las temperaturas medias de cada uno de los hormigones objeto de estudio en este punto (B0, BH, CO y CH).

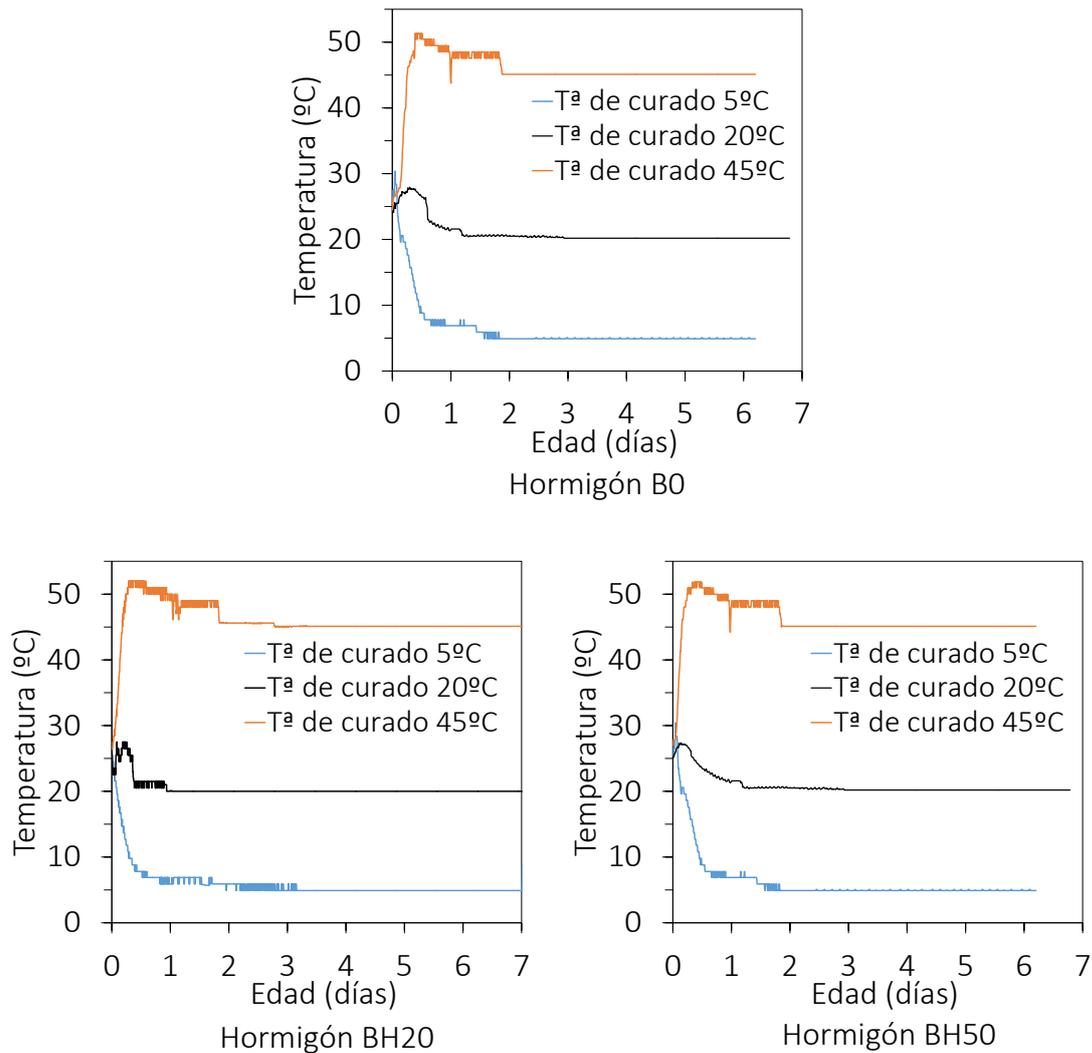


Figura 8.9. Temperaturas internas desarrolladas en probeta cúbica de 10 cm (B0 y BH)

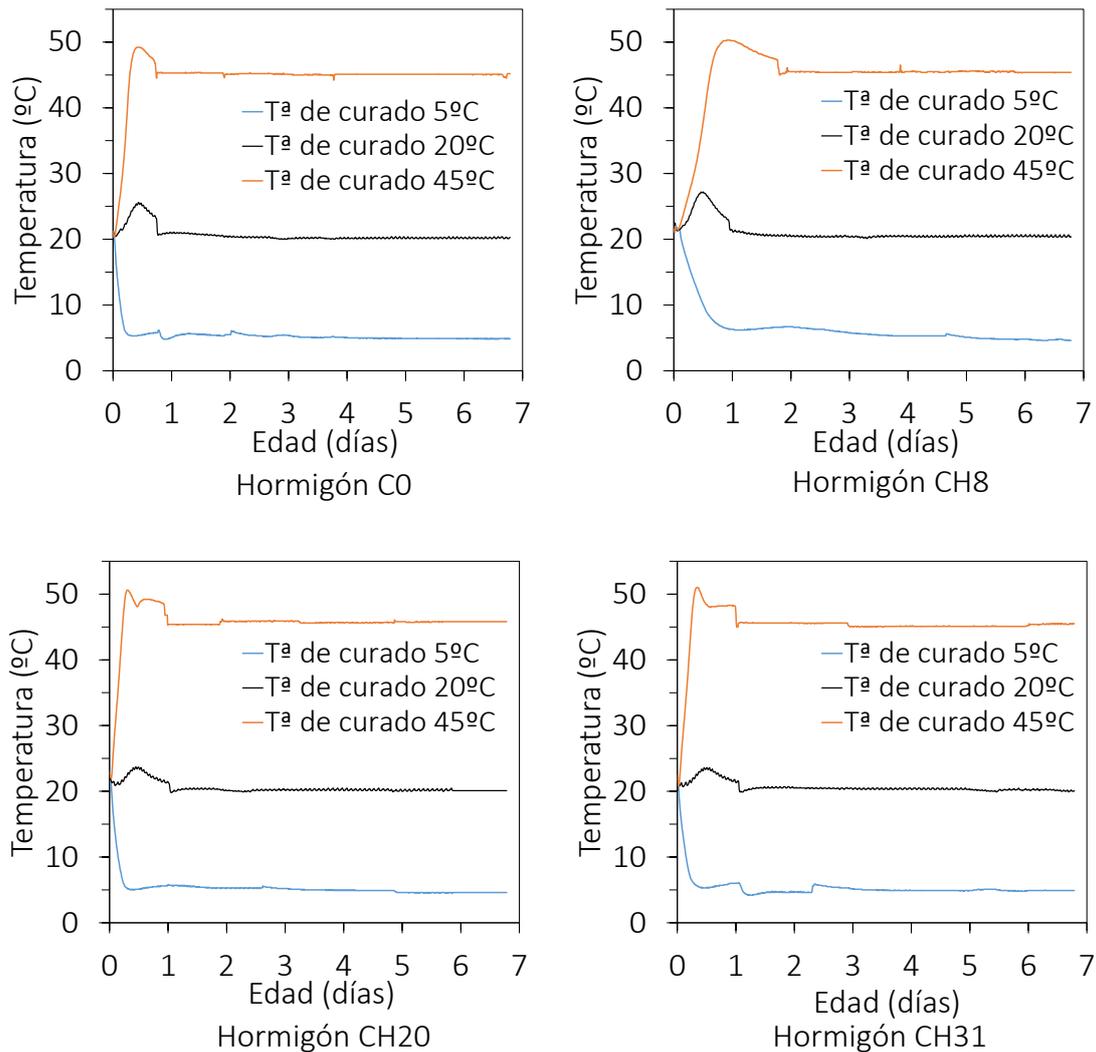


Figura 8.10. Temperaturas internas desarrolladas en probeta cúbica de 10 cm (C0 y CH)

Los hormigones C0, CH8, CH20 y CH30, tienen todos ellos un mismo tipo de cemento y una misma relación agua/cemento. Este mismo razonamiento es aplicable para los hormigones B0, BH20 y BH50. Por ello, si la teoría de la madurez expuesta en el punto 8.1.1.2 es aplicable para eco-hormigones con árido reciclado de hormigón fino y grueso, a igual madurez deberían tener el mismo valor de S/S_∞ , por tanto, estos hormigones (B0 y BH o C0 y CH) deberían tener una curva S/S_∞ - madurez común.

Anteriormente, en el capítulo 7, se ha mostrado la evolución de la resistencia a compresión para distintas temperaturas de curado, tanto para los hormigones C0 y CH (figura 7.2) como para los hormigones B0 y BH (figura 7.1).

En las figuras 8.11 (para B0 y BH) y 8.12 (para C0 y CH) se representan S/S_∞ frente al índice de madurez calculado con la ecuación del factor tiempo-temperatura (FTT) (2.3) para cada hormigón por separado y en función de la temperatura.

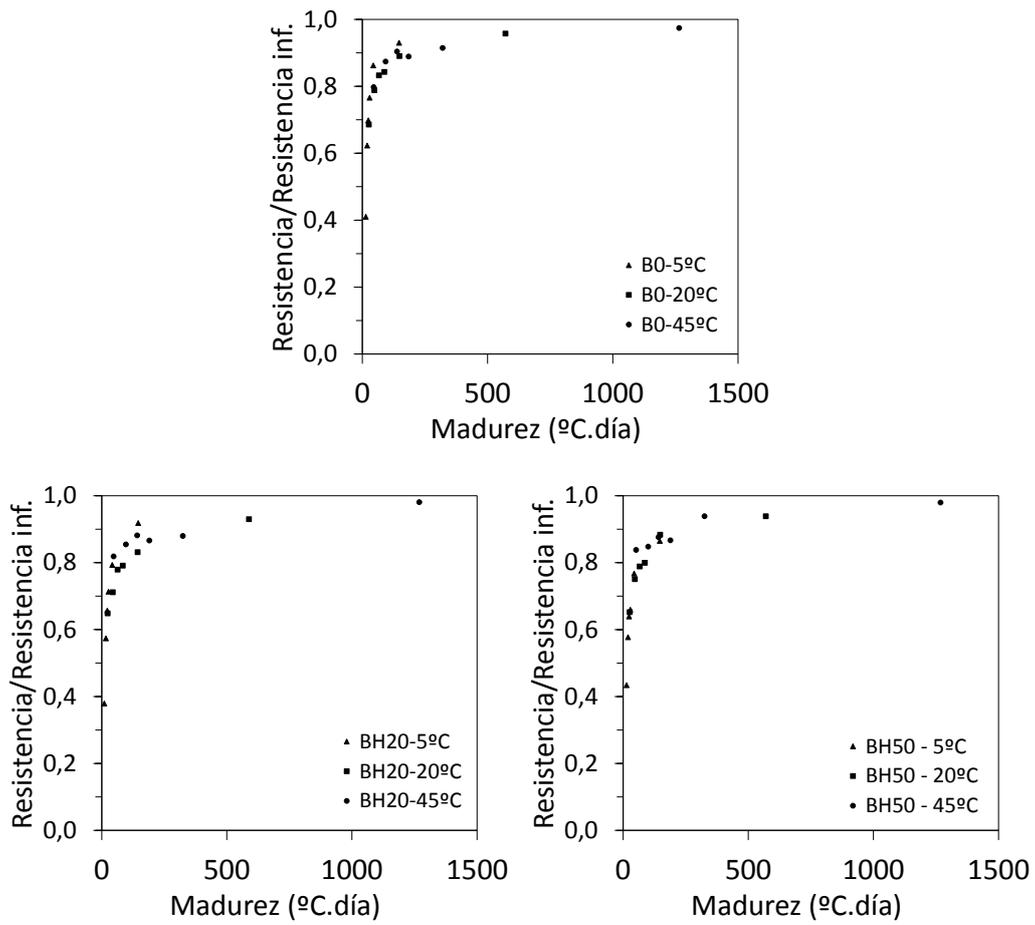


Figura 8.11. Ratio S/S_{∞} vs. FTT para cada temperatura (BO y BH)

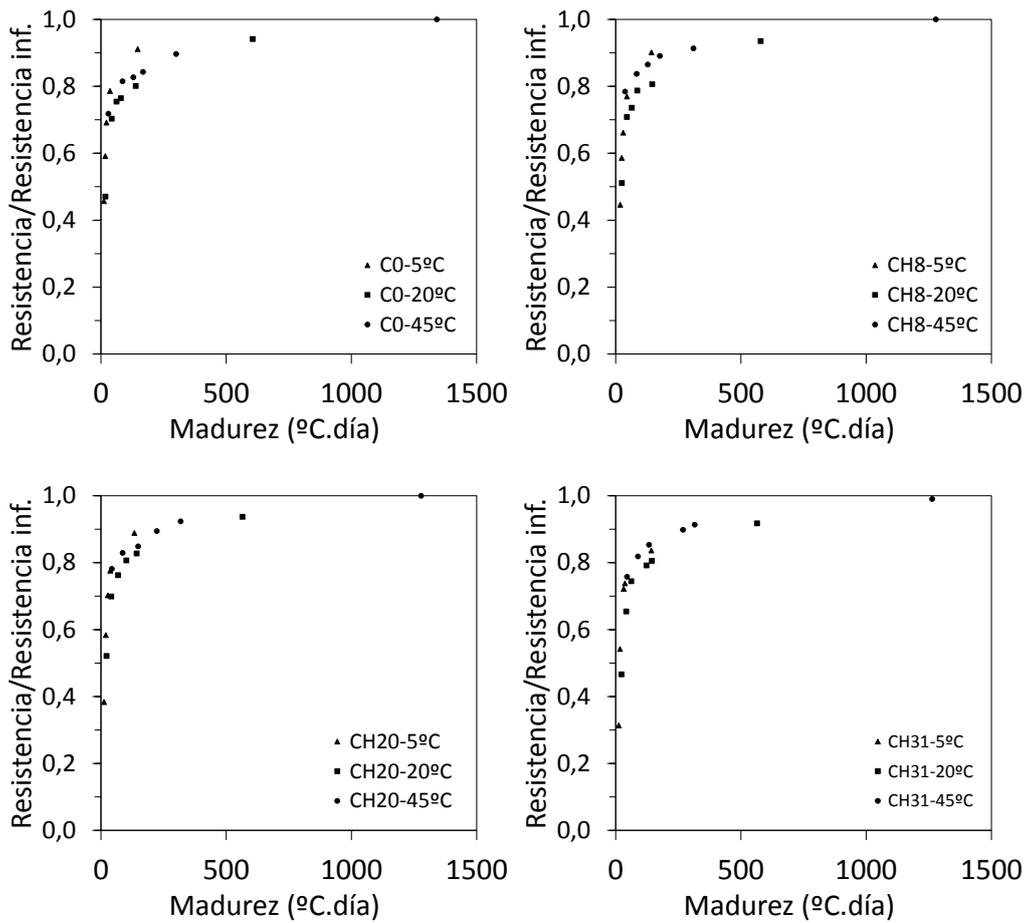


Figura 8.12. Ratio S/S_{∞} vs. FTT para cada temperatura (CO y CH)

Se observa que la confluencia de las curvas de las tres temperaturas no es perfecta, obteniéndose las mayores discrepancias en los hormigones BH20 y CH8, si bien los errores son menores del 15% para un mismo valor de madurez.

En las figuras 8.13 (para B0 y BH) y 8.14 (para CO y CH) se representa, para cada temperatura, la evolución del ratio S/S_{∞} con respecto a la edad equivalente calculada según la ecuación de Arrhenius (2.5).

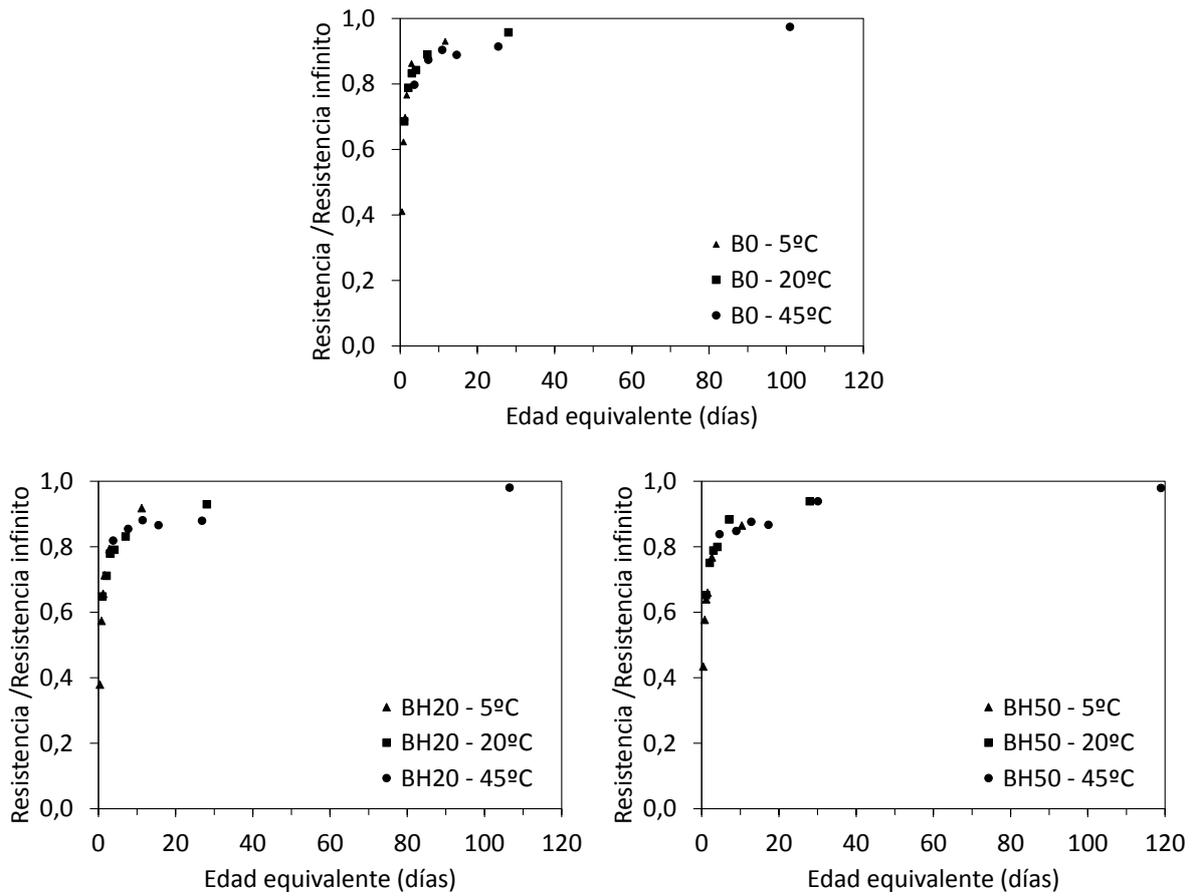


Figura 8.13. Ratio S/S_{∞} vs. t_e para cada temperatura (BO y BH)

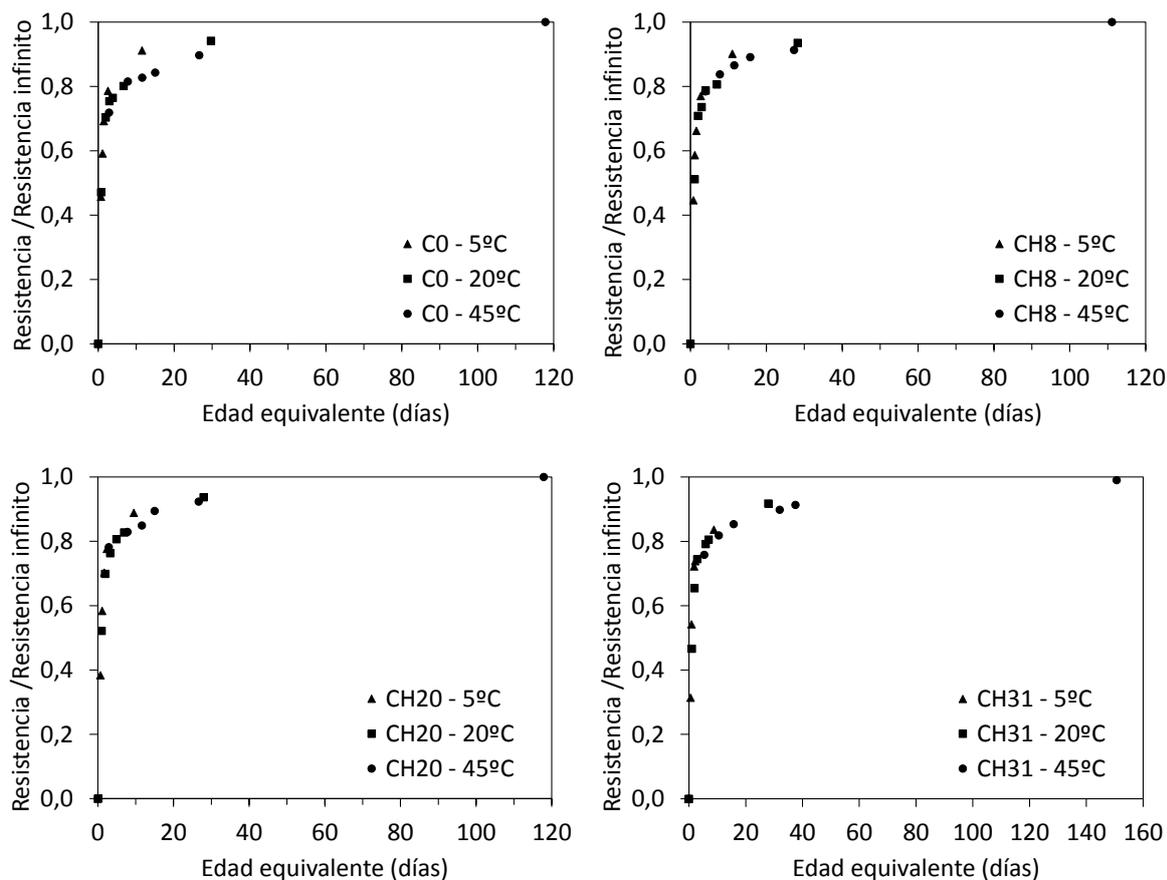


Figura 8.14. Ratio S/S_{∞} vs. t_e para cada temperatura (CO y CH)

Se observan resultados similares a los obtenidos utilizando el índice de madurez calculado según el factor tiempo-temperatura, ligeramente mejores (menor error entre temperaturas). Cabía esperar que así fuese, ya que la utilización de la ecuación de Arrhenius para el cálculo de la edad equivalente necesita de mucha más información (energía de activación del hormigón) que el cálculo del índice de madurez como factor tiempo-temperatura. A priori parece que los resultados utilizando ambos métodos no difieren demasiado y por tanto, el método del factor tiempo-temperatura puede ser recomendado. Para poder tener una certeza mayor, se procede a desarrollar un estudio más profundo sobre los resultados de estimación de la resistencia tanto tomando la madurez como factor tiempo temperatura (2.3) como tomando como índice de madurez el producto de la edad equivalente calculada con la fórmula de Arrhenius (2.5) multiplicada por la temperatura de referencia.

Según las bases teóricas expuestas en el punto 8.1.1.2 del presente capítulo, debería existir una única curva “edad equivalente - S/S_{∞} ” para los hormigones CO y CH por una parte, y para los B0 y BH, por otra; debido a que tienen una misma relación agua/cemento y un mismo tipo de cemento. En las figuras 8.15 y 8.16 se muestran, en una sola gráfica para cada clase de hormigón (B y C respectivamente), los valores de S/S_{∞} frente a los de madurez (factor tiempo-temperatura). En las figuras 8.17 y 8.18, se representan los valores de S/S_{∞} frente a edad equivalente (2.5).

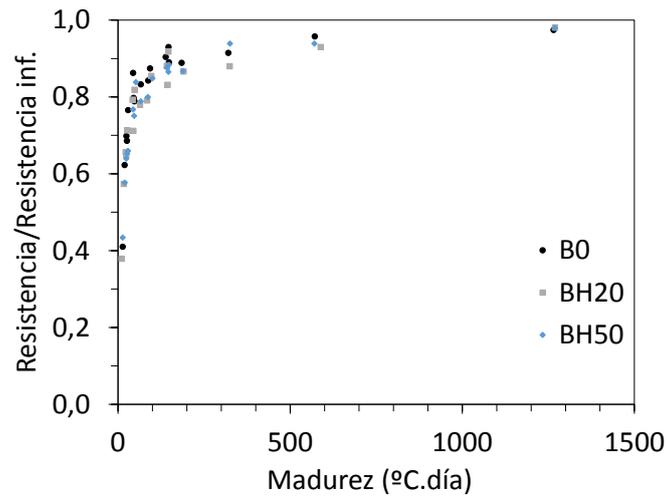


Figura 8.15. Ratio S/S_{∞} vs. FTT (B0 y BH)

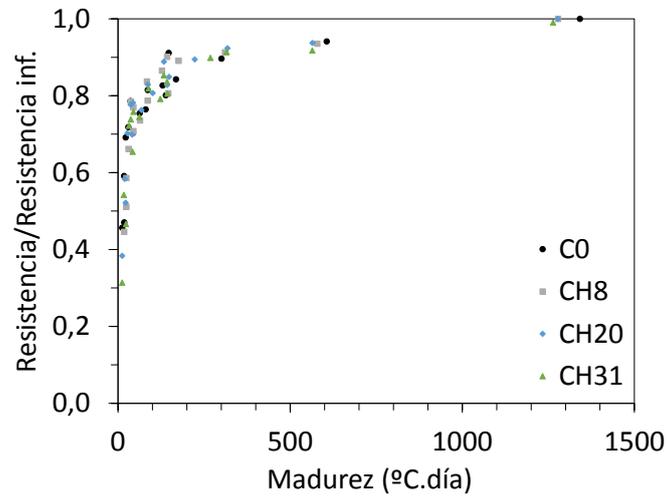


Figura 8.16. Ratio S/S_{∞} vs. FTT (C0 y CH)

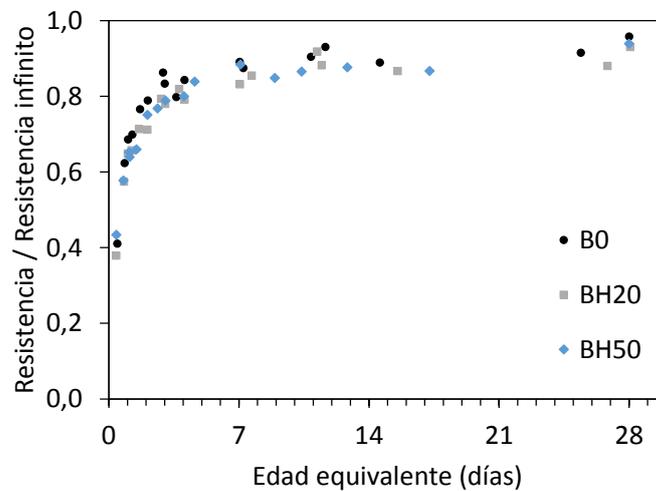


Figura 8.17. Ratio S/S_{∞} vs. t_e (B0 y BH)

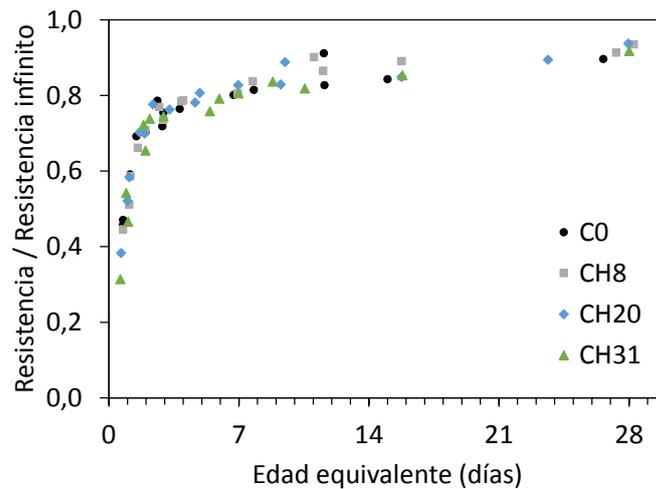


Figura 8.18. Ratio S/S_{∞} vs. t_e (CO y CH)

En las figuras 8.15 a 8.18 no se observa una influencia clara de los áridos reciclados en la curva de S/S_{∞} frente a índice de madurez ni frente a edad equivalente. Se podría trazar una única curva que relacione madurez con S/S_{∞} o edad equivalente con S/S_{∞} , independiente de la cantidad de árido reciclado, con errores menores al 10%. Por tanto, parece que “k” y “A” sean independientes de la cantidad de árido reciclado sustituido.

8.1.4. Influencia de los áridos reciclados en la estimación de resistencia a compresión

A continuación se hace una comparativa de la estimación de la resistencia a compresión frente a la resistencia real utilizando dos de las formulaciones más aceptadas: la formulación exponencial (ecuación 2.2) y la hiperbólica (ecuación 2.7). En ambas expresiones se utiliza el índice de madurez (M) para calcular la resistencia estimada. Debido a que existen varias formas de calcular dicho índice, se procede a hacer las estimaciones de resistencia, utilizando dos procedimientos para el cálculo de la madurez: madurez como factor tiempo temperatura ($M=FTT$, ecuación 2.3) y madurez como producto de la edad equivalente (Arrhenius) por temperatura de referencia ($M= t_e \cdot T_r$, ecuación 2.5), con el fin de determinar con cuál de las dos expresiones para el cálculo índice de madurez se obtienen unos mejores resultados de estimación para las dos formulaciones (exponencial e hiperbólica) de estimación de la resistencia que se analizan en este estudio.

Se calculan los valores óptimos de “k” en la ecuación exponencial (2.2) y de “A” en la ecuación hiperbólica (2.7) que minimicen el error cuadrático medio de la estimación de la resistencia a compresión (8.1).

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{S}_i - S_i)^2 \quad (8.1)$$

Con el fin de observar el error que se comete al suponer “k” o “A” independientes del tipo de árido, se representan, para los de cada tipo (B0 y BH por una parte y C0 y CH por otra), la resistencia real frente a la resistencia estimada, utilizando el valor del parámetro “k” (para la ecuación exponencial) o “A” (para la ecuación hiperbólica) calculado bajo tres supuestos:

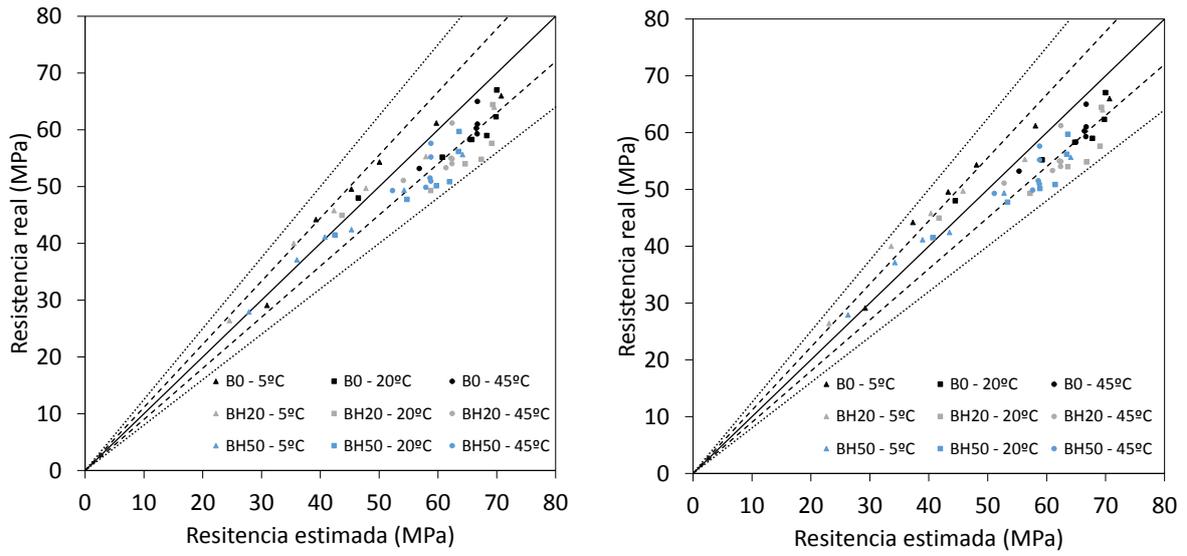
- (a) El valor del parámetro (“k” o “A”) es común a todas las dosificaciones (B0 y BH o C0 y CH), e igual a la calculada con los datos del hormigón de referencia (B0 o C0).
- (b) El valor del parámetro (“k” o “A”) es común a todas las dosificaciones (B0 y BH o C0 y CH), y se calcula teniendo en cuenta todos los datos de B0 y BH o C0 y CH.
- (c) El valor del parámetro (“k” o “A”) varía en función de la dosificación, por lo que se calcula por separado para cada hormigón (figura 8.19c) del grupo B y para cada hormigón del grupo C (figura 8.20c).

- *Índice de madurez como factor tiempo temperatura*

En las figuras 8.19(a) y 8.20(a) se observan las desviaciones de estimación de resistencia bajo la hipótesis de que “k” es independiente del árido reciclado y que es igual al obtenido por optimización con los datos del hormigón de referencia, B0 y C0 respectivamente. Bajo esta hipótesis, tanto en los hormigones vibrados como en los autocompactantes, no se obtiene ningún valor de estimación con un error mayor al 20%.

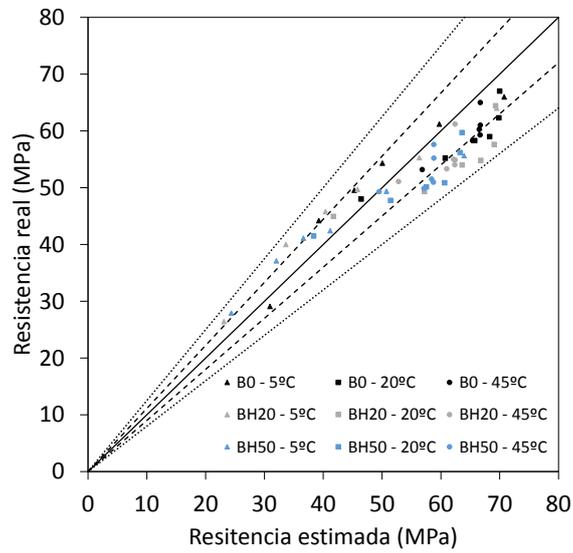
En las figuras 8.19(b) y 8.20(b) se observan los resultados obtenidos tomando como valor de “k” el valor que minimiza el error cuadrático medio total de todos los hormigones de una misma clase en común (B0 y BH o C0 y CH). Entorno a un 4% de las probetas tienen un error superior al 20% (errores de subestimación), en los vibrados. En los autocompactantes no se obtienen estimaciones con errores mayores del 20%.

En las figuras 8.19(c) y 8.20(c) se muestran los resultados obtenidos en el caso de calcular los valores de “k” de forma independiente para cada hormigón. Los resultados obtenidos de este modo son similares a los obtenidos en los otros supuestos, por lo que, tomar un valor “k” común a una clase de hormigones independientemente de la cantidad de árido reciclado sustituido puede ser aceptable, ya que no conlleva grandes errores de estimación.



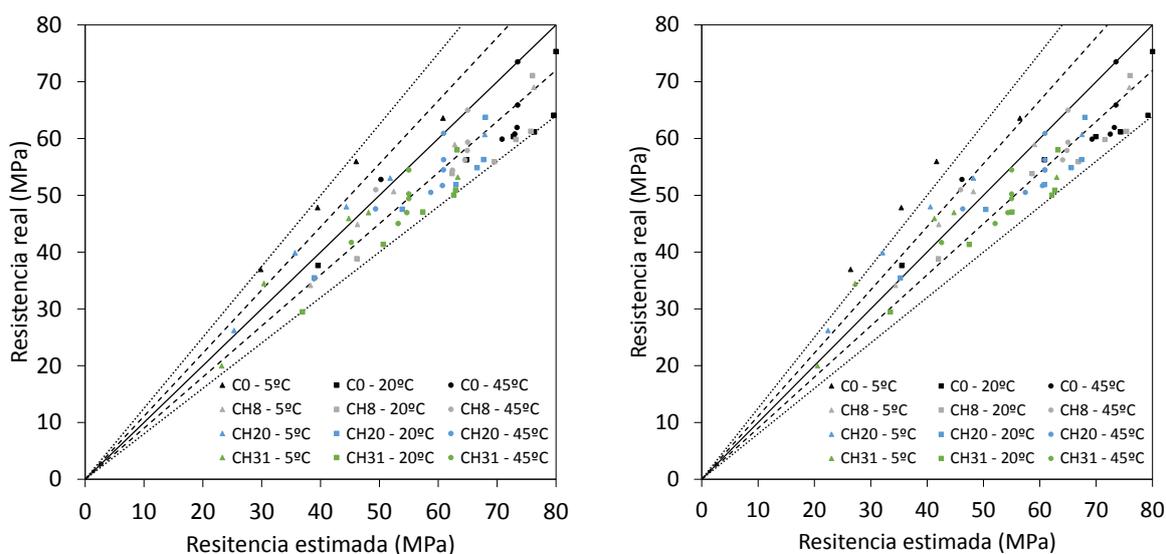
(a) "k" calculado con los datos de B0

(b) "k" calculado con todos los datos



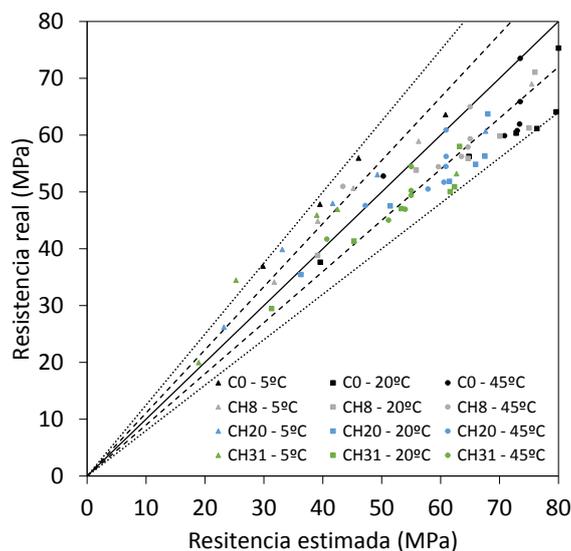
(c) "k" calculado para cada dosificación por separado

Figura 8.19. Resistencia real vs. resistencia estimada con función exponencial y $M=FTT$ (B0 y BH)



(a) "k" calculado con los datos de CO

(b) "k" calculado con todos los datos



(c) "k" calculado para cada dosificación por separado

Figura 8.20. Resistencia real vs. resistencia estimada con función exponencial y $M=FTT$ (CO y CH)

En cuanto a la estimación de resistencia utilizando la ecuación hiperbólica (2.7), en las figuras 8.21 y 8.22 se puede observar que, tanto para el hormigón autocompactante como para el hormigón vibrado, la estimación de la resistencia a compresión arroja buenos resultados. Bajo la hipótesis de que "A" no varía al variar la cantidad sustituida por árido reciclado y que dicho valor se puede obtener teniendo en cuenta únicamente los resultados del hormigón de referencia (B0), se obtienen buenas estimaciones: menos de un 3% de las estimaciones exceden ligeramente el 10% de error en el caso de los hormigones autocompactantes. En el caso de los hormigones vibrados, menos de un 14% de las estimaciones tienen un error mayor al 10%; menos de un 5% de las estimaciones tienen un error ligeramente superior al 20% y solo un 9% de las estimaciones tienen un error entre el 10% y el 20%. Los resultados obtenidos bajo la hipótesis de que todos los hormigones de una misma clase tienen el mismo valor de "A" y que este corresponde al obtenido con los datos del hormigón de referencia (B0 o CO) son aceptables y muy

similares a los obtenidos calculando el valor de "A" independientemente para cada hormigón o calculando el valor común para todos los hormigones.

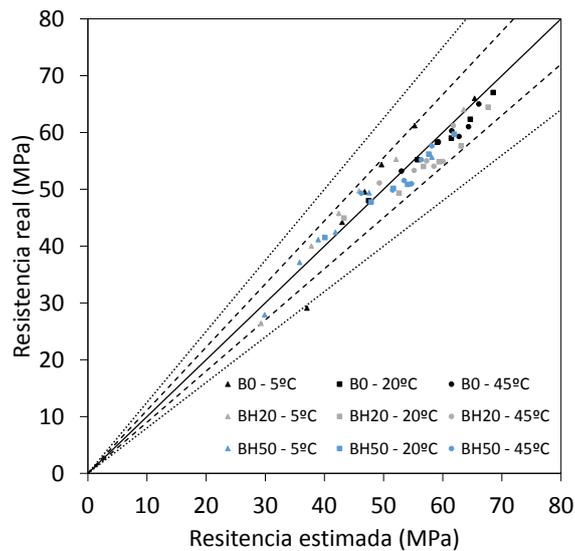
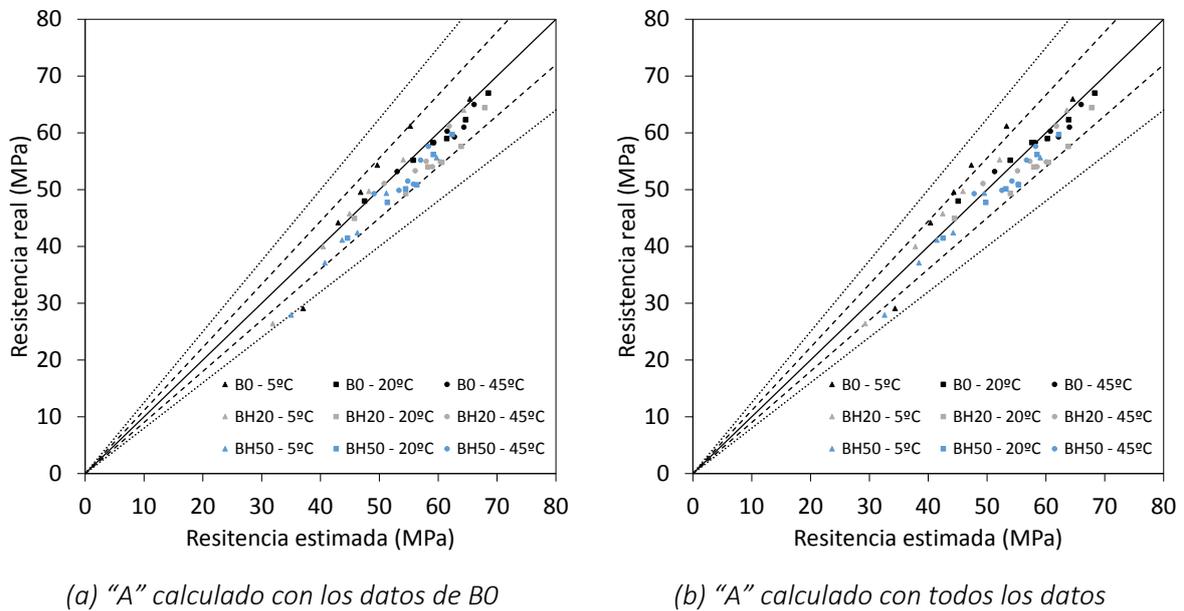
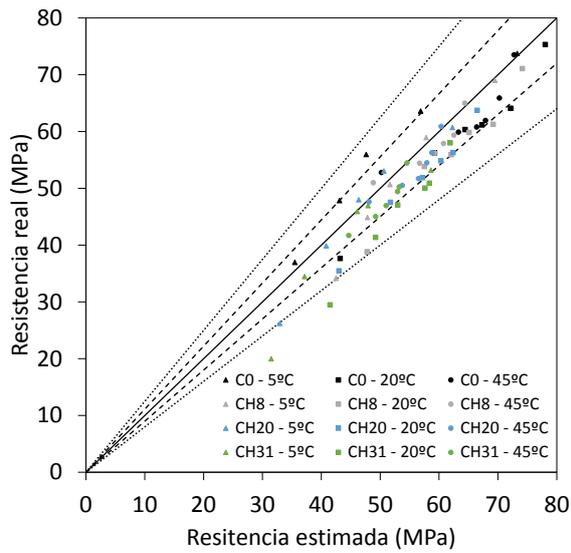
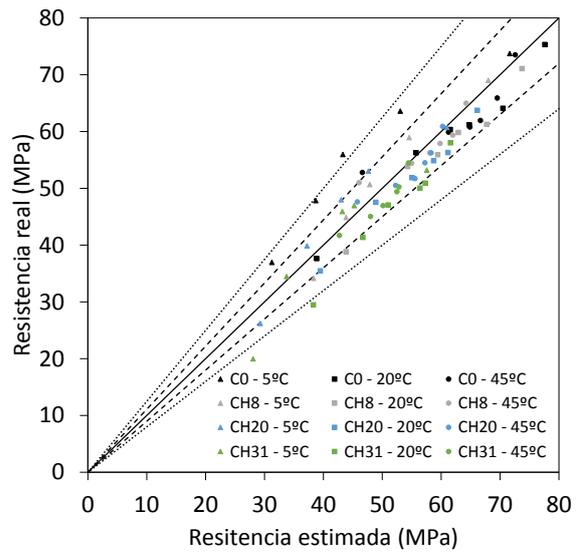


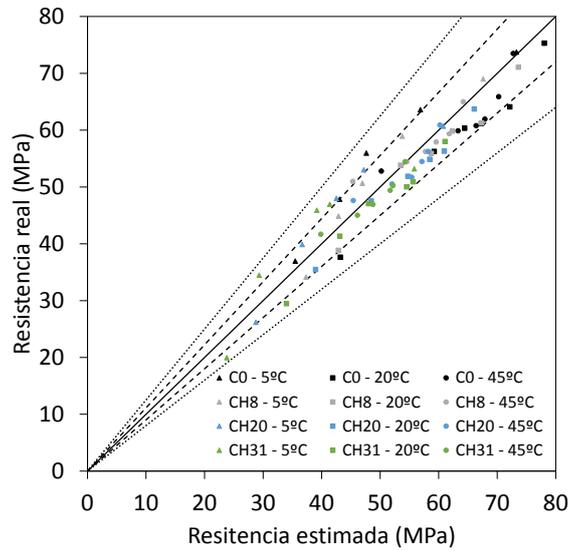
Figura 8.21. Resistencia real vs. resistencia estimada con función hiperbólica y $M=FTT$ (BO y BH)



(a) "A" calculado con los datos de CO



(b) "A" calculado con todos los datos

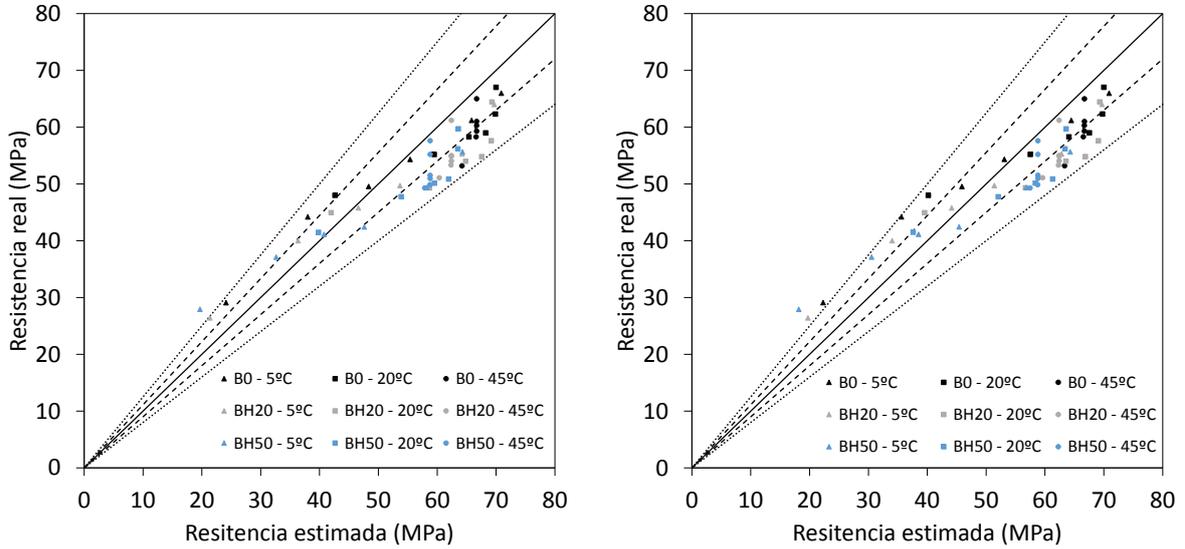


(c) "A" calculado para cada dosificación por separado

Figura 8.22. Resistencia real vs. resistencia estimada con función hiperbólica y $M=FTT$ (CO y CH)

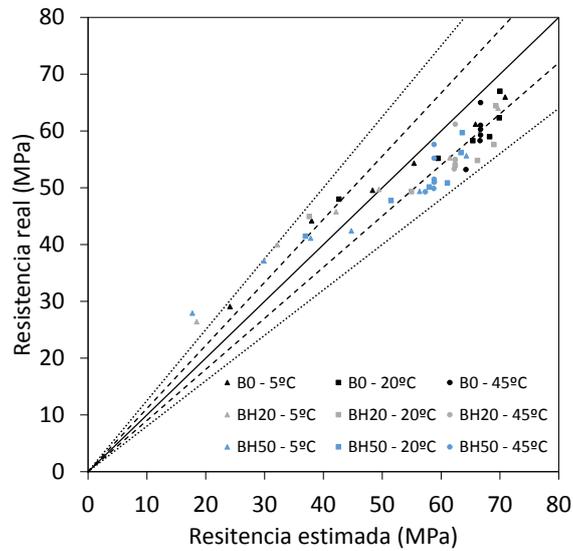
- *Índice de madurez como edad equivalente (Arrhenius) por temperatura de referencia*

En las figuras 8.23 y 8.24 se observa que, con $M = t_e \cdot T_r$, la ecuación de estimación exponencial arroja buenos resultados, tanto en los hormigones autocompactantes como en los vibrados.



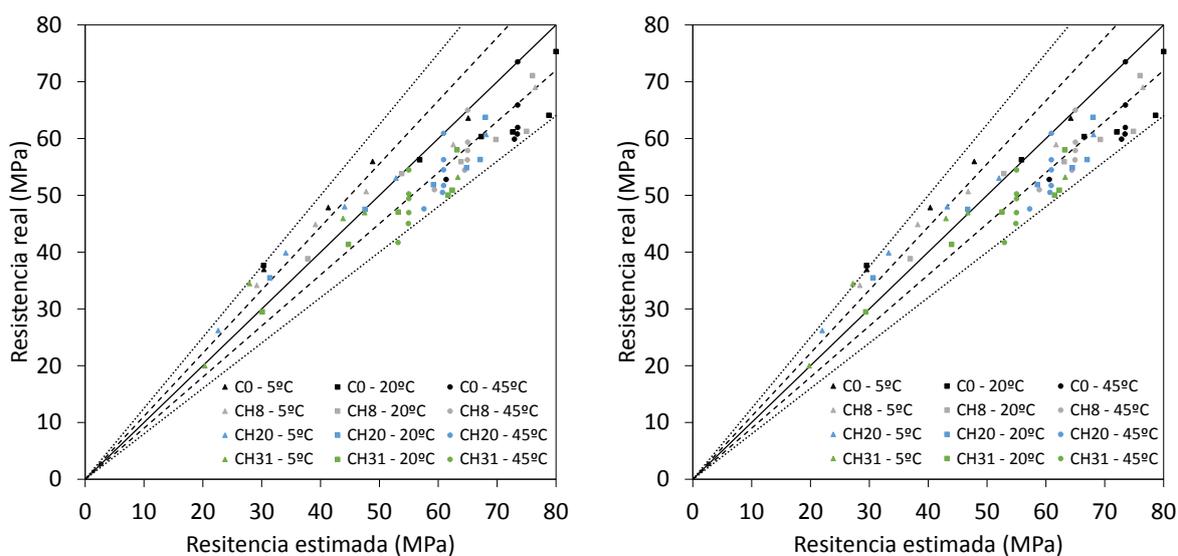
(a) "k" calculado con los datos de BO

(b) "k" calculado con todos los datos



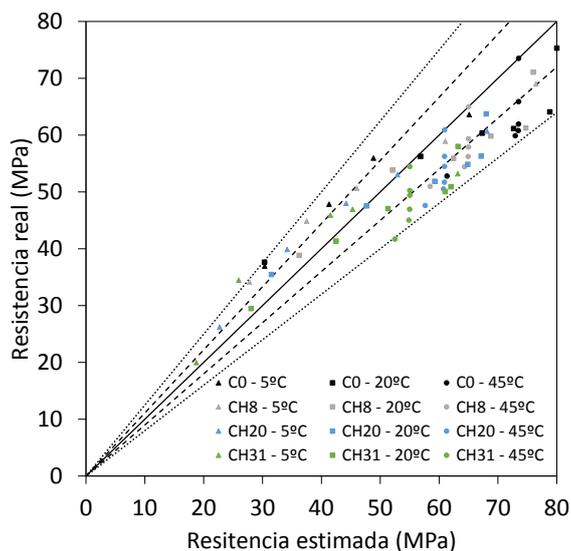
(c) "k" calculado para cada dosificación por separado

Figura 8.23. Resistencia real vs. resistencia estimada con función exponencial y $M = t_e \cdot T_r$ (BO y BH)



(a) "k" calculado con los datos de CO

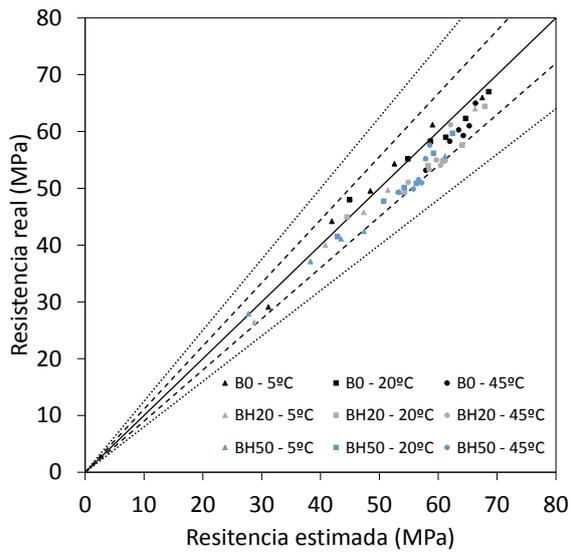
(b) "k" calculado con todos los datos



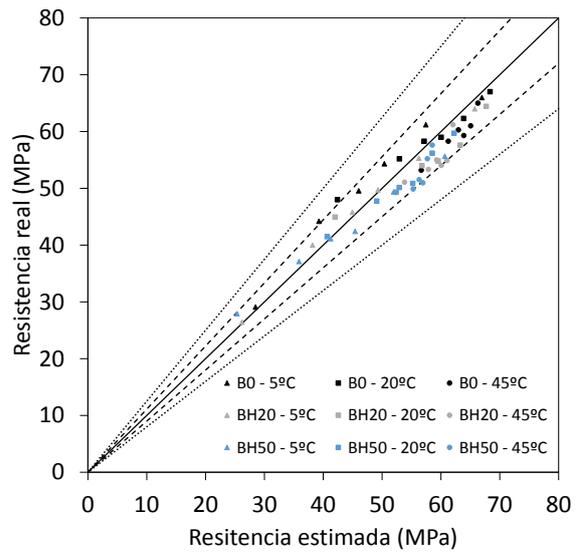
(c) "k" calculado para cada dosificación por separado

Figura 8.24. Resistencia real vs. resistencia estimada con función exponencial y $M=t_e \cdot T_r$ (CO y CH)

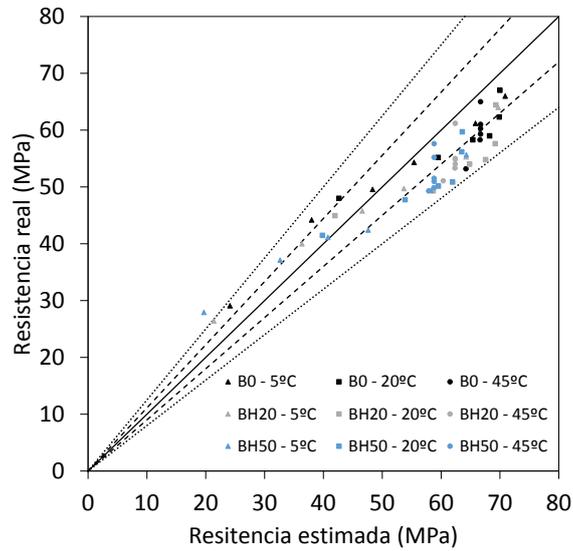
En las figuras 8.25 y 8.26 se representan las resistencias estimadas mediante la ecuación hiperbólica (2.7) y con $M= t_e \cdot T_r$. En ambos hormigones la mayoría de las estimaciones tienen un error menor del 10% y solo hay un valor de estimación de la resistencia en cada hormigón con error mayor al 20%. Los resultados obtenidos con esta misma ecuación hiperbólica y con $M=FTT$ (figuras 8.21 y 8.22) son ligeramente peores, si bien la diferencia no es considerable.



(a) "A" calculado con los datos de BO

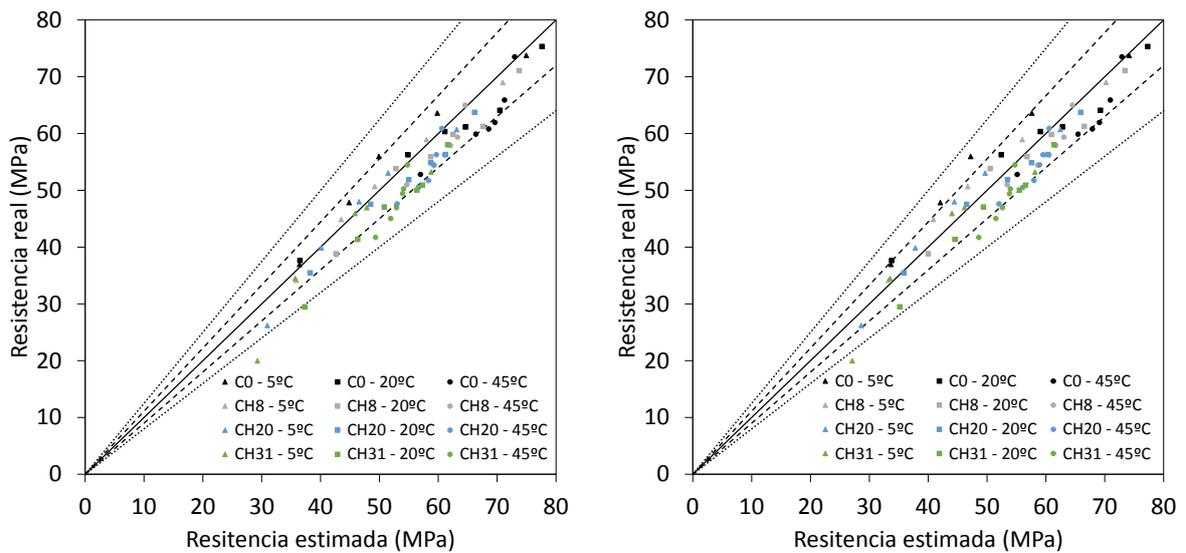


(b) "A" calculado con todos los datos



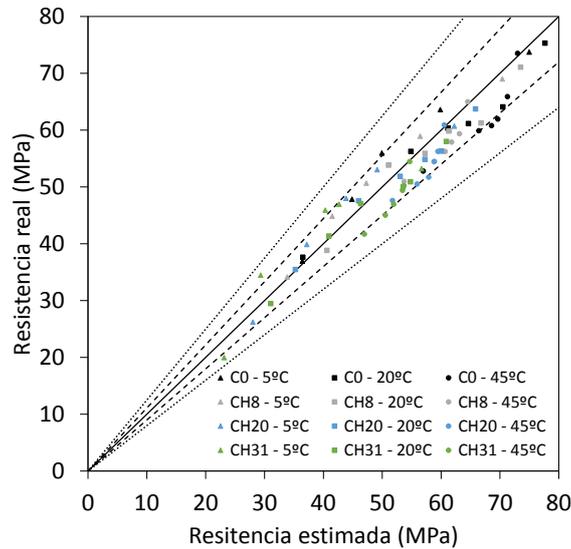
(c) "A" calculado para cada dosificación por separado

Figura 8.25. Resistencia real vs. resistencia estimada con función hiperbólica y $M=te \cdot Tr$ (BO y BH)



(a) "A" calculado con los datos de CO

(b) "A" calculado con todos los datos



(c) "A" calculado para cada dosificación por separado

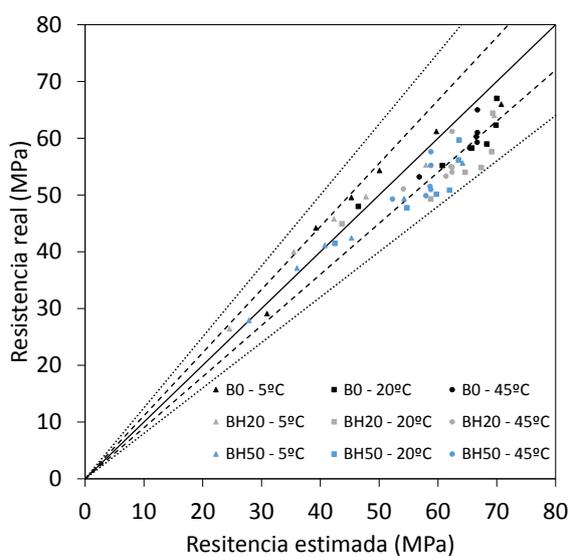
Figura 8.26. Resistencia real vs. resistencia estimada con función hiperbólica y $M=te \cdot Tr$ (CO y CH)

- Comparación de resultados en función del cálculo del índice de madurez y de la ecuación de estimación utilizada.

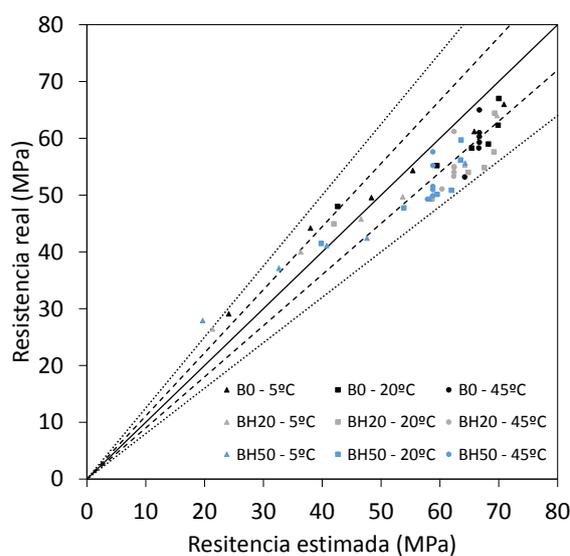
De los resultados obtenidos se puede obtener la conclusión de que, efectivamente, el parámetro "k" de la ecuación exponencial y el parámetro "A" de la ecuación hiperbólica no dependen de la cantidad de árido reciclado y que asumir el valor de estos parámetros igual al obtenido con los datos del hormigón de referencia dan lugar a estimaciones de resistencia válidas con errores asumibles (menores al 20%) tanto en el hormigón autocompactante como en el vibrado. Las figuras 8.27 agrupa los resultados obtenidos bajo la premisa de que los valores de "k" y "A" son iguales para todos los hormigones de una misma clase (B o C) y se han calculado únicamente con los datos de los hormigones de referencia correspondientes. En la figura 8.27 y 8.28 se observa que, con la ecuación hiperbólica (2.7), se obtienen mejores resultados que con la exponencial (2.2) tanto en el caso de tomar el índice de madurez igual al

factor tiempo-temperatura (FTT) como en el caso de calcularlo como el producto de la temperatura de referencia por la edad equivalente calculada según la ecuación de Arrhenius para el cálculo de la edad equivalente (ecuación 2.5).

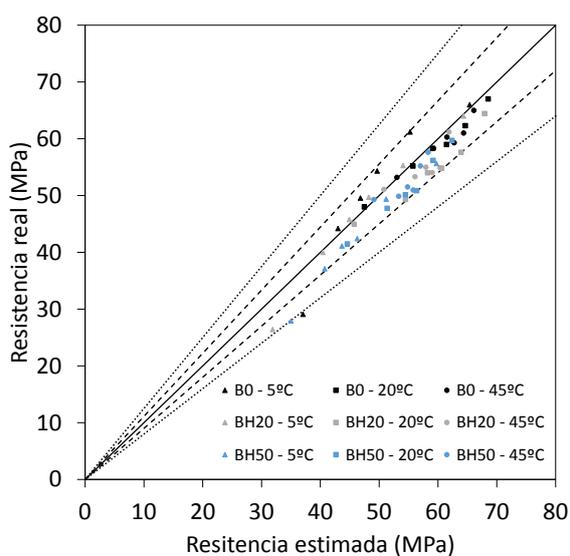
Centrándose en las estimaciones efectuadas con la ecuación que mejores resultados arroja (la hiperbólica), se observa que el error cuadrático medio de estimación en los hormigones autocompactantes es prácticamente igual tomando el índice de madurez como FTT como si se toma el resultante de multiplicar la edad equivalente definida con la ecuación de Arrhenius (ecuación 2.5) por la temperatura de referencia. En el caso de los hormigones vibrados, se observa un error cuadrático medio ligeramente superior para índices de madurez calculados como FTT.



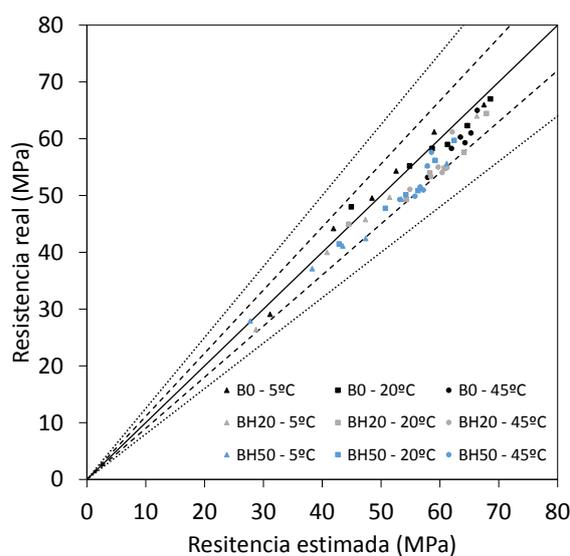
(a) Exponencial con $M=FTT$



(b) Exponencial con $M=te \cdot Tr$

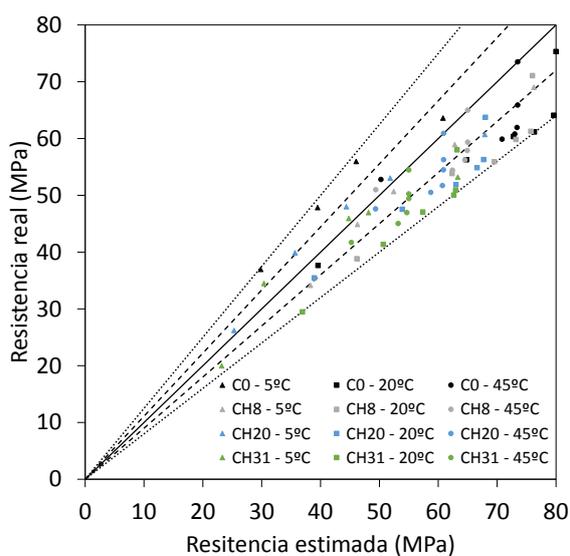


(c) Hiperbólica con $M=FTT$

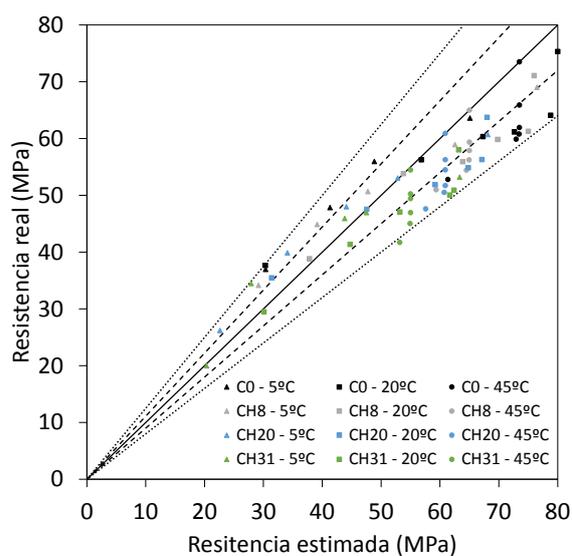


(d) Hiperbólica con $M=te \cdot Tr$

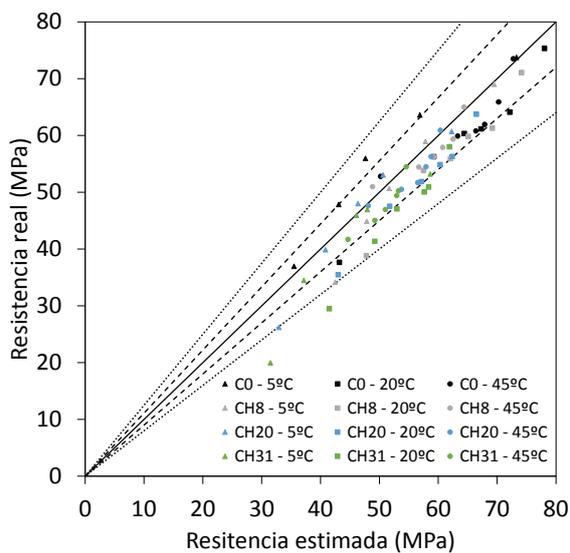
Figura 8.27. Resistencia real frente a resistencia estimada (k y A de B_0)



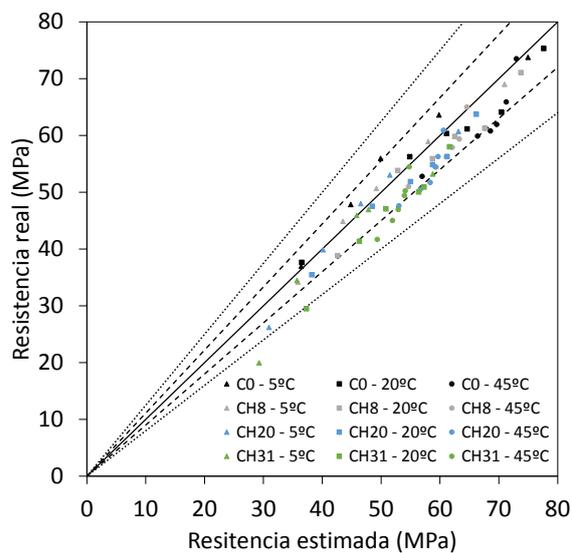
(a) Exponencial con $M=FTT$



(b) Exponencial con $M=te \cdot Tr$



(c) Hiperbólica con $M=FTT$



(d) Hiperbólica con $M=te \cdot Tr$

Figura 8.28. Resistencia real frente a resistencia estimada (k y A de CO)

Pese a que la estimación de la resistencia con la ecuación hiperbólica (ecuación 2.7) tomando como índice de madurez el calculado mediante la de multiplicación de la edad equivalente (ecuación 2.5) por la temperatura de referencia, es la estimación con ecuación hiperbólica y FTT arroja resultados similares, con menor cantidad de datos necesarios, ya que para calcular el FTT no es necesario conocer la energía de activación.

8.2. Influencia de las cenizas de biomasa en la energía de activación y en las curvas resistencia a compresión - madurez

8.2.1. Influencia de las cenizas de biomasa en la energía de activación

En la figura 8.29 se puede observar la influencia de la sustitución de cemento por cenizas de biomasa en la energía de activación: a mayor cantidad de cenizas de biomasa, menor es la energía de activación.

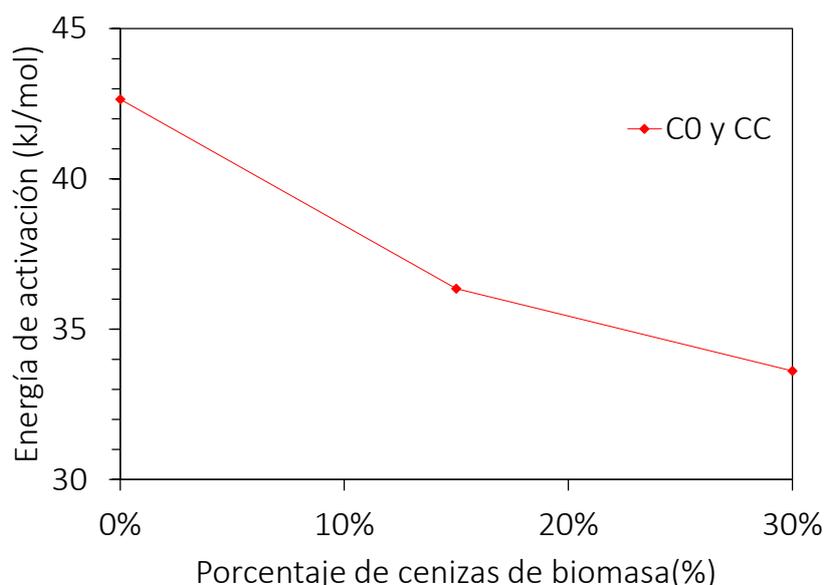


Figura 8.29. Energía de activación en función del porcentaje de cenizas de biomasa

Al igual que en el caso de los hormigones con árido reciclado, se procede a calcular para los hormigones con cenizas de biomasa la energía de activación en caso de que todo el historial de temperaturas esté por debajo (o todo por encima) de 20°C.

Las figuras 8.30 y 8.31 muestran los valores de la pendiente de la recta de ajuste (igual a “ $-E_a/R$ ”) de los hormigones CC15 y CC30 respectivamente. En la tabla 8.2 se muestran los valores de resistencia estabilizada (resistencia a tiempo infinito) y los valores de la energía de activación para los hormigones CO y los tipo CC.

Tabla 8.2. Resistencia estabilizada y energías de activación (CO y CC)

Parámetro	Temperatura (°C)	CO	CC15	CC30
S_{∞} (MPa)	5	80,9	63,99	54,32
	20	80,0	64,51	60,64
	45	73,5	64,67	62,98
K_T (1/días)	5	0,418	0,419	0,382
	20	1,348	1,218	0,981
	45	4,374	3,123	2,436
E_a total ASTM (KJ/mol)	-	42,65	36,35	33,61
E_a tª baja (KJ/mol)	5-20	52,84	48,20	42,55
E_a tª alta (KJ/mol)	20-45	36,47	29,17	28,20

La energía de activación disminuye al aumentar la cantidad de cemento sustituido por cenizas de biomasa, tanto en el caso de calcularla con las tres temperaturas en común, como en el caso de temperaturas bajas y en el de temperaturas altas, tal y como se puede observar en la figura 8.32. Además, al igual que ocurría en los hormigones anteriormente estudiados (excepto en el BH50), la energía de activación es mayor a la de la ASTM cuando se utiliza solo datos de temperaturas bajas, y es menor, cuando se trata del rango de temperaturas altas.

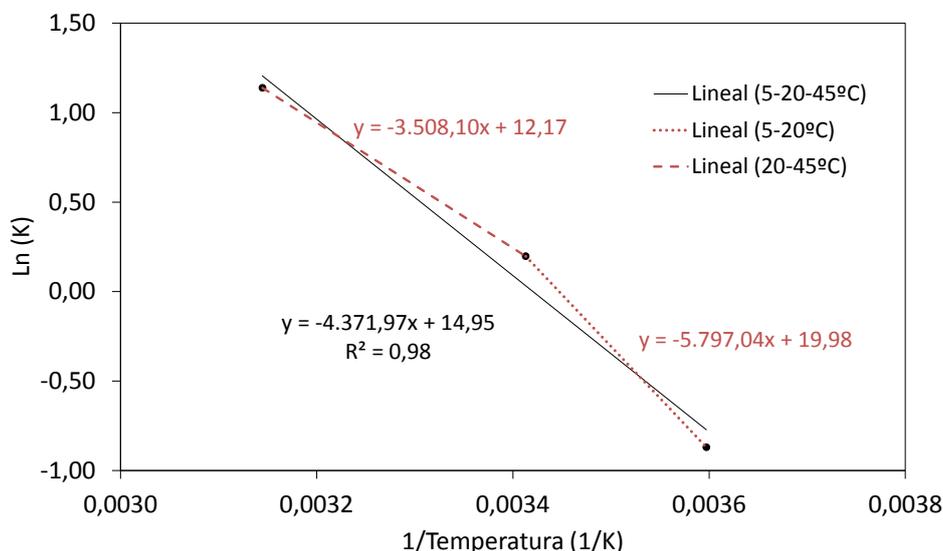


Figura 8.30. Inversa de la temperatura frente a $\ln(K)$ para hormigón CC15

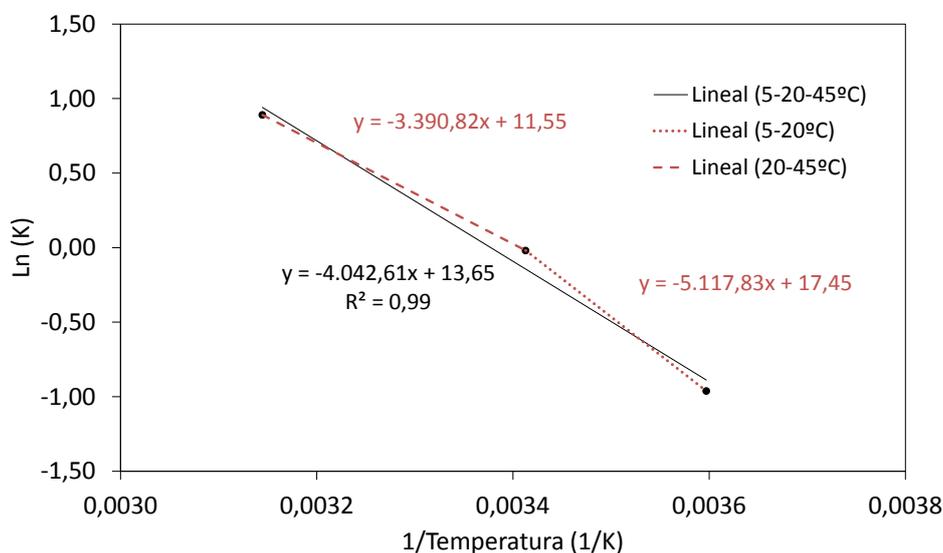


Figura 8.31. Inversa de la temperatura frente a $\ln(K)$ para hormigón CC30

No se han encontrado estudios anteriores sobre la influencia de las cenizas de biomasa en la energía de activación, si bien sí se han encontrado algunas referencias sobre la influencia de cenizas volantes procedentes de la combustión de carbón ([ARI92, KLEM16] y escorias, en las que se ha observado un descenso de la energía de activación al aumentar la cantidad de estas adiciones, al igual que ocurre en el caso de las cenizas de biomasa según el presente estudio. Si bien, Klemenzak concluye que con un

30% de reemplazo de cemento por escorias o cenizas volantes, la variación de la energía de activación no es significativa, por el contrario, con porcentajes mayores, el descenso del valor de la energía de activación es considerable. En el presente estudio, con un 30% de cenizas, en este caso de cenizas de biomasa, el descenso es significativo, en torno a un 15%, porcentaje de descenso similar al obtenido por Klemenzak para un 50% de reemplazo de cemento por cenizas volantes. Por tanto, las cenizas volantes utilizadas por Klemenzak afectan menos a la energía de activación que las cenizas de biomasa del presente estudio, si bien existen otros estudios con cenizas volantes (CARI92) donde el descenso de la energía de activación debido a un 30% de cenizas volantes se sitúa en torno a un 50%, porcentaje de descenso muy superior al observado en el caso de las cenizas de biomasa.

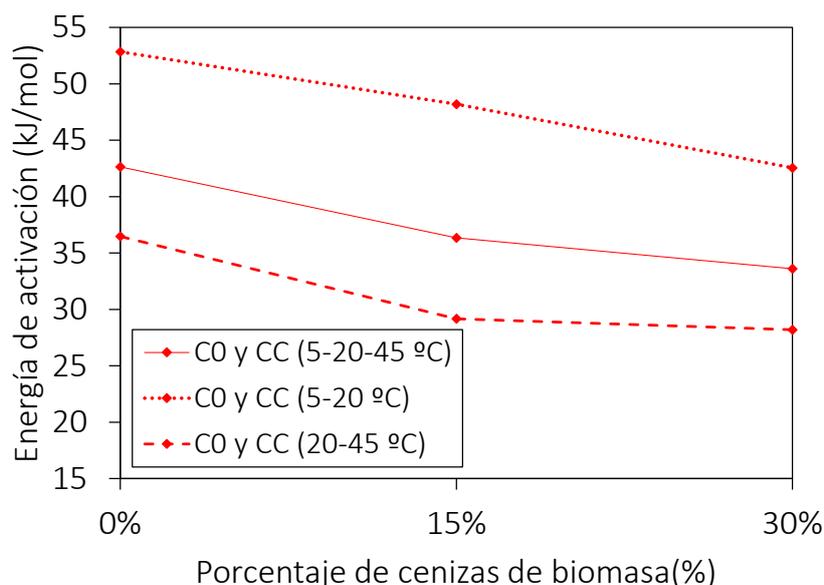


Figura 8.32. Energía de activación por tramos de temperatura

8.2.2. Bases teóricas y desarrollo metodológico para ensayo

En el caso de los hormigones con cenizas de biomasa, al reemplazar parte del cemento por cenizas de biomasa, se podría considerar que el tipo de cemento cambia, por tanto, no tiene cabida hacer un análisis similar al hecho con los hormigones con árido reciclado. En este caso, cabe esperar una variación de la constante “k” de la ecuación de estimación exponencial (2.2) o del parámetro “A” de la fórmula hiperbólica (2.7) debido a la adición de cenizas de biomasa. Por ello, se calcula por separado el valor de “k” y “A” que optimicen las estimaciones, minimizando el error cuadrático medio (8.1), para cada dosificación.

8.2.3. Análisis de las curvas de madurez y de la influencia de las cenizas de biomasa

Al igual que en los hormigones reciclados, en los hormigón con cenizas de biomasa, se han instrumentado seis probetas cúbicas, de 10 cm de lado, con sensores de temperatura embebidos en el centro de gravedad de cada probeta (2 probetas por cada hormigón y temperatura de curado) con el fin de obtener la curva de evolución de la temperatura interna de cada probeta. En la figura 8.33 se muestra la evolución de la temperatura interna de cada hormigón para cada una de las temperaturas de curado. Los valores mostrados son la media de los obtenidos en las dos probetas instrumentadas

para cada hormigón y temperatura de curado (la dispersión de los datos de temperatura interna, entre dos probetas del mismo hormigón y temperatura de curado, es despreciable).

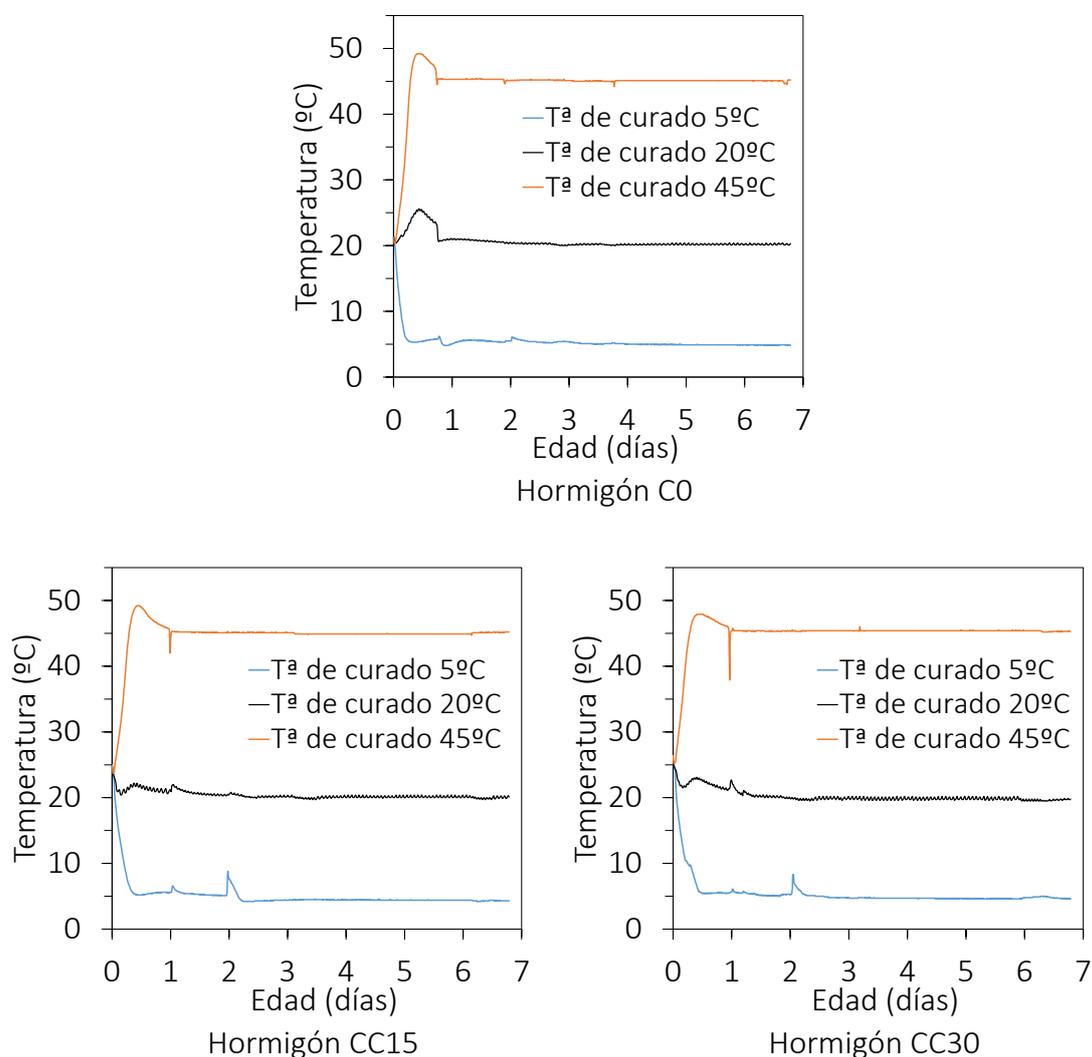


Figura 8.33. Temperaturas internas desarrolladas en probetas cúbica de 10 cm (C0 y CC)

Según las teorías de madurez, si se representa S/S_{∞} respecto de la madurez para un mismo hormigón, las curvas de evolución de las distintas temperaturas deberían confluir en una única. En la figura 8.33 se observa que la temperatura juega un papel más relevante en los casos de hormigones con cenizas de biomasa y los efectos de la temperatura no se pueden compensar utilizando la teoría de madurez clásica, ya que para un mismo hormigón, las curvas de 5°C, 20°C y 45°C no confluyen en una curva común, y difieren más cuanto mayor es la cantidad de cenizas de biomasa.

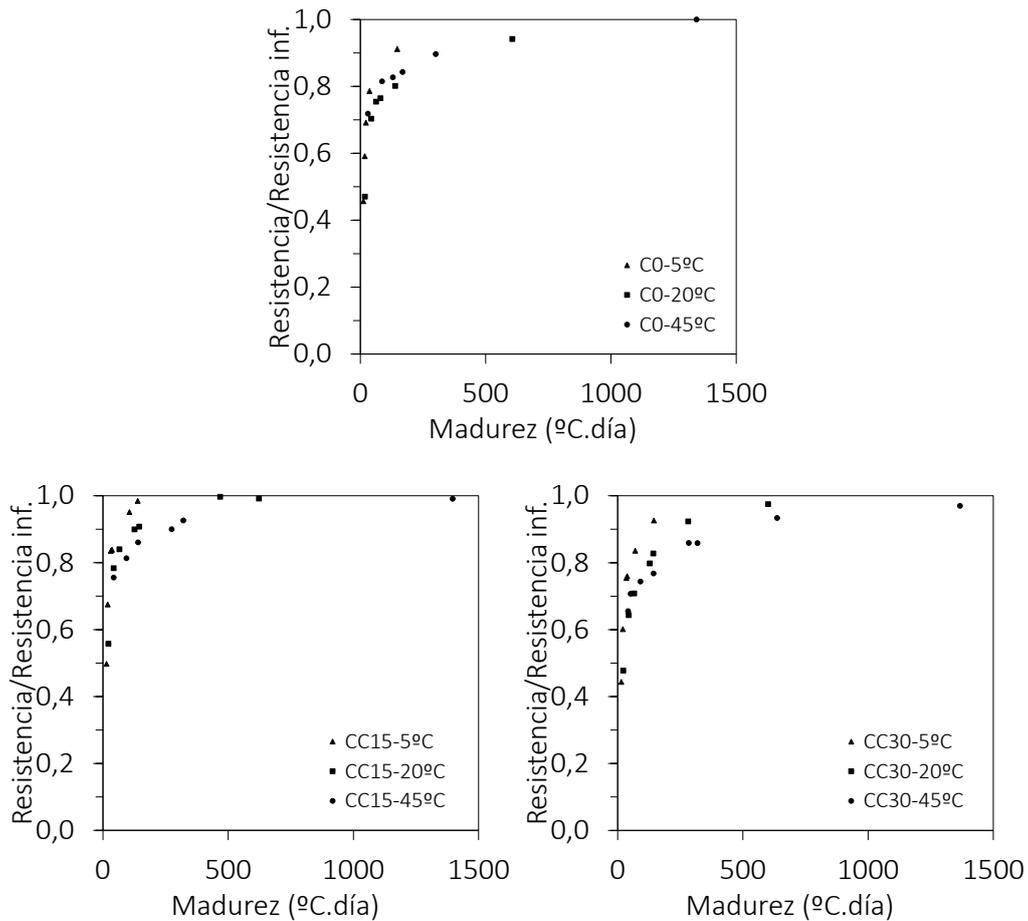


Figura 8.34. Ratio S/S_{∞} vs. FTT (CO y CC)

En la figura 8.35 se muestran las curvas ratio S/S_{∞} frente a edad equivalente.

En los hormigones de referencia y los hormigones con árido reciclado, al representar la edad equivalente (calculada con ecuación 2.5) frente a S/S_{∞} prácticamente se obtiene una única curva para cada hormigón independientemente de la temperatura de curado (figuras 8.6 y 8.7). Por el contrario, en el caso de los hormigones con cenizas de biomasa, para cada hormigón por separado, la curva de los hormigones a 45°C no coincide con la de 5°C y 20°C (próximas entre sí). Esto puede ser debido a la influencia de las altas temperaturas en la activación del poder cementante de las cenizas de biomasa (capítulo 5). A la vista de los resultados, se puede concluir que, en hormigones con estas cenizas de biomasa, para altas temperas, no se cumple la hipótesis de madurez de que, para un determinado hormigón, a igual madurez (o igual edad equivalente), igual ratio S/S_{∞} .

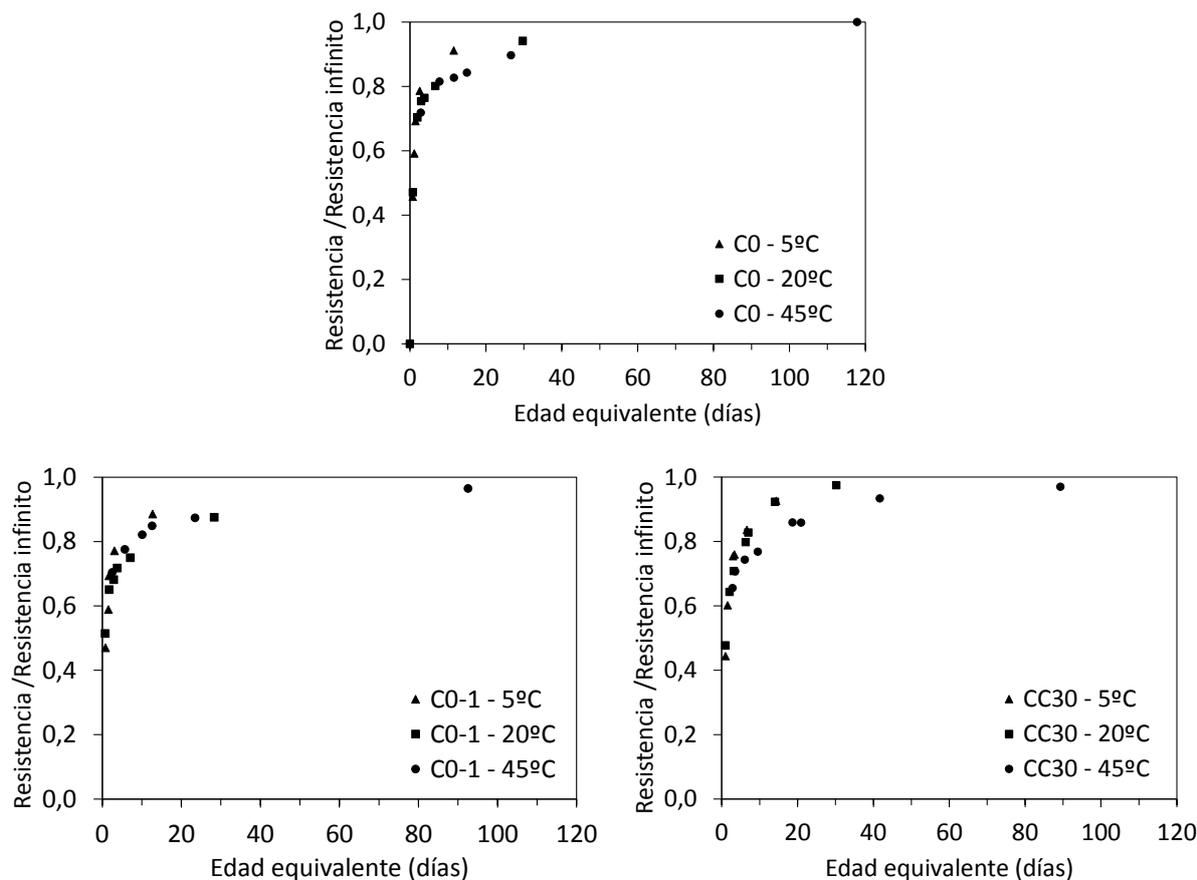


Figura 8.35. Ratio S/S_{∞} vs. t_e (CO y CC)

En la tabla 8.3 se puede observar los valores de “k” y “A” que minimizan el error cuadrático medio de la estimación con la ecuación exponencial (2.2) e hiperbólica (2.7) respectivamente. Se observa que con un 15% de sustitución de cemento por cenizas de biomasa los parámetros “k” y “A” apenas varían. Por el contrario, con un 30% de sustitución, la variación es mucho mayor. Mientras que con un 15% de sustitución se podrían utilizar los parámetros del hormigón de referencia sin tener errores excesivos, con un 30% no serían aplicables.

Tabla 8.3. Valores de los parámetros “k” y “A” (CO y CC)

Hormigón	M=FTT		M= $t_e \cdot T_r$	
	k	A	k	A
CO	-0,0385	5,30	-0,0313	4,41
CC15	-0,0436	5,52	-0,0334	4,24
CC30	-0,0264	2,28	-0,0200	2,23

En la figura 8.36 se compara la resistencia estimada con la fórmula exponencial (2.2), tomando los valores de “k” calculados, frente a la resistencia real. En la figura 8.36a se efectúan los cálculos con M=FTT, mientras que en la figura 8.36b se utiliza M= $t_e \cdot T_r$.

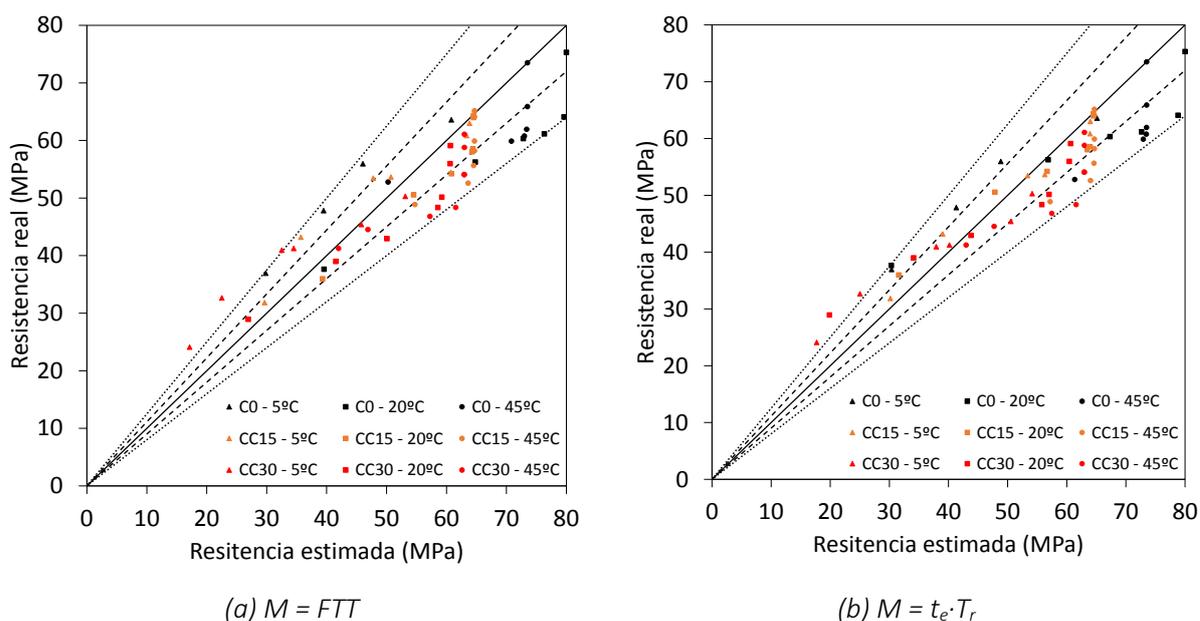


Figura 8.36. Resistencia real frente a resistencia estimada con ecuación exponencial (CO y CC)

En la figura 8.37 se compara la resistencia estimada con la fórmula hiperbólica (2.7) frente a la resistencia real. En la figura 8.37a se muestran los resultados tomando $M=FTT$ y en la figura 8.37b tomando $M=t_e \cdot T_r$.

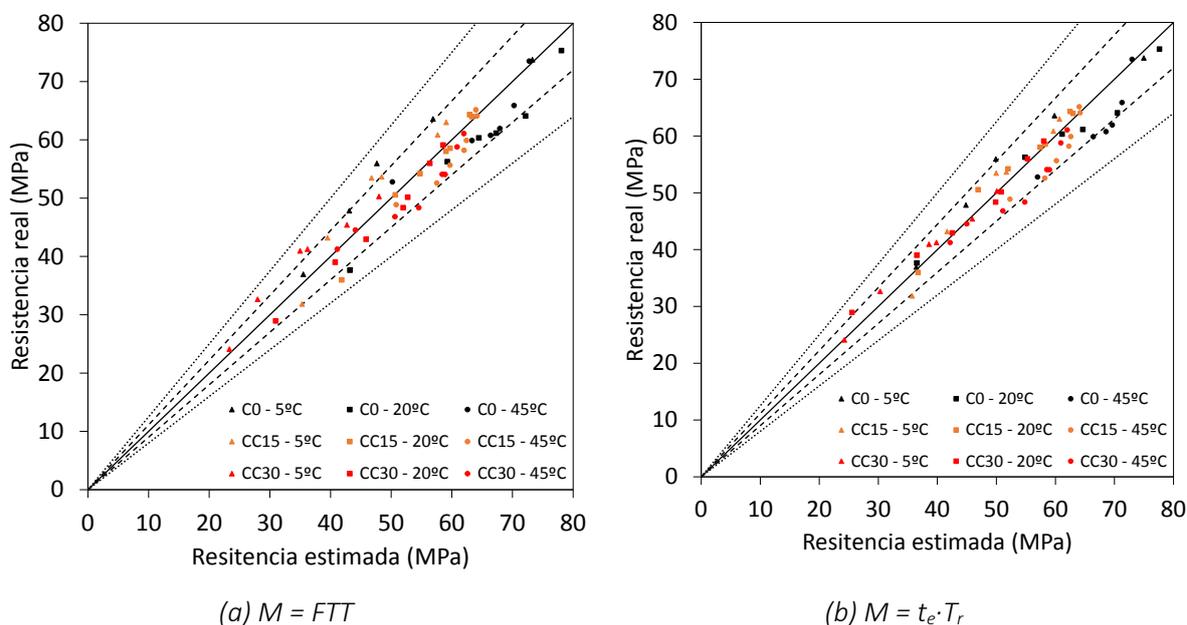


Figura 8.37. Resistencia real frente a resistencia estimada con ecuación hiperbólica (CO y CC)

La estimación con la ecuación hiperbólica (2.7) presenta resultados sustancialmente mejores que los obtenidos con la ecuación exponencial (2.2). En cuanto al índice de madurez, tanto en la estimación con la ecuación exponencial como con la hiperbólica, los resultados son ligeramente mejores cuando se

utiliza $M=t_e \cdot T_r$ que con $M=FTT$. Ambos hechos también se habían observado en los hormigones con áridos reciclados, tanto en los vibrados como en los autocompactantes.

8.3. Influencia del ratio agua/cemento en la energía de activación y en las curvas de resistencia a compresión – madurez

8.3.1. Influencia de la relación agua/cemento en la energía de activación

En las plantas de hormigón, la relación agua/cemento no es conocida con exactitud debido al desconocimiento de la humedad exacta de los áridos. Por ello, conocer la influencia que tiene una pequeña variación de la relación agua/cemento en la energía de activación (así como en otros parámetros) es de vital importancia para poder tener un orden de magnitud de los errores de estimación que puede conllevar esta incertidumbre en los hormigones fabricados en planta. Por ello, se ha estudiado la energía de activación en tres hormigones, cuya dosificación solo difiere en la relación agua/cemento en un intervalo de valores (0,40 a 0,45).

En la figura 8.38 se puede observar la influencia del ratio agua/cemento en la energía de activación; parece que a mayor ratio agua/cemento, mayor es la energía de activación. Existen investigaciones en las que se estudia la energía de activación de varios hormigones con dos relaciones agua/cemento: 0,45 y 0,60 [CARI92] y se observa que, para algunos de ellos se obtiene mayor energía de activación para 0,45 y, en otros, para 0,60. Con lo cual, lo único que se puede afirmar en el presente estudio, es que, para la dosificación estudiada, la energía de activación aumenta al aumentar la relación agua/cemento en un intervalo de ratio agua cemento entre 0,40 y 0,45.

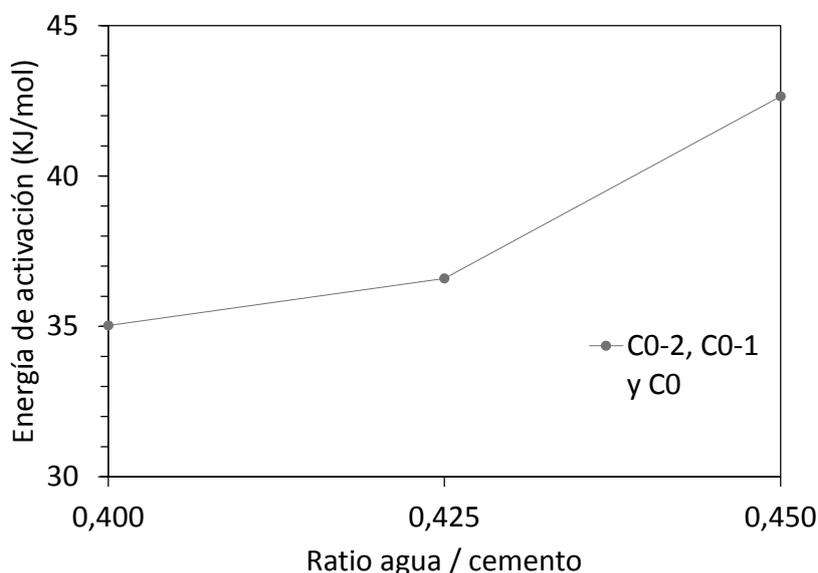


Figura 8.38. Energía de activación en función del ratio agua / cemento

Tal y como se observa en las figuras 8.39 y 8.40 (la pendiente de las rectas es igual a $-E_a/R$) y en la tabla 8.4, la energía de activación calculada con las tres temperaturas es menor que la calculada para temperaturas bajas y mayor que la calculada para temperaturas altas.

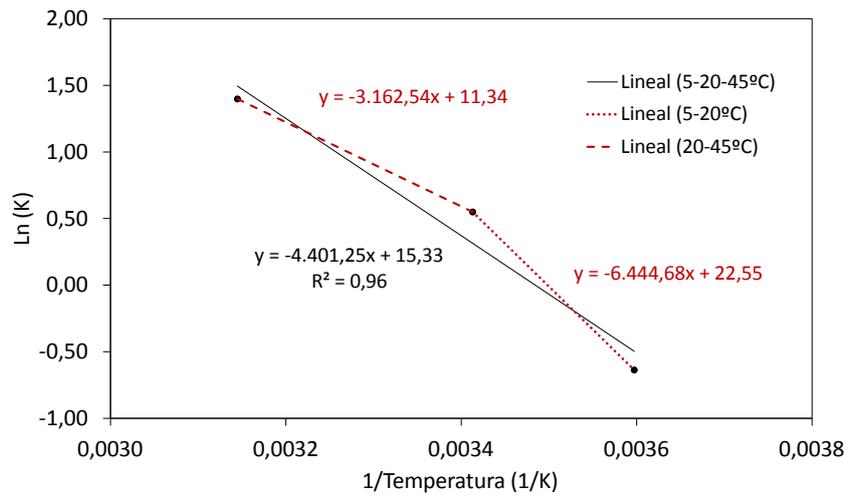


Figura 8.39. Inversa de la temperatura frente a Ln(K) para hormigón CO-1

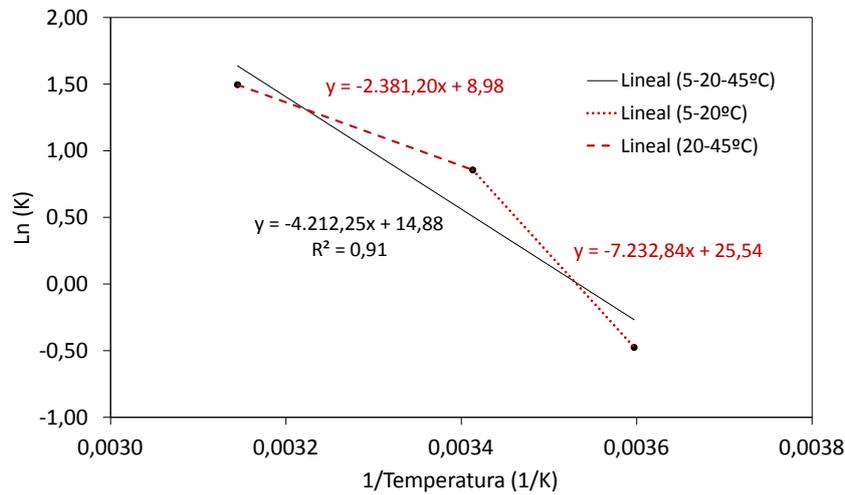


Figura 8.40. Inversa de la temperatura frente a Ln(K) para hormigón CO-2

Tabla 8.4. Resistencia estabilizada y energías de activación (CO, CO-1 y CO-2)

Parámetro	Temperatura (°C)	CO	CO-1	CO-2
S_{∞} (MPa)	5	80,9	83,6	99,2
	20	80,0	86,7	95,6
	45	73,5	76,7	93,5
K_T (1/días)	5	0,418	0,529	0,622
	20	1,348	1,732	2,355
	45	4,374	4,047	4,461
E_a total ASTM (KJ/mol)	-	42,65	36,59	35,02
E_a tª baja (KJ/mol)	5-20	52,84	53,58	60,13
E_a tª alta (KJ/mol)	20-45	36,47	26,29	19,80

Tal y como se puede observar en la tabla 8.4 una disminución de la relación agua/cemento de 11% puede suponer una disminución de la energía de activación de en torno a 18% (calculada según ASTM C1074-11 [RN04], con tres temperaturas). Si se desea hacer un cálculo preciso de la madurez de un

hormigón en una obra o en una fábrica de prefabricados, es necesario tener en cuenta la influencia de la relación agua/cemento en la energía de activación. Realizar un estudio de la variabilidad de la humedad de los áridos de cada amasada del día durante varios días, en distintas épocas del año, puede servir para hacer una estimación de la variabilidad de tendrán las relaciones agua/cemento de los hormigones. Una vez que la variación de agua/cemento está acotada, será posible hallar la energía de activación para cada extremo, de forma que será posible hacer una estimación de la resistencia a compresión, dando un intervalo de resistencia estimada según los valores de energía de activación calculados.

Durante un mismo día, si es un día seco (no lluvioso) la relación agua/cemento de las amasadas de una planta va disminuyendo conforme se van efectuando amasadas. Esto se debe a que, durante la noche el agua va decantando y se sitúa en las capas más bajas de la tolva. Por ello, el árido que se utiliza en las primeras amasadas tiene una humedad mucho mayor que las amasadas posteriores, siempre y cuando no se rellenen tolvas a mitad de jornada.

8.3.2. Bases teóricas y desarrollo metodológico para ensayo

En este caso, al tratarse de tres hormigones en los que se varía la relación agua/cemento, cabe esperar que la constante "k" de la ecuación de estimación exponencial (2.2) o del parámetro "A" de la fórmula hiperbólica (2.7) varíe, ya que ambos parámetros dependen de la relación agua/cemento por definición. Por ello, se calcula por separado el valor de "k" y "A" que optimicen las estimaciones, minimizando el error cuadrático medio, para cada dosificación y posteriormente se analiza la influencia de la variación del ratio agua/cemento en dichos parámetros y en las estimaciones correspondientes.

8.3.3. Análisis de las curvas de madurez y de la influencia de la relación agua/cemento

En la figura 8.41 se muestra la evolución de la temperatura interna de cada hormigón para cada una de las temperaturas de curado. Los valores mostrados son la media de los obtenidos en las dos probetas instrumentadas para cada hormigón y temperatura de curado (al igual que ocurría en los hormigones estudiados anteriormente, la dispersión de los datos de temperatura interna, entre dos probetas de del mismo hormigón y temperatura de curado, es despreciable).

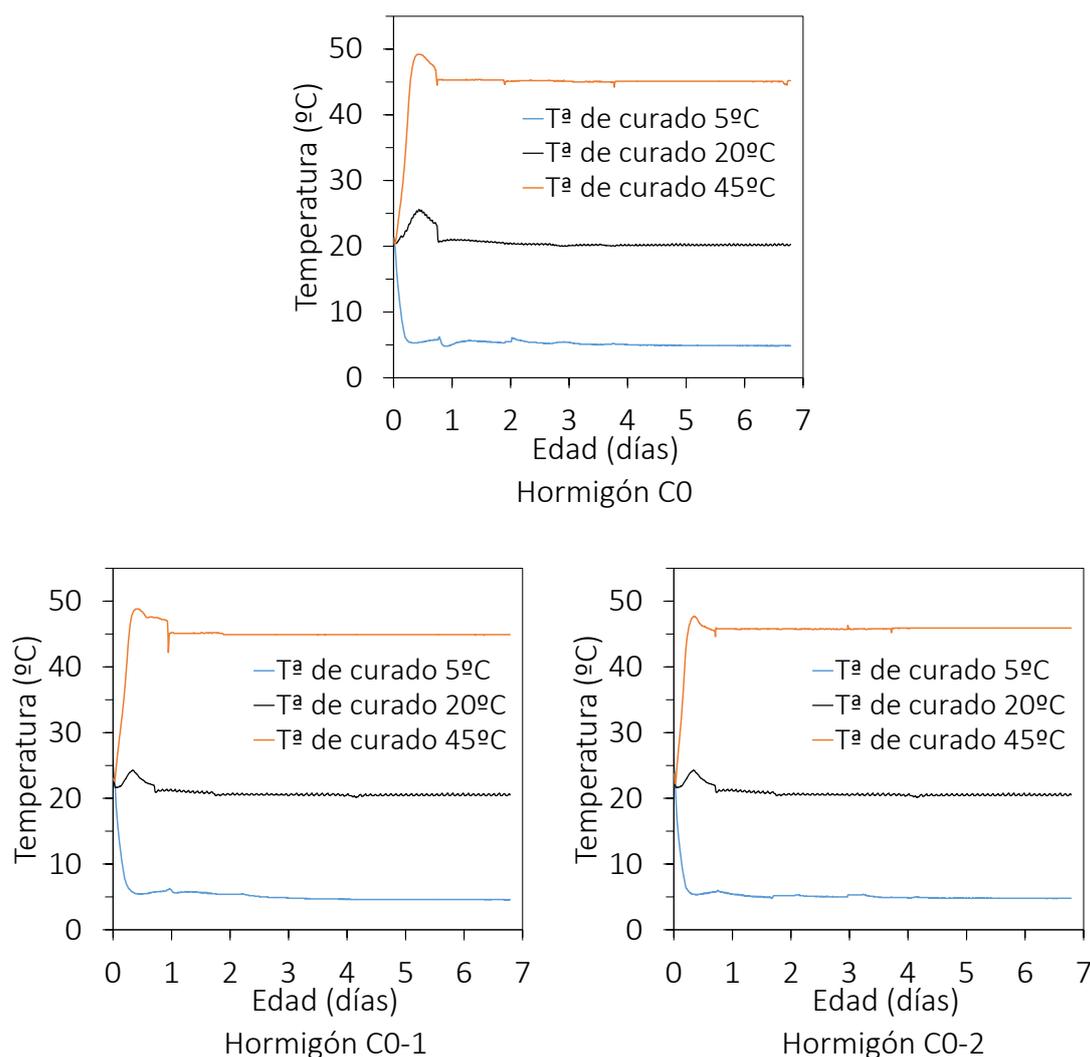


Figura 8.41. Temperaturas internas desarrolladas en probeta cúbica de 10 cm (C0, C0-1 y C0-2).

Tal y como se ha comentado en apartados anteriores, según las teorías de madurez, si se representa la madurez respecto a S/S_{∞} , (e edad equivalente frente a S/S_{∞}), para un mismo hormigón, las curvas de evolución de las distintas temperaturas deberían confluir en una única curva. En la figura 8.42 y 8.43 se muestran una comparativa de dichas curvas en función de la relación agua/cemento. La confluencia de las curvas de distintas temperaturas en una sola curva es mucho mayor en el caso de representar la edad equivalente (figura 8.43) calculada según la ecuación 8.4, que es la que se utiliza para el cálculo del índice de madurez según la ecuación 8.6. La confluencia utilizando el factor tiempo-temperatura como índice de madurez (figura 8.42) es menor, sobre todo en el caso del hormigón C0-1. Por ello, cabe esperar que los resultados de estimación obtenidos con el índice de madurez como FTT sean peores que los obtenidos con la ecuación 8.6.

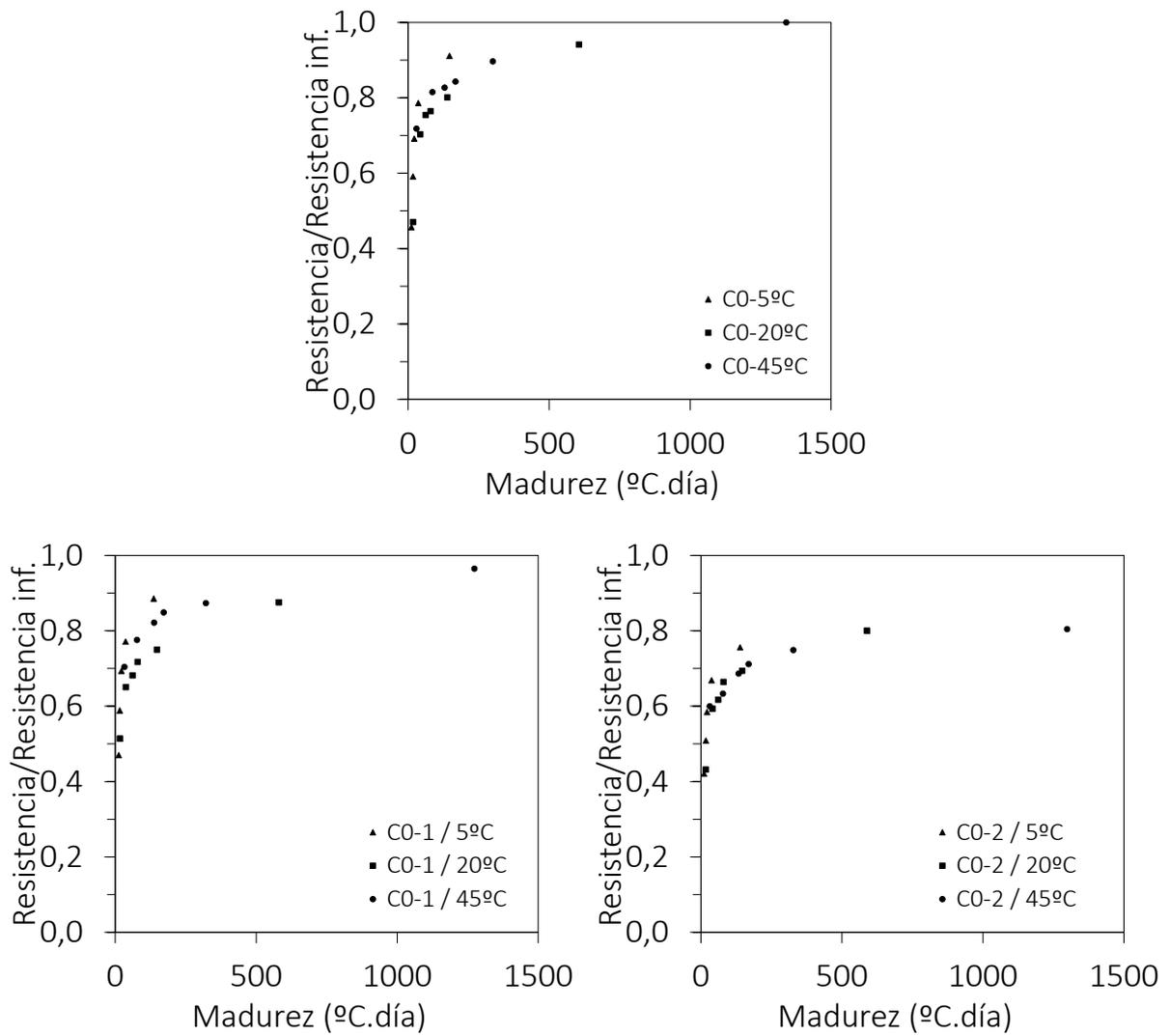


Figura 8.42. Ratio S/S_{∞} vs. FTT (CO, CO-1 y CO-2)

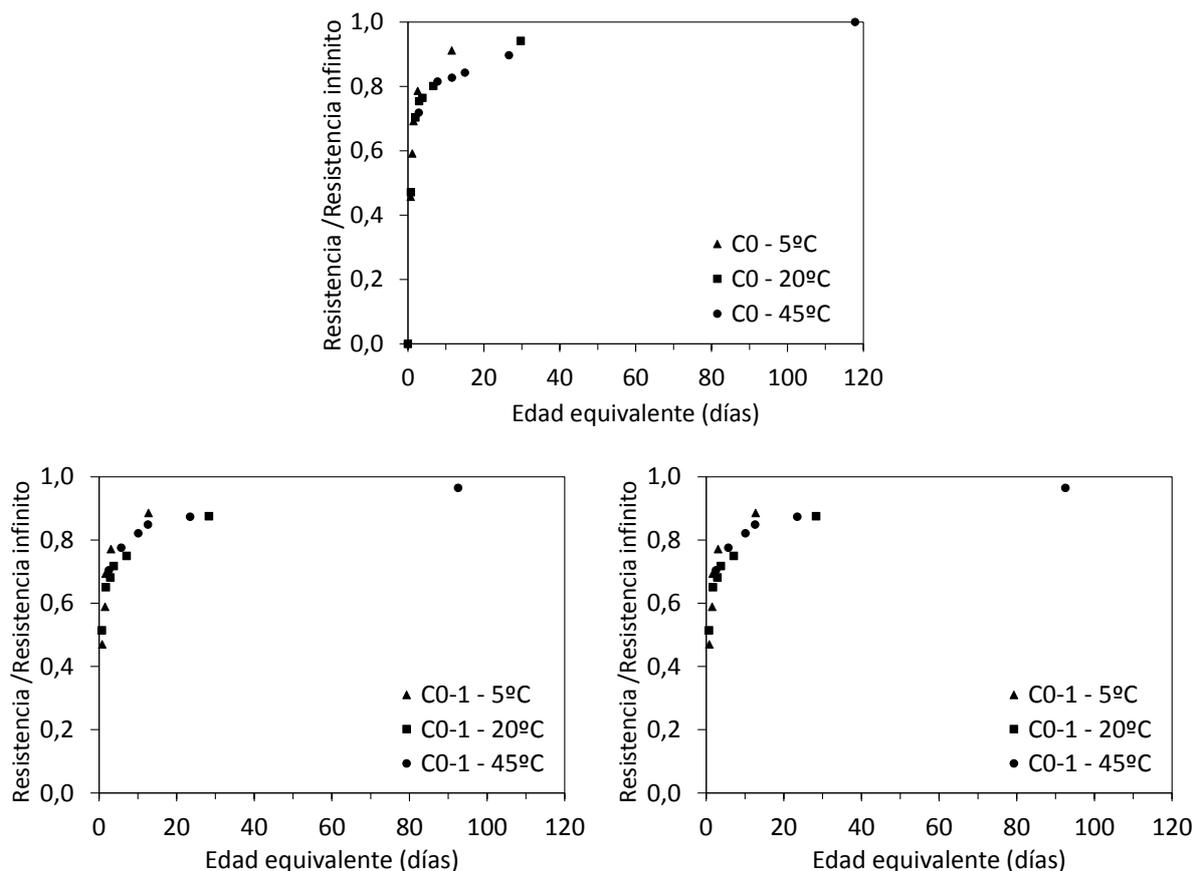


Figura 8.43. Ratio S/S_{∞} vs. t_e (CO, CO-1 y CO-2)

Debido a que “k” (ecuación 2.2) y “A” (ecuación 2.7) dependen de la relación a/c y cada una de estas dosificaciones tiene una relación a/c distinta, estos parámetros tomarán valores distintos para cada dosificación y las curvas no confluyen en una misma curva de madurez frente a S/S_{∞} . Se procede a calcular la constante “k” y “A” que optimizan la estimación de la resistencia a compresión para cada uno de los tres hormigones.

Al igual que se ha observado en todos los hormigones que se han estudiado anteriormente en este capítulo, se obtienen mejores resultados de estimación de resistencia a compresión con la ecuación hiperbólica (figura 8.45) que con la exponencial (figura 8.44). Así mismo, los resultados obtenidos con ambas ecuaciones son mejores si se toma el índice de madurez calculado con $M=t_e \cdot T_r$ que con $M=FTT$. En la tabla 8.5 se muestran los valores de “k” y “A” que optimizan las estimaciones para los hormigones CO, CO-1 y CO-2.

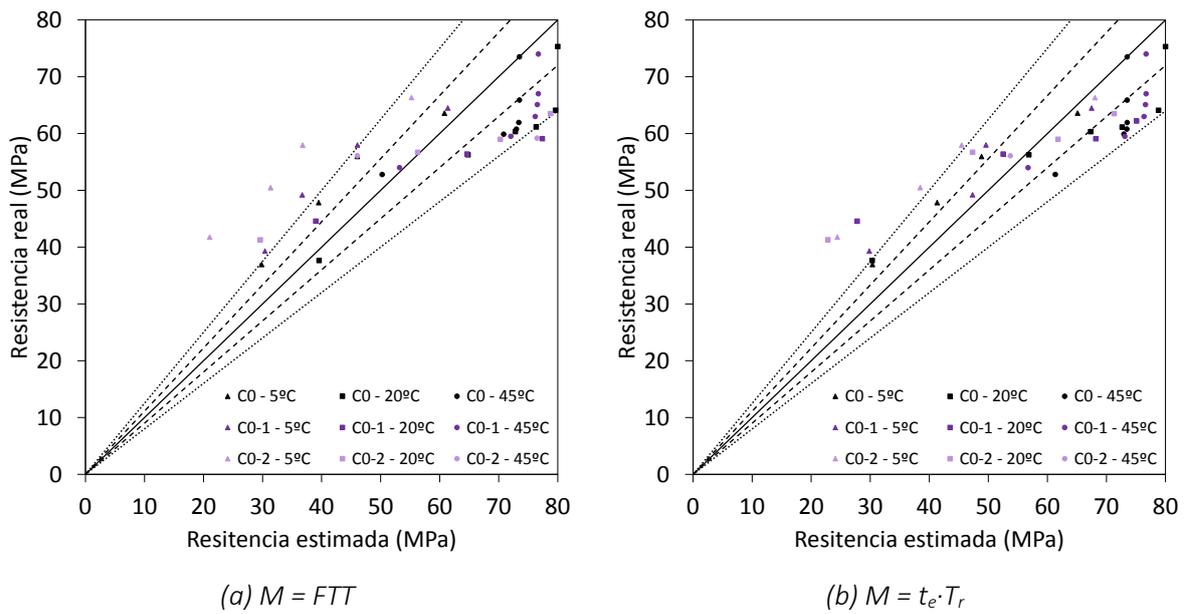


Figura 8.44. Resistencia real vs. resistencia estimada con ecuación exponencial (CO, CO-1 y CO-2)

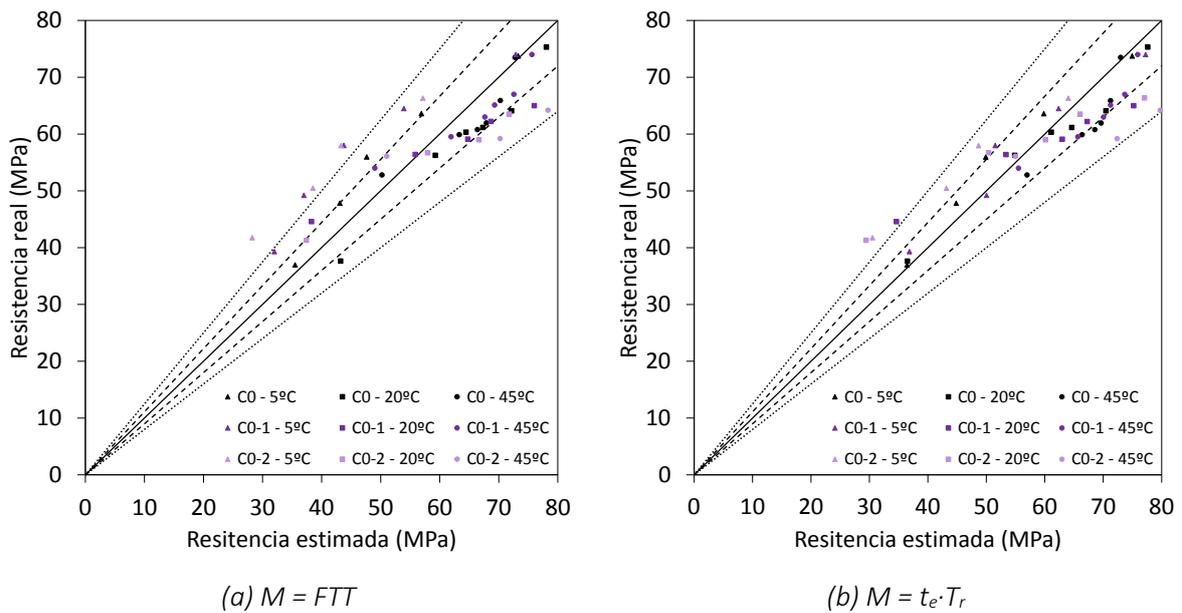


Figura 8.45. Resistencia real vs. resistencia estimada con ecuación hiperbólica (CO, CO-1 y CO-2)

Tabla 8.5. Parámetros "k" y "A" (CO, CO-1 y CO-2)

Hormigón	M=FTT		M=t _e ·T _r	
	k	A	k	A
CO	-0,0385	5,30	-0,0313	4,41
CO-1	-0,0364	4,17	-0,0268	4,00
CO-2	-0,0218	3,61	-0,0180	2,82

En la gráfica 8.46 se observa como la relación agua/cemento influye en los parámetros “k” y “A”. Al aumentar la relación agua/cemento, el valor de “k” disminuye (aumenta en valor absoluto) y el valor de “A” aumenta.

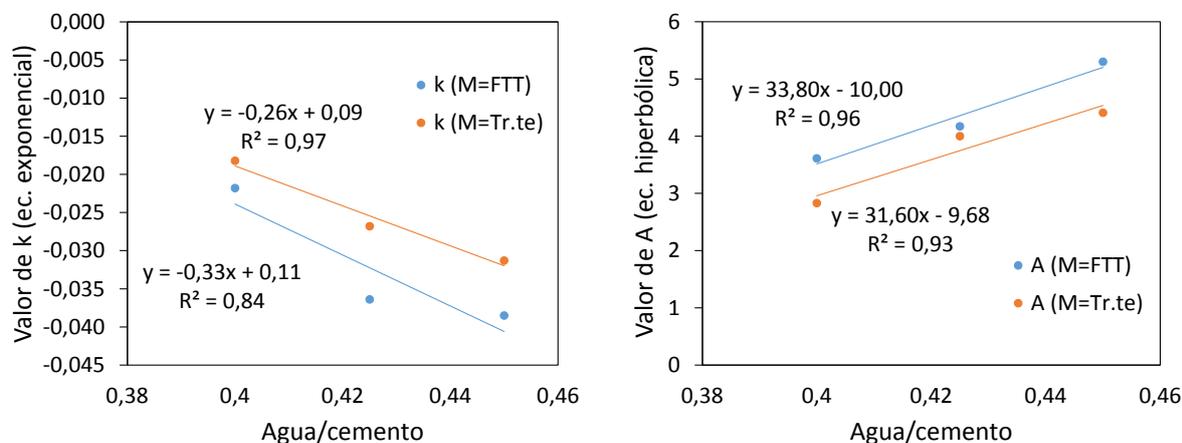


Figura 8.46. Influencia del ratio agua/cemento en los parámetros “k” y “A”

8.4. Propuesta de posible formulación para la estimación de la energía de activación

En los apartados anteriores se ha observado como ciertas variaciones en la composición del hormigón producen variaciones en la energía de activación:

Al aumentar el porcentaje de sustitución de árido natural por árido reciclado (fino y grueso) se observa un aumento de la energía de activación y una disminución de la densidad media del hormigón.

Al sustituir parte del cemento por cenizas de biomasa (y por tanto disminuir la cantidad de cemento) se observa una disminución de la energía de activación.

Un aumento de la relación agua/cemento provoca un aumento de la energía de activación. Este hecho se ha observado comparando los resultados de tres hormigones con la misma cantidad de cemento, por tanto, se ha variado únicamente la cantidad de agua efectiva. Se podría decir que con un aumento del agua efectiva se observa un aumento de la energía de activación.

Por tanto, tres variables importantes parecen ser: la densidad del hormigón, la cantidad de cemento y el agua efectiva. En la tabla 8.6 se pueden observar estos datos referentes a los 11 hormigones estudiados en este capítulo.

Tabla 8.6. Resumen de datos de los hormigones estudiados

Hormigón	Ea (J/mol)	Densidad media (Kg/m ³)	Cantidad de cemento (Kg/m ³)	Cantidad de cenizas (Kg/m ³)	agua efectiva (Kg/m ³)
B0	39732	2295	335	0	167,5
BH20	41382	2266	335	0	167,5
BH50	44812	2228	335	0	167,5
C0	42647	2480	400	0	180
CH8	42425	2438	400	0	180
CH20	48835	2436	400	0	180
CH31	52157	2400	400	0	180
CC15	36351	2463	340	60	180
CC30	33612	2444	280	120	180
C0-1	36594	2492	400	0	180
C0-2	35023	2500	400	0	180

La ecuación 8.2 muestra una posible formulación simple que refleja la influencia de los factores que anteriormente se han citado.

$$\hat{E}_a = E_0 - \alpha \cdot D + \beta \cdot AE + \gamma \cdot CEM \quad (8.2)$$

siendo:

E_0 = energía de activación previsible según el tipo de cemento (40.000 J/mol para CEMI).

D = densidad (kg/m³)

AE = agua efectiva por metro cúbico de hormigón (kg/m³)

CEM = cantidad de cemento por metro cúbico de hormigón (kg/m³)

Se han hecho cálculos teniendo en cuenta la cantidad de cenizas, pero los resultados no mejoran de forma sustancial, pese a aumentar un parámetro en la optimización.

Aplicando la ecuación 8.2, se ha estimado la energía de activación de los 11 hormigones estudiados en este capítulo. Se ha tomado E_0 igual a 40.000 J/mol y se han calculado por mínimos cuadrados los valores óptimos de los coeficientes α , β y γ para la estimación de la energía de activación. Los resultados obtenidos son buenos, con errores de estimación menores al 10%, tal y como se puede observar en la figura 8.47.

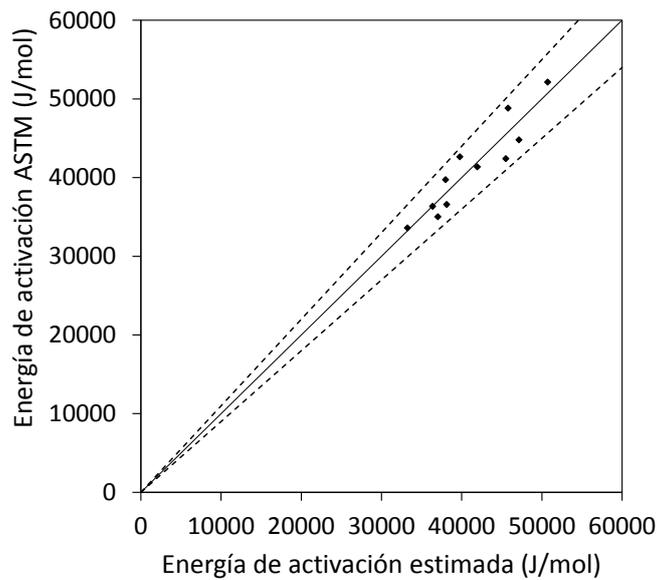


Figura 8.47. Energía de activación calculada según ASTM frente a la estimada

En la tabla 8.7 se muestran los valores de α , β y γ obtenidos en la optimización. Si bien es cierto que los resultados de estimación son muy buenos (figura 8.47), no se puede generalizar esta ecuación fijando los valores obtenidos de α , β y γ , debido a que únicamente se ha calibrado con 11 hormigones. Solo a modo de comentario, se observa que para los hormigones estudiados, los resultados apuntan a que parece que es posible hacer una estimación de la energía de activación teniendo en cuenta estos parámetros básicos (la densidad del hormigón, la cantidad de cemento y el agua efectiva), con una aproximación como la propuesta en la ecuación 8.2, si bien para proponer una fórmula empírica con valores de α , β y γ fijados, sería necesario desarrollar un extenso proyecto en el que se estudien estas y otras variables de una cantidad considerable de hormigones.

Tabla 8.7. Valores de los coeficientes de la ecuación 8.2 obtenidos por optimización

Coeficiente	Valor obtenido en optimización
α	13,679
β	16,712
γ	0,954

8.5. Evolución de la resistencia a compresión in situ en función del historial de temperaturas. Aplicación a casos reales

8.5.1. Introducción

Se aplicará el método de la madurez en tres tipologías de piezas prefabricadas: muros, vigas de sección rectangular y vigas sección doble T.

En la aplicación en muros, únicamente se estudia la evolución de la resistencia a compresión en distintos puntos de un muro fabricado con un hormigón con un 20% de árido reciclado fino y grueso de hormigón (BH20). Se fabrican probetas cúbicas que se curan en obra con el fin de comparar los resultados con los de distintos puntos de la pieza.

En la aplicación del método en vigas de sección rectangular y en las vigas de sección doble T, se ha desarrollado una campaña experimental en la que se comparan los resultados en tres vigas fabricadas con hormigones con distintos porcentajes de sustitución de árido reciclado fino y grueso de hormigón, con el fin de poder hacer un análisis comparativo de los resultados y poder observar si en los hormigones con árido reciclado fino y grueso los resultados de estimación son mejores, peores o iguales a los obtenidos en los hormigones de referencia.

8.5.2. Aplicación en muros

Se ha instrumentado un muro fabricado con hormigón BH20 en distintos puntos del mismo. La figura 8.48 muestra un esquema de la ubicación de los sensores internos; el sensor A1 está situado en el ala del muro. El resto de sensores están en el tablero principal, a una altura media (7 cm). Con ello se pretende observar la diferencia de resistencia a compresión desarrollada en distintos puntos dentro del mismo muro.

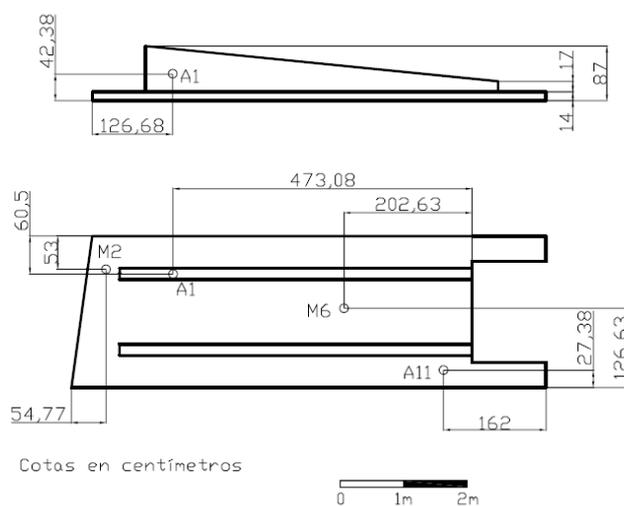


Figura 8.48. Esquema de colocación de sensores en muro

Además, se fabrican probetas cúbicas con el hormigón de la misma amasada utilizada para la fabricación de los muros y se curan en el mismo ambiente que los muros. Se envuelven con un material impermeable con el fin de que no pierdan agua por evaporación (figura 8.49) y se instrumentan con

sensores de temperatura interna con el fin de obtener la evolución de la temperatura de estas probetas cúbicas curadas a temperatura ambiente y poder comparar así la evolución de temperaturas y por ende la de la resistencia en probetas cúbicas curadas en condiciones diferentes (20°C en laboratorio y temperatura ambiente en fábrica).



Figura 8.49. Probetas curadas en el mismo ambiente que el muro

Como se puede observar en la figura 8.50, la temperatura ambiente se sitúa entre 15°C y 25°C, por lo que cabe esperar que no haya un problema de sobreestimación de la resistencia a compresión si se toman como valores correctos los obtenidos ensayando probetas curadas a 20°C, de todos modos, a continuación se exponen los resultados obtenidos aplicando las correcciones de madurez. En la figura 8.51 se puede ver como la estimación de resistencia a compresión del hormigón de cualquiera de los puntos instrumentados del muro es mayor que la que se obtiene en probetas cúbicas curadas a temperatura ambiente o a temperatura exterior; por tanto, no hay un problema de sobreestimación de la resistencia si se toman como válidos los resultados obtenidos en probetas de control curadas a temperatura estándar (20°C).

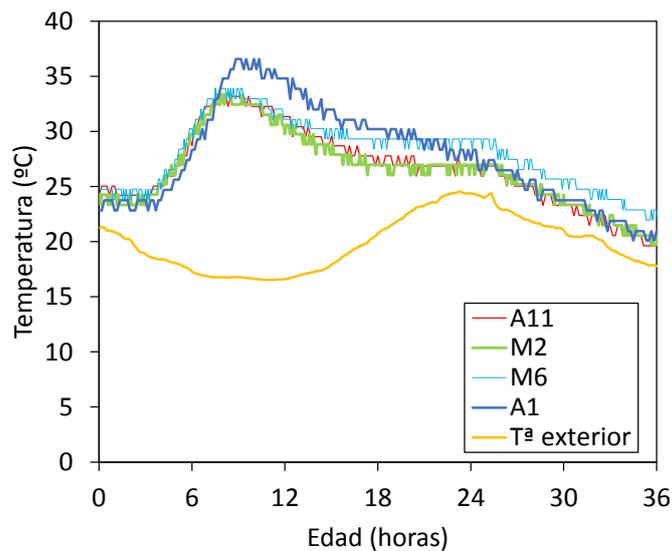


Figura 8.50. Historial de temperaturas durante el fraguado (Muros BH20)

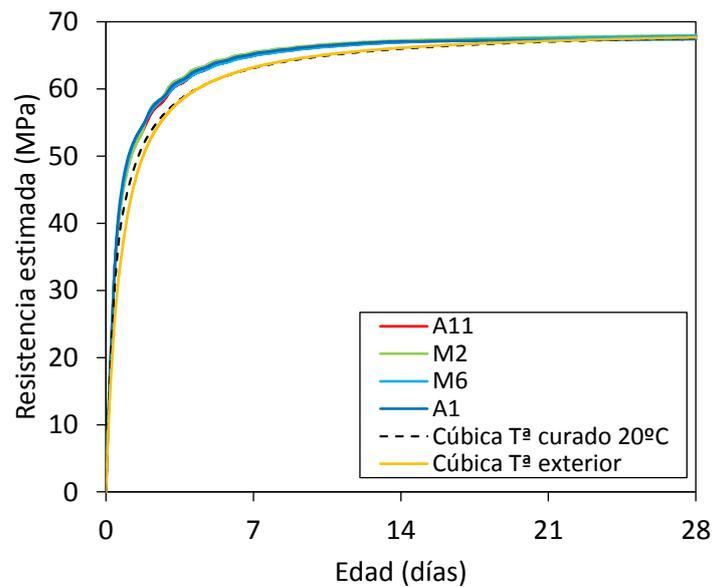


Figura 8.51. Estimación de la evolución de la resistencia a compresión en muro BH20

8.5.3. Aplicación en vigas de sección rectangular

Se han instrumentado con sensores de temperatura internos tres vigas fabricadas con hormigones autocompactantes de clase B (B0, BH20 y BH50). La sección de estas vigas es de 50 x 30 cm y su longitud es de 6,5 metros (figura 8.52). Los sensores se han colocado en el interior de la viga, centrados en sección transversal, y posicionados longitudinalmente cerca de un extremo de la misma, con el fin de obtener el historial de temperaturas internas en los puntos más fríos, ya que a menor temperatura, menor resistencia desarrollada a primeras edades y por tanto, la estimación se queda del lado de la seguridad (los puntos que desarrollen más temperatura habrán desarrollado más resistencia a igual edad).



Figura 8.52. Viga de sección rectangular instrumentada con sensor de temperatura interna

Las tres vigas fueron fabricadas durante el mismo día en la planta de prefabricados Castelo. La temperatura exterior corresponde al ambiente cercano a la viga. En la figura 8.53 se puede observar los ciclos de temperatura día-noche de la temperatura exterior. La temperatura interior en las vigas es muy similar en los tres casos, si bien, al tratarse de hormigones con distinta energía de activación y distinta resistencia estabilizada final (S_{∞}), la evolución de la resistencia estimada será distinta para cada viga.

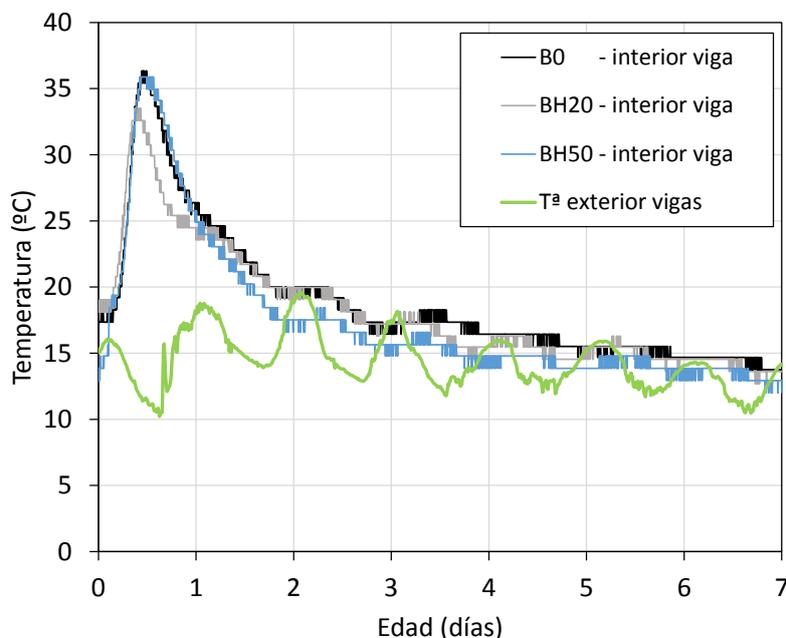


Figura 8.53. Evolución de la temperatura a edades tempranas en vigas de sección rectangular

Estas vigas se fabricaron en la misma fábrica que el muro de hormigón BH20. La diferencia de temperatura ambiente se debe a que las vigas se fabricaron en primavera y los muros en verano.

Debido al análisis desarrollado en apartados anteriores, para la estimación de la resistencia a compresión se utiliza la ecuación hiperbólica (2.7) y como índice de madurez se utiliza $M=t_e \cdot T_r$, debido a que es la que mejores resultados de estimación arroja. Se toma el valor del parámetro A calculado para cada uno de los hormigones.

La temperatura media exterior es menor de 20°C, que es la temperatura estándar de curado de probetas para control de calidad y para cálculo de la resistencia. Por ello, se decide hacer una comparativa entre la resistencia que tendría una probeta cúbica sometida al historial de temperaturas registrado en la viga y la resistencia que tendría una probeta cúbica curada a 20°C, teniendo en cuenta su historial de temperaturas internas (figura 8.9); si la resistencia de las probetas curadas a 20°C desarrollan una resistencia mayor que la estimada para el hormigón de la viga en función de su historial de temperaturas, puede existir un problema de seguridad en caso de que se tome como valor real de la resistencia el obtenido en probetas de control curadas a 20°C. El efecto de la temperatura tiene vital importancia a edades tempranas. Conforme pasa el tiempo, el efecto de la temperatura en la resistencia a compresión disminuye.

En la figura 8.54 se muestran estas estimaciones de evolución de la resistencia. Se ha tenido en cuenta el tipo de hormigón (E_a y S_{∞}) y el historial de temperaturas internas de la viga (figura 8.53) en el extremo

instrumentado de cada viga para la estimación de resistencia en vigas, y el historial de temperatura interna (figura 8.9) de probetas cúbicas de cada hormigón curadas a 20°C.

En este caso, durante los 4 primeros días, la resistencia en viga es superior o igual a la resistencia en probeta cúbica curada a 20°C. Esto se debe a que, pese a que la temperatura exterior media se sitúa alrededor de 5°C por debajo de la temperatura estándar, el desarrollo de temperatura interna de la viga en el proceso exotérmico del fraguado en una masa de hormigón considerable (la de la viga) compensa este escalón de la temperatura exterior. A partir de 4 días, la resistencia del hormigón de las vigas es menor que el de las probetas curadas a 20°C si bien el error de subestimación es muy pequeño.

Por tanto, en este caso, se pueden tomar como ciertos los valores de resistencia a compresión de probetas cúbicas curadas a 20°C sin incurrir en un error importante de sobreestimación de la resistencia a compresión, pese a que la temperatura exterior de curado de las vigas varía entre 10 y 19°C durante los ciclos día-noche.

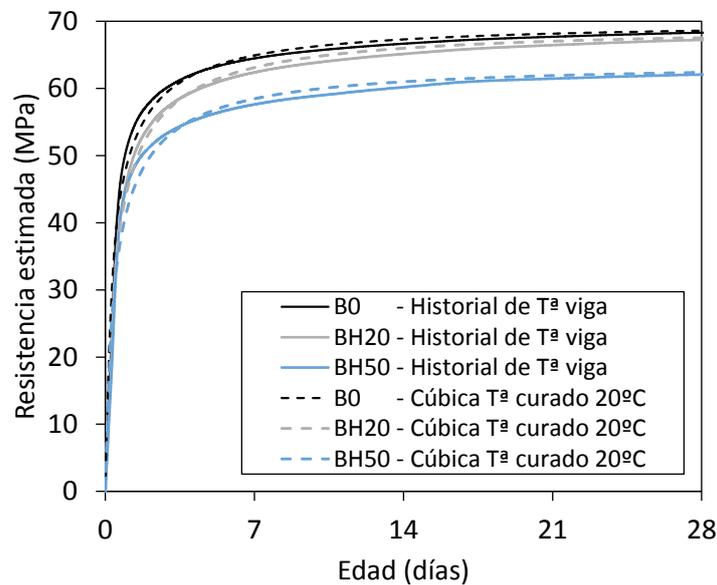


Figura 8.54. Evolución de la resistencia a compresión en vigas y probetas cúbicas (B0, BH20 y BH50)

8.5.4. Aplicación en vigas de sección doble T

Se ha estudiado la evolución de la resistencia a compresión del hormigón de cuatro vigas de 6,5 metros de longitud y sección doble T descrita en la figura 8.55. Dos de esas vigas se fabricado con hormigón C0 y otras dos con hormigón CH8.

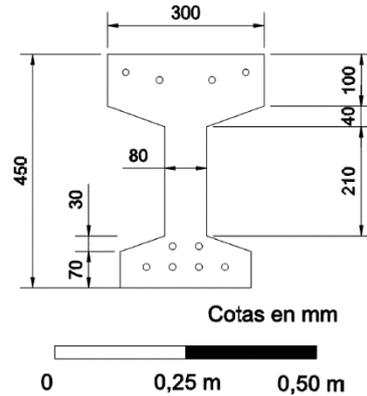


Figura 8.55. Sección de viga doble T

Las vigas se han instrumentado con sensores de temperatura internos. Para ello, antes del hormigonado, se han colocado los sensores utilizando las armaduras como puntos de sujeción del cable de los sensores de temperatura interna (figura 8.56).



Figura 8.56. Sensores de temperatura interna y externa

En las figuras 8.57 y 8.58 se muestran un esquema de colocación de los sensores. Una de las vigas de cada tipo de hormigón se instrumenta con 3 sensores de temperatura en distintas zonas de una misma sección cercana al centro (sección BB' y DD') con el fin de observar si existen muchas diferencias entre distintas zonas de una misma sección. En la otra viga de cada tipo de hormigón se ha instrumentado con un sensor de temperatura en una sección cercana al extremo de la viga (sección AA' y CC'), en la

zona que se prevé más fría, con el fin de observar la diferencia entre distintas zonas de la viga (zona central y extremo).

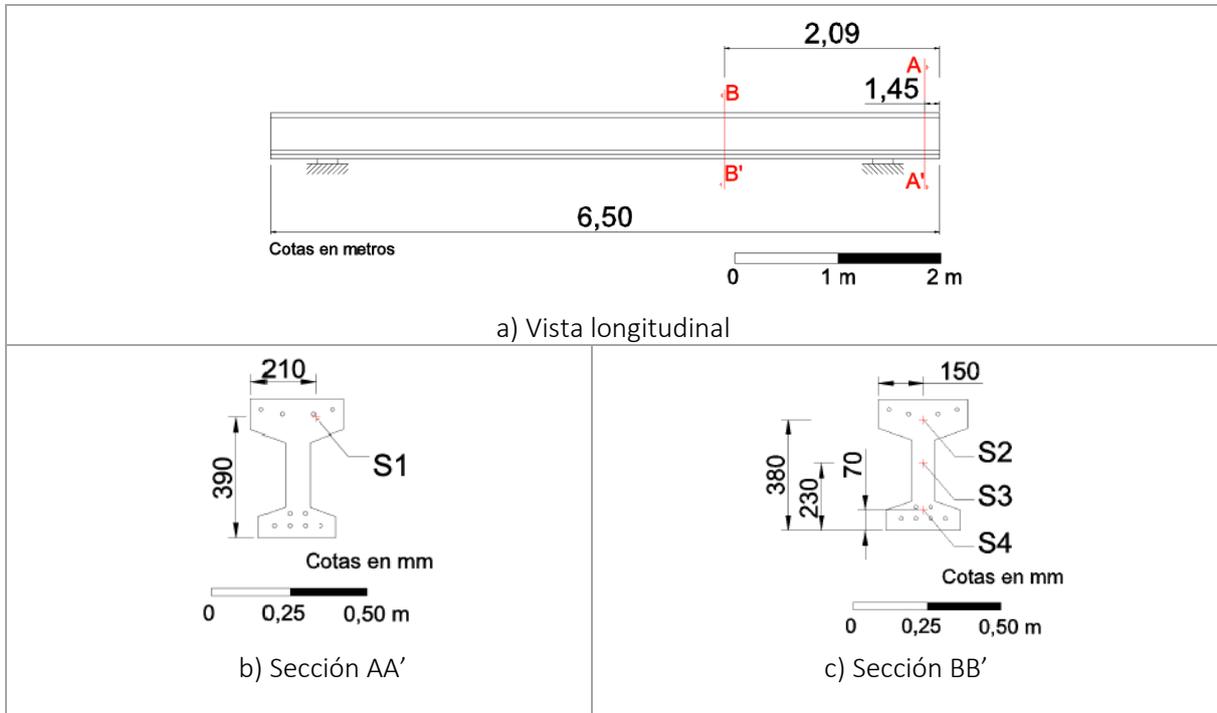


Figura 8.57. Esquemas de colocación de sensores en vigas con CO

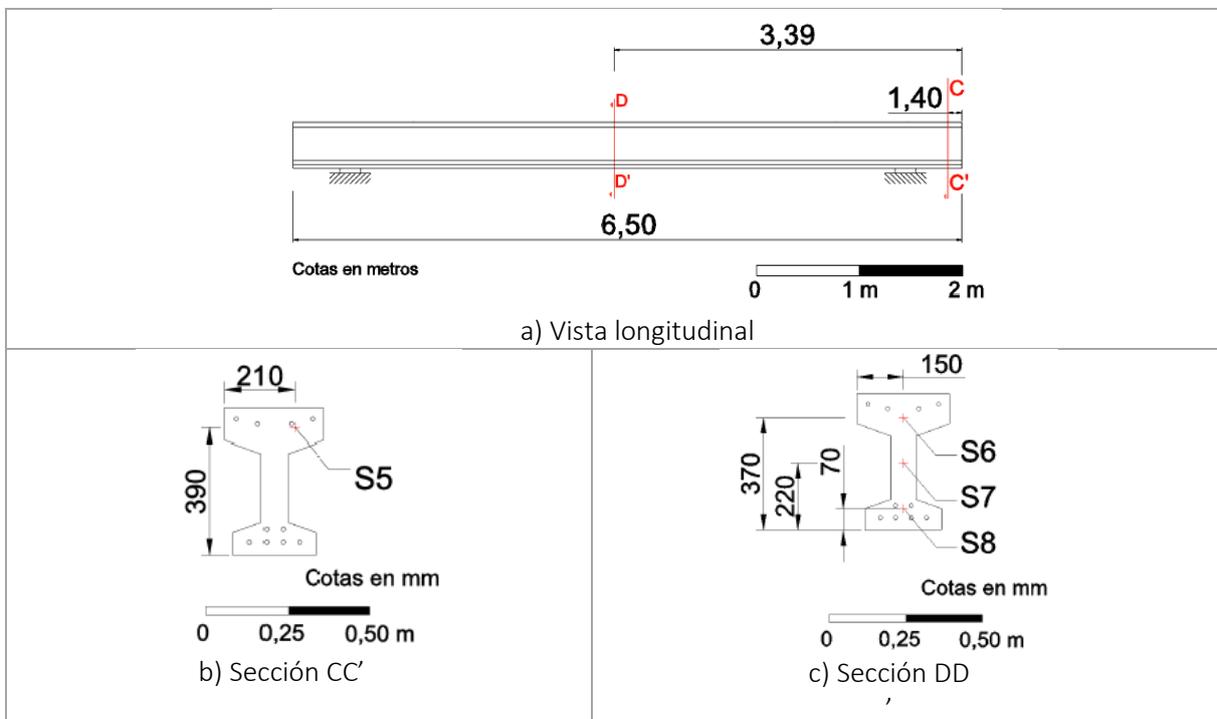


Figura 8.58. Esquemas de colocación de sensores en vigas con CH8

El historial de temperaturas internas de los distintos puntos instrumentados y la temperatura ambiente se muestran en las figuras 8.59 (para las vigas con hormigón C0) y 8.60 (para las vigas con hormigón CH8).

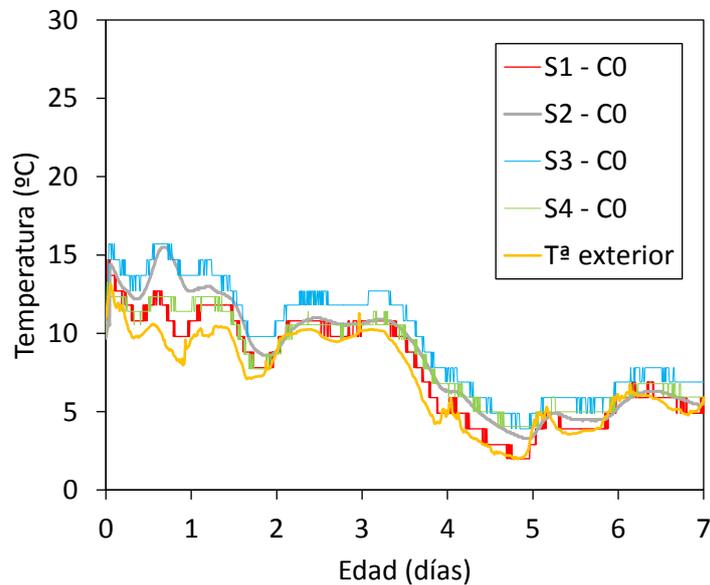


Figura 8.59. Historial de temperaturas en vigas con C0

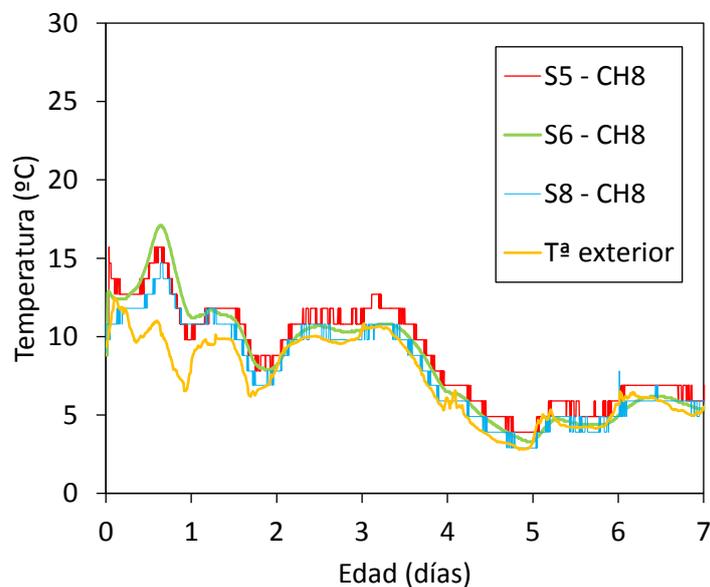


Figura 8.60. Historial de temperaturas en vigas con CH8

Igual que para el caso anterior y por el mismo motivo, se decide hacer la estimación de la resistencia a compresión utilizando la ecuación hiperbólica (2.7) y el índice de madurez $M=t_e \cdot T_r$. El parámetro "A" toma el valor calculado para el hormigón correspondiente a la estimación, al igual que el valor S_∞ , para temperatura media (20 °C).

En las figuras 8.61 y 8.62 se muestran las estimaciones de evolución de la resistencia a compresión del hormigón de cada uno de los puntos instrumentados en las vigas y la estimación de evolución de resistencia de probetas curadas a temperatura estándar.

Se observa que las diferencias de temperaturas entre distintos puntos de una misma viga no suponen grandes diferencias en la evolución de la resistencia (diferencias menores a 3 MPa). En la gráfica 8.55 se aprecia una pequeña diferencia entre la evolución de la resistencia en los extremos (más fríos y por tanto, con menor desarrollo de resistencia a edades tempranas) y la de los puntos centrales (mayor resistencia). En las vigas con CH8 apenas existe variación entre los resultados de los distintos puntos estudiados.

Cabe apuntar que existe una diferencia importante en la resistencia del hormigón de la viga en comparación con la de una probeta cúbica curada a 20°C. Si se toma como resistencia la obtenida mediante el ensayo de probetas curadas a temperatura estándar (20°C), se comete un error de sobreestimación de la resistencia importante tal y como se puede observar en las figuras 8.61 y 8.62.

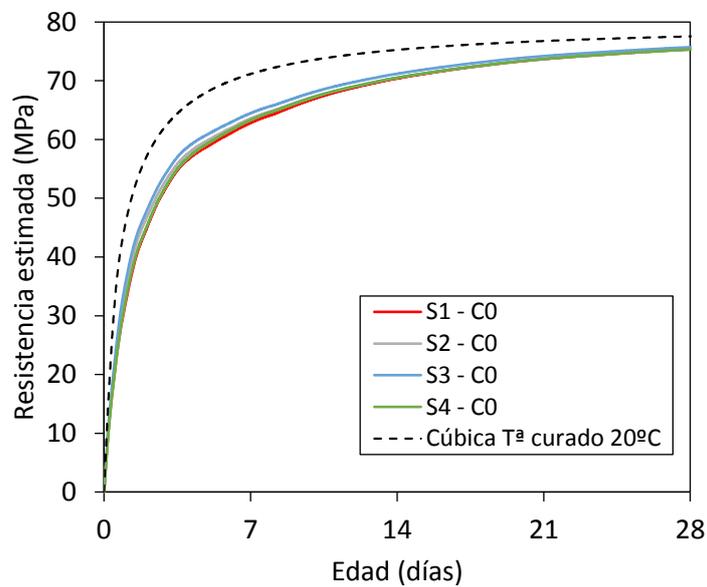


Figura 8.61. Evolución de la resistencia a compresión en vigas con CO

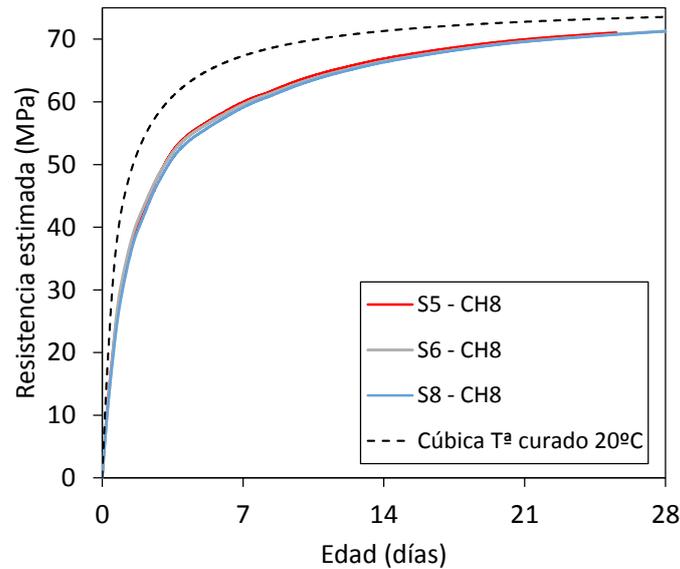


Figura 8.62. Evolución de la resistencia a compresión en vigas con CH8

En las figuras 8.63 y 8.64 se muestran los resultados de resistencia estimada de las vigas junto con los datos de resistencia de probetas cúbicas en los tres primeros días:

- Probetas cúbicas curadas a 20°C en la cámara climática de la fábrica de prefabricados y fabricadas con el hormigón de la misma amasada que las vigas.
- Probetas cúbicas curadas a 20°C en la cámara climática de laboratorio y fabricadas con una amasada de laboratorio.
- Además, se incluyen datos de resistencia de tres probetas curadas en el mismo ambiente que las vigas.

Las probetas curadas a la misma temperatura que la viga, adquieren una resistencia menor que el hormigón de la viga; este hecho era previsible, ya que se trata del mismo hormigón, sometido a un mismo historial de temperaturas exteriores, por lo que la viga, que tiene un mayor volumen de hormigón que una probeta cúbica, estará sometida a un historial de temperaturas internas más elevadas, debido al proceso exotérmico de fraguado del hormigón (a más volumen de hormigón, más temperatura interna).

En cuanto a la resistencia de las probetas curadas a 20°C: la resistencia de las probetas fabricadas con el hormigón de fábrica tienen resistencias ligeramente inferiores que las de laboratorio y ambos tipos presentan mayor resistencia que la estimada para el hormigón de las vigas.

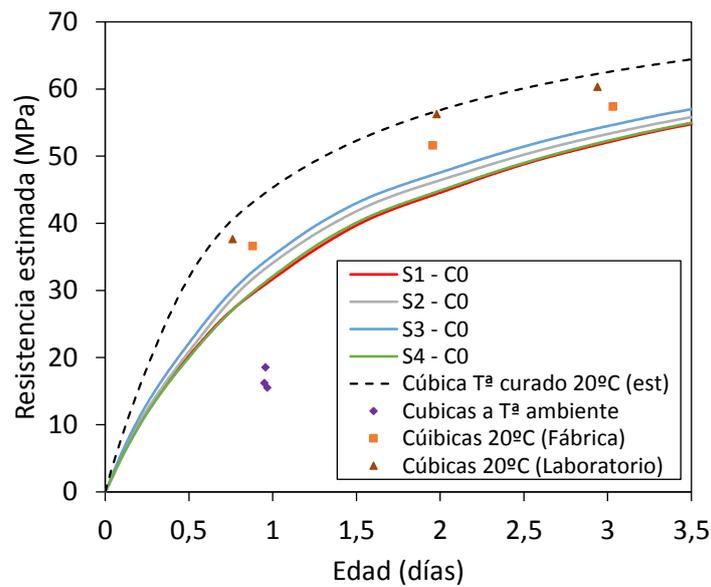


Figura 8.63. Resistencia a compresión en distintos ambientes y deferentes amasadas (C0)

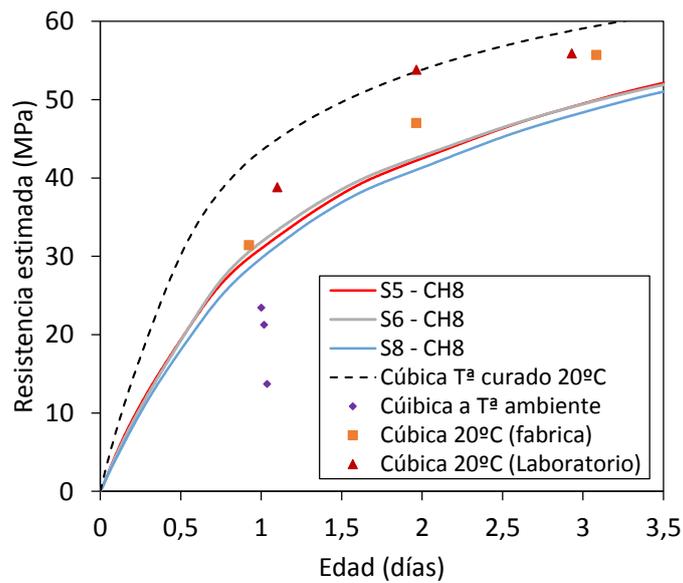


Figura 8.64. Resistencia a compresión en distintos ambientes y deferentes amasadas (CH8)

En la figura 8.65 se comparan los resultados de estimación de resistencia para las vigas de los dos hormigones. Se observa una diferencia apreciable en la evolución de la resistencia a compresión durante las primeras edades debido a la sustitución de un 8% de árido reciclado, aproximadamente un 10% de disminución de la resistencia.

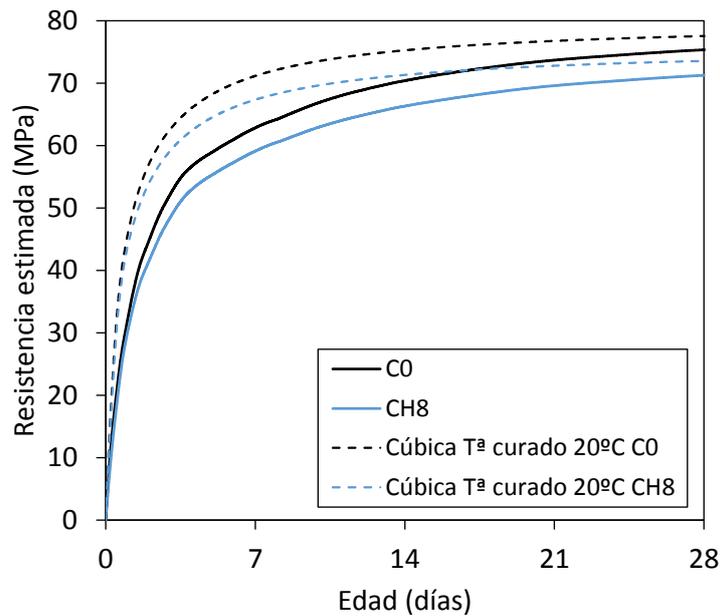


Figura 8.65. Comparativa de evolución de la resistencia en vigas con CO y CH8

De todo ello se puede extraer las siguientes conclusiones. Con un historial de temperaturas externas similar a las que han sido expuestas estas vigas, la resistencia del hormigón a edades tempranas es inferior a la de las probetas de control curadas a 20°C, por lo que tomar los resultados de las probetas curadas a temperatura estándar como válidos conlleva un error de sobreestimación que puede llegar a ser fatal.

La diferencia en la evolución de la resistencia entre distintas zonas de una misma viga de estas características no es significativa, si bien para piezas de mayor tamaño o con una sección más irregular, puede llegar a ser un factor a tener en cuenta.

La sustitución de 8% de árido natural por árido reciclado de hormigón fino y grueso influye en la evolución de la resistencia, si bien la disminución provocada no es mayor del 10%.

Los resultados obtenidos en laboratorio y en fábrica difieren ligeramente, tanto en el caso del hormigón de referencia como en el del hormigón con árido reciclado. Es necesario tener en cuenta este hecho a la hora de aplicar resultados de laboratorio a hormigones fabricados en otras instalaciones.

8.5.5. Resumen de análisis conjunto de campañas experimentales en fábrica

Analizando los resultados obtenidos en las tres campañas experimentales llevadas a cabo en fábricas de prefabricados, se llega a las siguientes conclusiones:

En las piezas prefabricadas estudiadas no hay grandes diferencias de evolución de la resistencia entre distintos puntos de una misma pieza.

Se han estudiado la evolución de las temperaturas internas y externas en distintas épocas del año:

- En verano, con temperaturas exteriores entre 15 y 25°C (apartado 8.3.2).
- En primavera, con temperaturas exteriores entre 10 y 20°C (apartado 8.3.3).
- En invierno, con temperaturas exteriores de entre 3 y 13°C (apartado 8.3.4).

En verano se puede tomar como resistencia del hormigón la obtenida con probetas cúbicas curadas a temperatura estándar. En primavera, la reacción exotérmica del fraguado del hormigón compensa la temperatura ambiente ligeramente inferior a la estándar, y no se producen grandes errores de sobrestimación de la resistencia. En invierno, con tiempo frío, dar como válidos los resultados de resistencia a compresión de probetas curadas a 20°C puede conllevar graves errores de sobrestimación de la resistencia a compresión.

Además, haciendo un análisis comparativo de los resultados obtenidos en hormigones con distintos porcentajes de árido reciclado, se concluye que las diferencias de resistencia debidas a las distintas temperaturas de curado en cámara y en obra, son similares en todos los hormigones, por lo que parece que el método de la madurez tiene la misma precisión para hormigones convencionales que para hormigones con áridos reciclados finos y gruesos de hormigón.

8.6. Influencia de los materiales reciclados en el cálculo de la Energía de activación. Propuesta de modificación de la ASTM C1074-11 para su aplicación en eco-hormigones con árido reciclado

8.6.1. Introducción y motivación de este estudio

En el cálculo de la “Energía de activación” propuesto por la ASTM C1074-11 [RN04], se utiliza un “mortero equivalente” en el que la cantidad de árido grueso se sustituye por árido fino equivalente según una relación definida en la norma: el cociente de árido grueso entre cemento debe ser igual que el cociente de árido fino del mortero equivalente entre cemento. Por tanto, según esta definición, el tipo de árido grueso no influye en la energía de activación; de ello se podría deducir que la energía de activación no varía al hacer una sustitución de parte del árido natural grueso por árido reciclado grueso.

Según esto, se podría llegar a la conclusión de que la ASTM C1074-11 [RN04] afirma que el uso de distintos porcentajes de sustitución de árido grueso natural por árido reciclado grueso no influye en la energía de activación.

Parece factible la posibilidad de que el árido reciclado grueso influya en la energía de activación ya que, en apartados anteriores, se ha observado como la sustitución parcial de árido reciclado fino y grueso sí afecta a la energía de activación. Por tanto, según la ASTM el hormigón B0 y un hormigón que, tomando como dosificación de referencia, tenga un 50% de sustitución de árido reciclado grueso, deberían tener la misma energía de activación, ya que el mortero equivalente con el que se puede calcular es el mismo. Para poder simular el efecto de los áridos reciclados en el cálculo de la energía de activación se calcula la energía de activación del mortero equivalente base (tal y como se define en la ASTM) y los morteros con porcentajes de sustitución de arena natural por arena reciclada igual al porcentaje total de árido reciclado sustituido en cada dosificación de hormigón: un hormigón de referencia B0 y dos hormigones con un 20% y 50% de árido reciclado grueso respectivamente. Este estudio tiene como objetivo comprobar la influencia (o independencia) del porcentaje de sustitución de árido reciclado en la energía de activación mediante la utilización de áridos reciclados finos en los morteros equivalentes, con el fin de ver si éstos influyen o no en la energía de activación. En el caso de que así sea, se procederá a proponer una adaptación de dicha norma para el cálculo de la energía de activación de hormigones con árido reciclado. Así mismo, otro de los objetivos de la presente investigación es estudiar la influencia de los áridos reciclados en el desarrollo de resistencia a compresión de los morteros autocompactantes, en función de la temperatura de curado.

8.6.2. Resultados y análisis

Como se ha descrito anteriormente en el capítulo 4, se han ensayado 3 probetas de mortero de cada temperatura, para cada una de las 6 edades de ensayo. Debido a que, cada probeta se ensaya a flexión y cada una de sus dos mitades se ensaya a compresión, se obtienen 6 datos de resistencia a compresión.

En la figura 8.66 se puede observar la evolución de la resistencia a compresión media en función de la temperatura de curado, para cada una de las dosificaciones. Cabe indicar que, para una misma dosificación, pese a que el desarrollo de resistencia es mayor en las probetas de 45°C, la resistencia a 28 días es menor que la resistencia de las probetas de 20°C y de 5°C. Si se compara la resistencia a 28 días de las probetas de 5°C con las de 20°C, se observa que, para el mortero MEO, la resistencia a compresión es prácticamente igual para curado de 5°C que para curado de 20°C. Sin embargo, conforme se aumenta el porcentaje de sustitución de árido reciclado, la diferencia entre ambos va aumentando, dando lugar a valores de resistencia de un 5% mayores en las probetas de mortero de MEH50 curadas a 5°C (tomando como referencia, la resistencia a 28 días de mortero MEH50, con curado a 20°C).

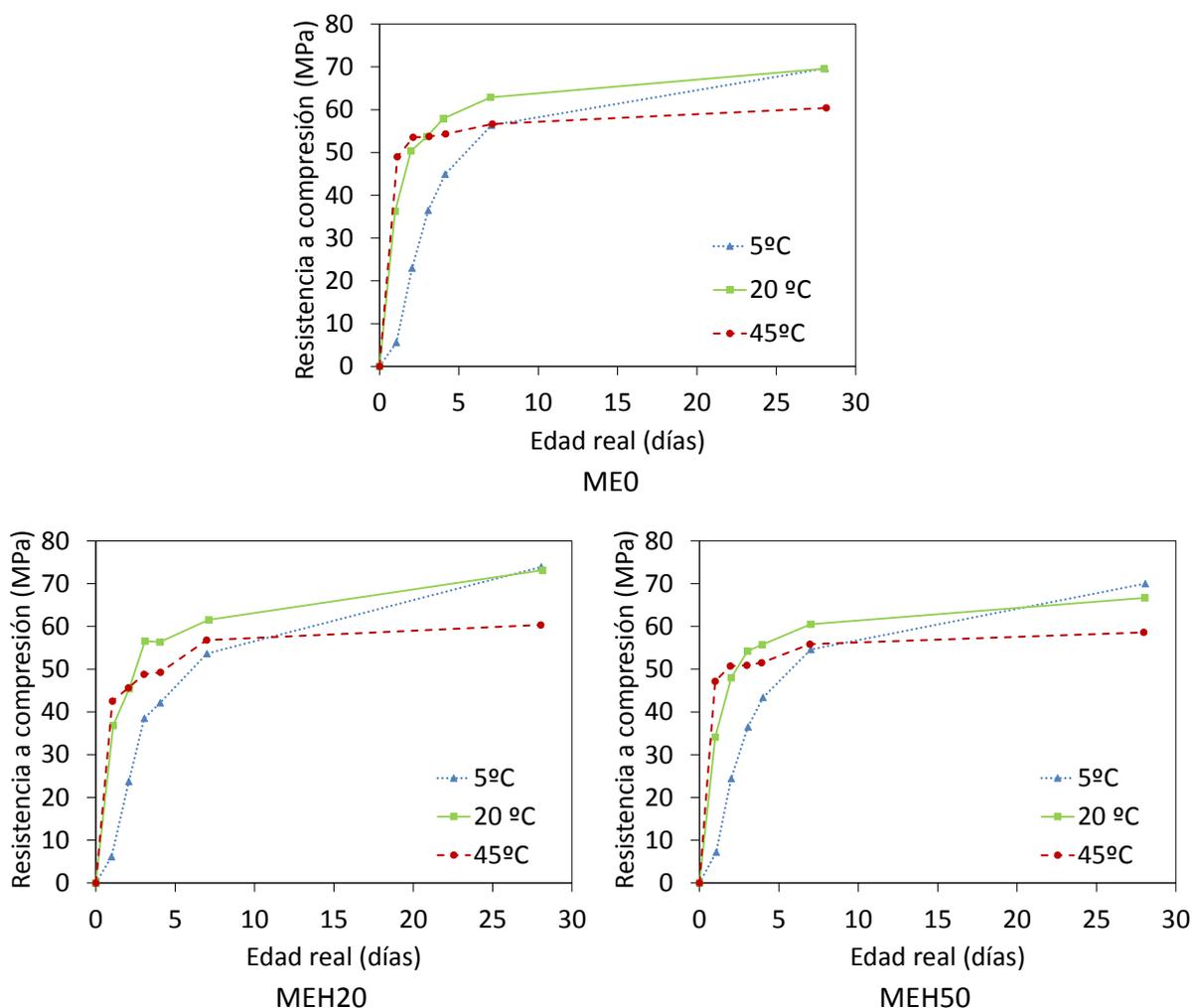


Figura 8.66. Evolución de la resistencia a compresión en función de la temperatura de curado

Hay tres factores que se varían al hacer sustituciones de árido reciclado, las cuales pueden afectar a la resistencia a compresión y a la energía de activación. Estos factores clave son: la variación del a/c

efectiva debido a la mayor absorción de los áridos, la posible presencia de partículas de cemento sin hidrantes en el árido reciclado de hormigón utilizado y, por último pero no menos importante, la menor resistencia de los áridos reciclados. Los dos primeros factores nombrados (menor a/c efectiva y partículas de cemento sin hidratar) pueden dar lugar a un aumento de la resistencia a compresión conforme se aumenta la cantidad de árido reciclado. Por el contrario, la menor resistencia de los áridos reciclados, puede producir un efecto negativo en la resistencia a compresión. Por ello, es posible que el efecto combinado de estos tres factores produzca resultados que a priori puedan parecer anómalos, como que con un 20% de sustitución de árido reciclado, la resistencia sea mayor que en el mortero de referencia (ME0) y con un 50% de sustitución, la resistencia sea menor; Es decir, puede que, como se observa en este estudio, la resistencia a compresión aumente con un cierto porcentaje de sustitución y, por el contrario, con un porcentaje mayor, la resistencia se vea mermada (para temperaturas de curado de 5°C y de 20°C. Para 45°C no se observa variación estimable). Este hecho lo podemos observar en la figura 8.67.

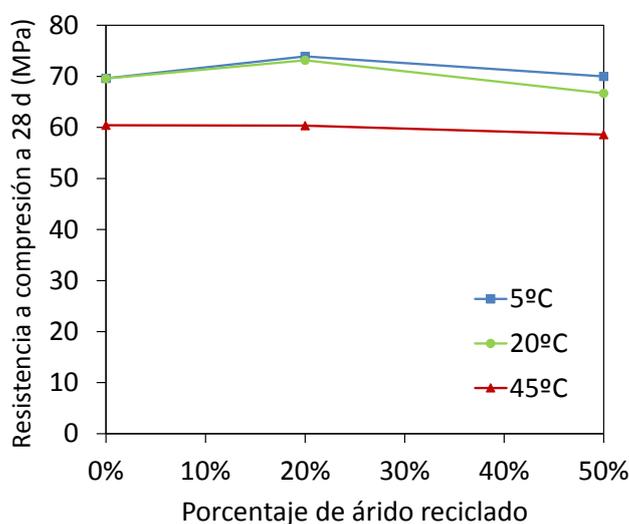


Figura 8.67. Resistencia a compresión a 28 días en función del % de árido reciclado para cada Tª

Con todos los datos obtenidos se ha desarrollado el cálculo de la energía de activación para cada una de las dosificaciones estudiadas, conforme a la ASTM C1074-11 [RN04]. En la figura 8.68 se representan los valores de energía de activación obtenidos para cada una de las dosificaciones estudiadas. Cabe destacar que se observa una tendencia de variación de la energía de activación en función del porcentaje de árido reciclado. Esto se podía esperar ya que, al igual que ocurre con la resistencia a compresión, hay dos factores que pueden acelerar el desarrollo de las propiedades mecánicas a primeras edades y, por tanto, hacer aumentar la energía de activación. Uno de estos factores es la variación del a/c efectiva (al aumentar el porcentaje de árido reciclado, aumenta la absorción de los áridos, durante el amasado queda una menor cantidad de agua disponible para reaccionar con el cemento, es decir, los áridos reciclados disminuyen la relación a/c efectiva). Otro de los posibles factores que puede producir un aumento de la energía de activación al aumentar la cantidad de árido reciclado, es la posible presencia de partículas de cemento sin hidratar en el árido reciclado de hormigón.

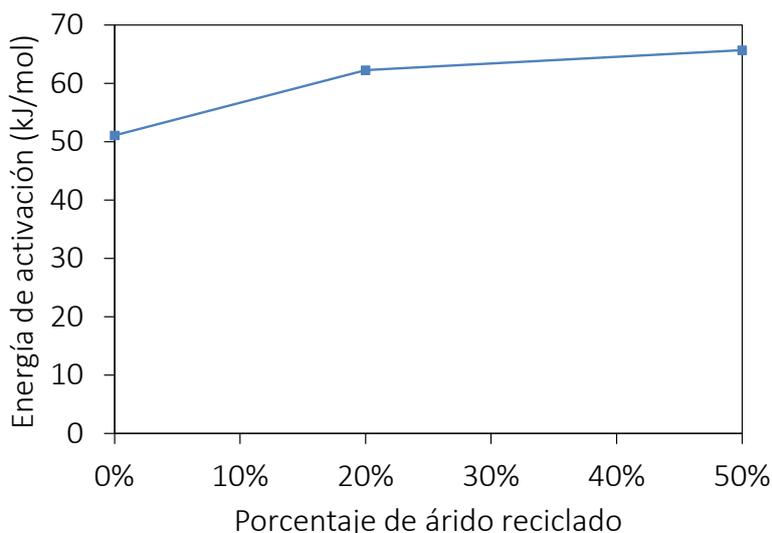


Figura 8.68. Energía de activación en función del porcentaje de árido reciclado.

Lo verdaderamente importante de estas variaciones de la energía de activación que se han observado es que ponen de manifiesto la influencia del árido reciclado en la energía de activación y, por tanto, la necesidad de hacer modificaciones en el procedimiento de cálculo de la energía de activación mediante el mortero equivalente propuesto por la ASTM C1074-11 [RN04], en el caso de que el hormigón del que se pretende calcular la energía de activación contenga áridos reciclados gruesos, ya que, aplicando la norma sin atender a las particularidades de los áridos reciclados, se calcularía erróneamente la energía de activación. Esta energía de activación de un hormigón con áridos reciclados gruesos sería la misma que la del mismo hormigón con áridos naturales si se aplica el método del mortero equivalente y eso no es cierto, ya que se ha comprobado que el árido reciclado influye en el desarrollo de la resistencia y en la energía de activación. Por ello, se proponen dos posibles opciones para evitar este error: o bien se calcula la energía de activación con probetas de hormigón y prohibiendo el uso del método de mortero equivalente para el cálculo de energía de activación de hormigones con árido reciclado, o bien se hace una adaptación del método del mortero equivalente, en cuyo caso se propone la siguiente adaptación de la ASTM C1074-11 [RN04], para su aplicación en hormigones con árido reciclado:

Para el cálculo de la energía de activación en eco-hormigones con árido reciclado mediante el método de mortero equivalente, debido a las particularidades de los áridos reciclados, es necesario sustituir, en la arena total del mortero equivalente, una parte de esa arena natural, por arena reciclada (en la proporción que figure en la dosificación del hormigón con respecto a la cantidad total de árido grueso de la mezcla). Además será preciso hacer una corrección del agua/cemento efectiva, añadiendo una cantidad de agua desde un 70% [VELA15] hasta un 100% [FONS11, MART12, MEDI14] de la capacidad de absorción extra que aportan la utilización de áridos reciclados, o bien presaturar los áridos reciclados antes de la amasada [GONZ02]. Para que esta corrección se pueda llevar a cabo es necesario que el árido reciclado fino utilizado en el mortero equivalente proceda de la misma partida de material que el árido reciclado grueso del hormigón objeto de estudio o bien tenga, al menos, una absorción y una calidad similar.

8.7. Conclusiones parciales de este capítulo

Para porcentajes iguales o mayores del 20% se observa que la sustitución de árido reciclado de hormigón fino y grueso afecta a la energía de activación del hormigón, haciendo que esta aumente con la cantidad de árido reciclado. Con porcentajes bajos (8%) no se observan variaciones significativas.

En todos los hormigones, vibrados y autocompactantes (a excepción del BH50), si se toma únicamente el rango de temperaturas bajas, la energía de activación es superior a la calculada con las tres temperaturas según la ASTM. Por el contrario, para temperaturas altas, la energía de activación es menor que la calculada según criterios de la ASTM. En 10 de 11 hormigones estudiados, se observa que, para un rango de temperaturas bajas la energía de activación es mayor que la calculada según las directrices de la ASTM con las tres temperaturas que hemos tomado (5°C, 20°C y 45°C). La única excepción hallada es la del hormigón autocompactante con un 50% de árido reciclado (BH50), donde la energía de activación para temperaturas bajas es ligeramente inferior.

Por tanto, parece razonable recomendar que se tenga en cuenta esta variación de la energía de activación en caso de que el hormigón vaya a estar sometido a temperaturas muy altas (o muy bajas) de forma constante, si bien lo ideal es que la energía de activación se calcule con tres temperaturas, siendo la temperatura intermedia similar a la temperatura media a la que estará sometido el hormigón.

Existen una única relación entre S/S_{∞} y la madurez (o la edad equivalente) independientemente de la cantidad de árido reciclado sustituido; el porcentaje de sustitución no influye en las pequeñas dispersiones observadas.

Con la ecuación hiperbólica (2.7), se obtienen mejores resultados que con la exponencial (2.2) tanto en el caso de tomar el índice de madurez igual al factor tiempo-temperatura como en el caso de calcularlo con la ecuación 8.6 que aplica la fórmula de Arrhenius para el cálculo de la edad equivalente.

En la estimación de la resistencia con la ecuación hiperbólica (2.7), tomando como índice de madurez el calculado mediante el producto de temperatura de referencia por edad equivalente según ecuación de Arrhenius (2.5); menos de un 3% de las estimaciones exceden ligeramente el 10% de error en el caso de los hormigones autocompactantes. En el caso de los hormigones vibrados, menos de un 14% de las estimaciones tienen un error mayor al 10%; menos de un 5% de las estimaciones tienen un error ligeramente superior al 20% y solo un 9% de las estimaciones tienen un error entre el 10% y el 20%.

La sustitución parcial de cemento por cenizas de biomasa (que implica una disminución del cemento), produce una disminución de la energía de activación. En hormigones con estas cenizas de biomasa, para altas temperaturas, no se cumple la hipótesis de madurez de que, para un determinado hormigón, a igual madurez (o igual edad equivalente), igual ratio S/S_{∞} .

Se observa que con un 15% de sustitución de cemento por cenizas de biomasa los parámetros "k" y "A" apenas varían. Por el contrario, con un 30% de sustitución, la variación es mucho mayor. Mientras que con un 15% de sustitución se podrían utilizar los parámetros del hormigón de referencia sin tener errores excesivos, con un 30% no serían aplicables.

La energía de activación aumenta al aumentar la relación agua/cemento. Una disminución de la relación agua/cemento de 11% (de 0,45 a 0,40) puede suponer una disminución de la energía de activación en torno a 18%. Si se desea aplicar el método de la madurez en una obra o en una planta de prefabricados, es necesario que se tenga en cuenta la posible variabilidad de la relación agua /cemento debido al desconocimiento de la humedad exacta de los áridos en planta.

Se ha observado como ciertas variaciones en la composición del hormigón producen variaciones en la energía de activación:

- Al aumentar la cantidad de sustitución de árido natural por árido reciclado (fino y grueso) se observa un aumento de la energía de activación y una disminución de la densidad media del hormigón.
- Al sustituir parte del cemento por cenizas de biomasa (y por tanto disminuir la cantidad de cemento) se observa una disminución de la energía de activación.
- Con aumento de la relación agua/cemento se ha observado un aumento de la energía de activación. Este hecho se ha observado comparando los resultados de tres hormigones con la misma cantidad de cemento, por tanto, se ha variado únicamente la cantidad de agua efectiva. Se podría decir que con un aumento del agua efectiva se observa un aumento de la energía de activación.

Por tanto, tres variables importantes parecen ser: la densidad del hormigón, la cantidad de cemento y el agua efectiva. Se propone una formulación simple para la estimación de la energía de activación mediante la ecuación 8.2.

Los resultados apuntan a que parece que es posible hacer una estimación de la energía de activación teniendo en cuenta estos parámetros básicos (la densidad del hormigón, la cantidad de cemento y el agua efectiva), si bien para proponer una fórmula empírica con valores de α , β y γ fijados, sería necesario desarrollar un extenso proyecto en el que se estudien estas y otras variables de una cantidad considerable de hormigones en los que se varíen estas propiedades.

En cuanto a los resultados obtenidos en las tres campañas experimentales llevadas a cabo se concluye que, en las piezas prefabricadas estudiadas no hay grandes diferencias de evolución de la resistencia entre distintos puntos de una misma pieza, si bien para piezas de mayor tamaño o con una sección más irregular, puede llegar a ser un factor a tener en cuenta.

En invierno, con tiempo frío, dar como válidos los resultados de resistencia a compresión de probetas curadas a 20°C puede conllevar graves errores de sobreestimación de la resistencia a compresión. Los errores cometidos en los hormigones con árido reciclado son similares a los hallados en los hormigones de referencia; por tanto no es necesario tener especiales consideraciones a la hora de aplicar el método de la madurez en hormigones con árido reciclado fino y grueso de hormigón.

En cuanto al estudio de la aplicabilidad de la definición de mortero equivalente a hormigones con árido reciclado, se concluye que el método de mortero equivalente es desaconsejable para el cálculo de la energía de activación en hormigones con árido reciclado, ya que no tiene en cuenta las particularidades del árido reciclado y, en particular, la de la diferencia de absorción de dichos áridos. Por ello, se recomienda utilizar la adaptación propuesta en esta investigación del método del mortero equivalente para hormigones con árido reciclado, o bien, proceder al cálculo de la energía de activación con probetas de hormigón en lugar de recurrir al método del mortero equivalente.

Capítulo 9. Estimación de la resistencia a compresión con métodos combinados de END

Capítulo 9. Estimación de la resistencia a compresión con métodos combinados de ENds

9.1. Planteamiento y bases teóricas

Existen múltiples modelos para estimar la resistencia a compresión con ensayos no destructivos. En la tabla 9.1 se muestran algunos de los modelos más habituales, ya citados en el capítulo 2 de la presente tesis, en los que se utilizan la velocidad de ultrasonidos, índice de rebote, edad y agua/cemento.

Tabla 9.1. Modelos de estimación de la resistencia a compresión más habituales

Referencia	Modelo	Correlación propuesta
-	M _{R0}	$\hat{s} = a_0 + a_1 \cdot UPV$
RILEM NDT 1 FERN01	M _{R1}	$\hat{s} = a_1 \cdot UPV^{a_2}$
	M _{R2}	$\hat{s} = a_1 \cdot e^{a_2 \cdot UPV}$
	M _{R3}	$\hat{s} = a_0 + a_1 \cdot UPV^2 + a_2 \cdot UPV$
RAMY96 TANI84	M _{R4}	$\hat{s} = a_0 + a_1 \cdot UPV + a_2 \cdot R$
HOBB07	M _{R5}	$\hat{s} = a_0 + a_1 \cdot UPV^2 + a_2 \cdot UPV + a_3 \cdot R$
HUAN11	M _{R6}	$\hat{s} = a_0 + a_1 \cdot UPV^3 + a_2 \cdot R^2$
	M _{R7}	$\hat{s} = a_0 + a_1 \cdot UPV + a_2 \ln(t) + a_3 \cdot AC^{-0,5} + a_4 \cdot R^2$

donde:

UPV= velocidad de ultrasonidos (m/s)

R = índice de rebote

AC= agua/cemento

t = edad (días)

\hat{s} = resistencia estimada (MPa)

En estos modelos no se tiene en cuenta la temperatura de curado ni el historial de temperaturas internas, dos variables de vital importancia para la estimación de la resistencia a compresión a edades tempranas con ensayos no destructivos. En el capítulo 7 se ha estudiado la influencia de la temperatura en las correlaciones entre ensayos no destructivos (sobre todo UPV) y la resistencia a compresión. Se ha concluido que la temperatura de curado influye en gran medida en la correlación existente en velocidad de ultrasonidos (UPV) y resistencia a compresión, sobre todo, a edades tempranas. Por ello, parece clave la utilización de la edad equivalente en vez de la edad real, para tener en cuenta el efecto de la temperatura en las correlaciones con ensayos no destructivos.

Otro de los factores analizados en el capítulo 7 es el porcentaje de árido reciclado sustituido. Éste influye en la resistencia a compresión y en su relación con ensayos no destructivos. A mayor cantidad de árido reciclado sustituido, menor es la densidad del hormigón y menor es también la resistencia a compresión correspondiente a una velocidad de ultrasonidos determinada.

Así mismo, la cantidad de cemento sustituido por cenizas de biomasa también influye en dichas correlaciones. A mayor cantidad de cenizas de biomasa (y por tanto, menor cantidad de cemento), menor resistencia a compresión correspondiente a una misma velocidad de ultrasonidos.

También cabe apuntar que el poder cementante de las cenizas depende de la temperatura de curado, tal y como se demuestra en el capítulo 5 de la presente tesis.

Teniendo en cuenta estos hechos, se proponen los modelos de estimación de la resistencia a compresión que figuran en las tablas 9.2 y 9.3.

En la tabla 9.2 se pueden observar cuales han sido los factores que se han tenido en cuenta en la configuración de cada uno de los nuevos modelos. Existen otras muchas configuraciones posibles pero después de hacer unas pruebas iterativas, se han escogido 10 modelos nuevos, numerados con los subíndices N1 a N10.

Los dos primeros modelos (M_{N1} y M_{N2}) corresponden a una modificación directa del propuesto por Huang en 2011 [HUAN11], M_{R8} , en el que se cambia la edad real por la edad equivalente con el fin de que se tenga en cuenta la temperatura de curado y el historial de temperaturas. Se utilizan dos posibles definiciones de edad equivalente: la propuesta por Hansen y Pedersen (para M_{N1}) mediante la ecuación de Arrhenius [HANS77] (ecuación 2.5), y la extraída de la definición del índice de madurez como factor tiempo-temperatura (para M_{N2}) propuesta por Saul (ecuación 2.3) [SAUL51] y la ecuación 2.4 de la definición de la edad equivalente con este factor tiempo temperatura [RAST54].

Debido a los análisis de capítulos anteriores, se proponen nuevas configuraciones de modelos (de M_{N3} a M_{N10}) que incluyen dos variables nuevas:

- La relación agua/cemento modificada (ecuación 9.1), que tiene en cuenta la cantidad de filler y la cantidad de cenizas (éstas últimas en función de la temperatura de curado debido a la influencia de la temperatura en el desarrollo de su poder cementante).
- Como ya se ha comentado anteriormente, la cantidad de árido reciclado y por ende la densidad, influye en las correlaciones entre ensayos no destructivos y resistencia a compresión, por ello, es un factor que también se debe tener en cuenta.

Estas nuevas configuraciones siguen la siguiente lógica de construcción (tabla 9.2):

- Debido al buen ajuste lineal de la relación UPV y resistencia a compresión que se ha observado en capítulos anteriores, se toma como primer término de configuración de los nuevos modelos un término en el que se multiplica un coeficiente (a_1) por la velocidad de ultrasonidos [$a_1 \cdot UPV$].
- En el segundo término interviene el factor de la edad en función de la temperatura de curado y temperatura interna [$a_2 \cdot \ln(\text{edad equivalente})$]. Un modelo impar y su modelo siguiente par, solo se diferencian en la definición de la edad equivalente: En los modelos impares, t_e es la edad equivalente calculada con la ecuación de Arrhenius (ecuación 2.5) [$a_2 \cdot \ln(t_e)$]. En los modelos con número par, se toma como edad equivalente el cociente del factor tiempo-temperatura

dividido por la temperatura de referencia (ecuación 2.4) $[a_2 \cdot \ln(\frac{FTT}{T_r})]$. Se supone $T_0=0$, valor recomendado por la ASTM para cemento CEM1.

- En el tercer término interviene el producto del factor AC' (ecuación 9.1) por densidad $[-a_3 \cdot AC' \cdot \rho]$.
- El cuarto término, si lo hubiere, añade el factor "índice de rebote" $[+a_4 \cdot R^2]$
- El quinto término, si lo hubiere, añade un término independiente $[-a_0]$

Tabla 9.2. Configuración de nuevos modelos

	$a_1 \cdot UPV$				
	$a_3 \cdot (AC)^{-0.5} + a_4 \cdot R^2 + a_0$	$-a_3 \cdot AC' \cdot \rho$			
		$a_4 \cdot R^2 = 0$		$+a_4 \cdot R^2$	
		$a_0 = 0$	$-a_0$	$a_0 = 0$	$-a_0$
$a_2 \cdot \ln(t_e)$	M_{N1}	M_{N3}	M_{N5}	M_{N5}	M_{N7}
$a_2 \cdot \ln(\frac{FTT}{T_r})$	M_{N2}	M_{N4}	M_{N6}	M_{N6}	M_{N8}

donde:

UPV= velocidad de ultrasonidos (m/s)

R = índice de rebote

AC= agua/cemento

AC'= agua/cemento modificada (ecuación 9.1)

t = edad (Días)

t_e = edad equivalente (ecuación 2.5) (días)

ρ = densidad (Kg/m³)

\hat{s} = resistencia estimada (MPa)

FTT= Factor tiempo-temperatura o índice de madurez "M" (ecuación 2.3) (°C·días)

T_r = temperatura de referencia (°C)

T= temperatura de curado (°C)

$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, k_0, k_1$ = coeficientes de ajuste con unidades congruentes con la estimación.

$$AC' = \frac{\text{Agua total añadida}}{\text{cemento} + k_0 \cdot \text{cenizas} \cdot \frac{T}{20} + k_1 \cdot \text{filler}} \quad (9.1)$$

Los nuevos modelos de estimación propuestos se resumen en la tabla 9.3. Otras posibles configuraciones de modelos serían las resultantes de tomar como base los nuevos modelos propuestos

y sustituir su primer término $[a_1 \cdot UPV]$ de correlación lineal con la velocidad de ultrasonidos por otras correlaciones con ultrasonidos como la exponencial o la potencial. Mediante del análisis de los resultados se concluirá si es necesario desarrollar estos nuevos variantes de modelos de estimación.

Tabla 9.3. Modelos de estimación de la resistencia a compresión propuestos

Referencia	Modelo	Correlación propuesta
	M _{N1}	$\hat{s} = a_1 \cdot UPV + a_2 \ln(t_e) + a_3 \cdot AC^{-0.5} + a_4 \cdot R^2 + a_0$
	M _{N2}	$\hat{s} = a_1 \cdot UPV + a_2 \ln\left(\frac{FTT}{T_r}\right) + a_3 \cdot AC^{-0.5} + a_4 \cdot R^2 + a_0$
	M _{N3}	$\hat{s} = a_1 \cdot UPV + a_2 \ln(t_e) - a_3 \cdot AC' \cdot \rho$
	M _{N4}	$\hat{s} = a_1 \cdot UPV + a_2 \ln\left(\frac{FTT}{T_r}\right) - a_3 \cdot AC' \cdot \rho$
	M _{N5}	$\hat{s} = a_1 \cdot UPV + a_2 \ln(t_e) - a_3 \cdot AC' \cdot \rho + a_0$
	M _{N6}	$\hat{s} = a_1 \cdot UPV + a_2 \ln\left(\frac{FTT}{T_r}\right) - a_3 \cdot AC' \cdot \rho + a_0$
Presente tesis	M _{N7}	$\hat{s} = a_1 \cdot UPV + a_2 \ln(t_e) - a_3 \cdot AC' \cdot \rho + a_4 \cdot R^2$
	M _{N8}	$\hat{s} = a_1 \cdot UPV + a_2 \ln\left(\frac{FTT}{T_r}\right) - a_3 \cdot AC' \cdot \rho + a_4 \cdot R^2$
	M _{N9}	$\hat{s} = a_1 \cdot UPV + a_2 \ln(t_e) - a_3 \cdot AC' \cdot \rho + a_4 \cdot R^2 + a_0$
	M _{N10}	$\hat{s} = a_1 \cdot UPV + a_2 \ln\left(\frac{FTT}{T_r}\right) - a_3 \cdot AC' \cdot \rho + a_4 \cdot R^2 + a_0$

Los modelos M_{N3} y M_{N4} no utilizan los datos de índice de rebote, únicamente se utilizan los datos de velocidad de ultrasonidos, edad equivalente (con la definición correspondiente), agua añadida, cemento, cenizas, filler y densidad del hormigón.

Los modelos M_{N5} y M_{N6} tienen la misma configuración que los M_{N3} y M_{N4} pero añadiéndole un coeficiente como término independiente.

Los modelos de M_{N7} a M_{N10} son similares a los modelos de M_{N3} a M_{N6} (respectivamente), en los que se ha añadido un nuevo factor, el índice de rebote.

9.2. Resultados obtenidos y análisis

9.2.1. Resultados y análisis utilizando todos los datos para calibración

Se han analizado los datos de un total de 11 hormigones distintos. Se han adquirido los datos necesarios para aplicar los distintos modelos en todas y cada una de las probetas estudiadas. Cada valor de estudio es el resultante de la media de los valores de tres probetas curadas en idénticas condiciones. Se han ensayado probetas a distintas edades. A cada edad se han ensayado probetas curadas bajo temperaturas distintas (5°C, 20°C y 45°C): por ejemplo, para un cierto hormigón, a 2 días se ensayan un total de 9 probetas, 3 curadas a 5°C, 3 a 20°C y otras 3 a 45°C. Cada tres probetas de un hormigón determinado, curadas a una temperatura determinada y ensayadas a una edad determinada se obtiene un valor de estudio o dato de estudio.

Se han desestimado los datos con edad equivalente (ecuación 2.5) menor de 1 día. Descartando estos valores, se tiene un total de 181 datos de estudio.

Cada uno de los 181 “datos de estudio” se puede considerar un vector que contiene la siguiente información (valores medios):

- Denominación del hormigón
- Energía de activación del hormigón
- Edad real de ensayo
- Resistencia a compresión real
- Velocidad de ultrasonidos
- Índice de rebote
- Temperatura de curado
- Agua efectiva (por m³ de hormigón)
- Agua añadida total (por m³ de hormigón)
- Cemento (por m³ de hormigón)
- Cenizas (por m³ de hormigón)
- Filler (por m³ de hormigón)
- Cantidad de árido reciclado (por m³ de hormigón)
- Densidad media del hormigón endurecido (Kg/m³)
- Madurez, Factor tiempo-temperatura según historial de temperaturas internas

Para evitar repetir la leyenda en cada una de las gráficas, en la figura 9.1 se muestra la leyenda que será aplicable para todas las gráficas de comparativa de la estimación de la resistencia a compresión con su valor real (figuras 9.2 a 9.6).

<u>Tª de curado</u>	<u>Hormigón</u>		
▲ 5 °C	■ CO	■ CO-1	■ B0
■ 20°C	■ CH8	■ CO-2	■ BH20
● 45°C	■ CH20	■ CC15	■ BH50
	■ CH31	■ CC30	

Figura 9.1. Leyenda de gráficas comparativas de estimación de resistencia frente a resistencia real

En la figura 9.2 se muestran los resultados de estimación de los primeros cuatro modelos de referencia (M_{R0} a M_{R3}), en los cuales, solo se utiliza como dato de entrada la velocidad de ultrasonidos (UPV). Se observa que los resultados de estimación no son muy buenos y que existe una cierta segmentación según el tipo de hormigón y dentro de cada hormigón, según la temperatura de curado. Teniendo en cuenta los resultados de capítulos anteriores, era previsible que ocurriese esto, ya que en dichos capítulos se ha observado que tanto los materiales reciclados como la temperatura de curado y la relación agua/cemento influyen en las correlaciones entre velocidad de ultrasonidos y resistencia a compresión; no tener en cuenta estas influencias produce el efecto que se observa en la figura 9.2.

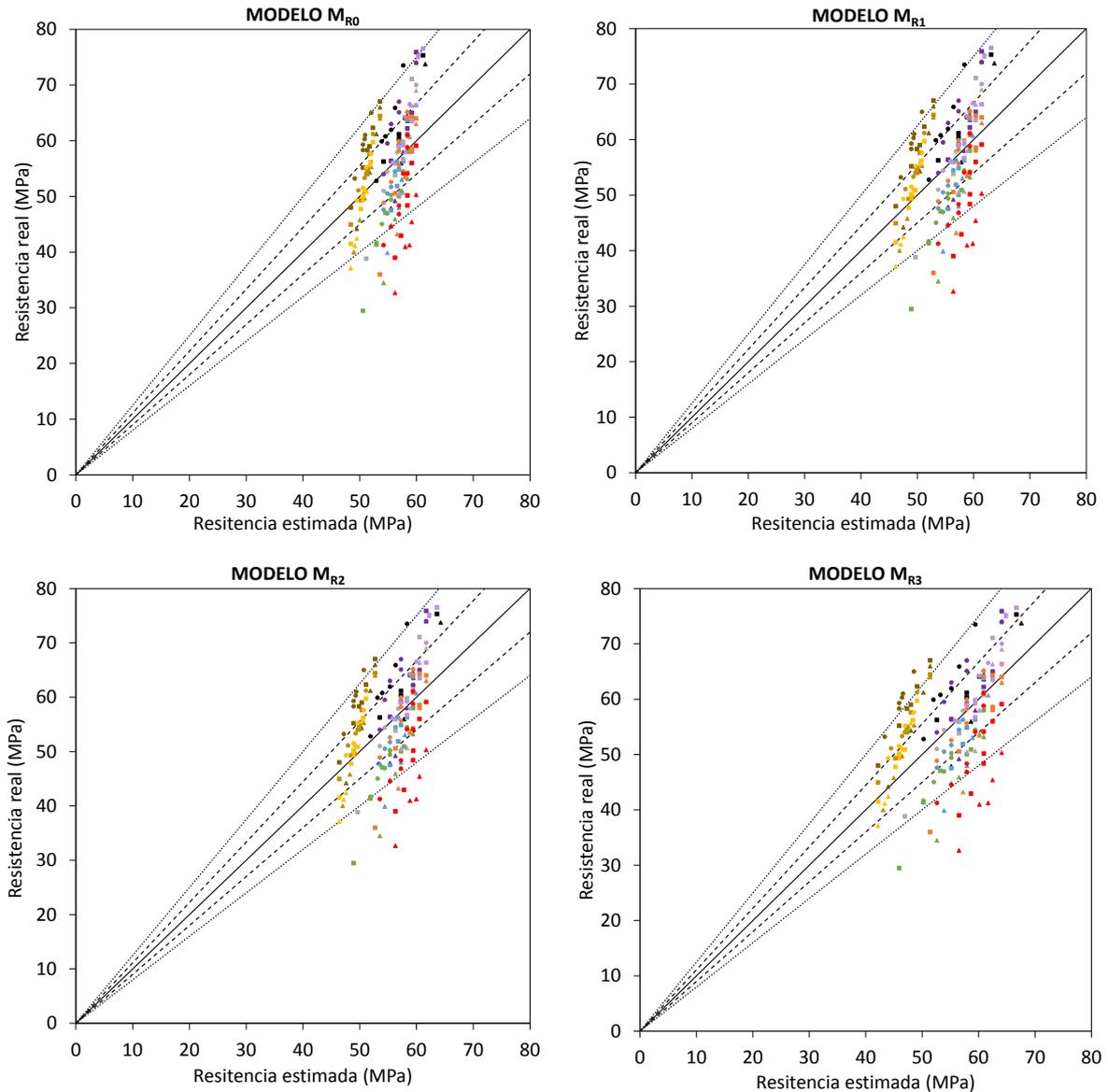


Figura 9.2. Resistencia real vs. resistencia estimada con los modelos de referencia M_{R0} a M_{R3}

En la figura 9.3 se pueden observar los resultados de la aplicación de los modelos de referencia desde el M_{R4} al M_{R7} . Estos cuatro modelos muestran unos resultados ligeramente mejores a los de los modelos de M_{R0} a M_{R3} . Uno de los motivos puede ser la utilización de un nuevo factor de entrada, el índice de rebote. El índice de rebote no se ve influido de una forma tan clara por los materiales reciclados, temperatura de curado ni relación agua/cemento, por ello, esto hace que estas cuatro estimaciones no se presenten tan segmentadas como las correspondientes a los cuatro modelos primeros. El modelo M_{R7} es el que mejor estima la resistencia a compresión entre los modelos de referencia. Esto puede ser motivado porque incluye dos nuevos factores de entrada: la edad y la relación agua/cemento, que son factores que influyen en las correlaciones entre ensayos no destructivos y resistencia a compresión. Pese a esta mejora, se sigue observando una cierta segmentación entre datos de distintos hormigones y entre distintas temperaturas dentro de un mismo hormigón.

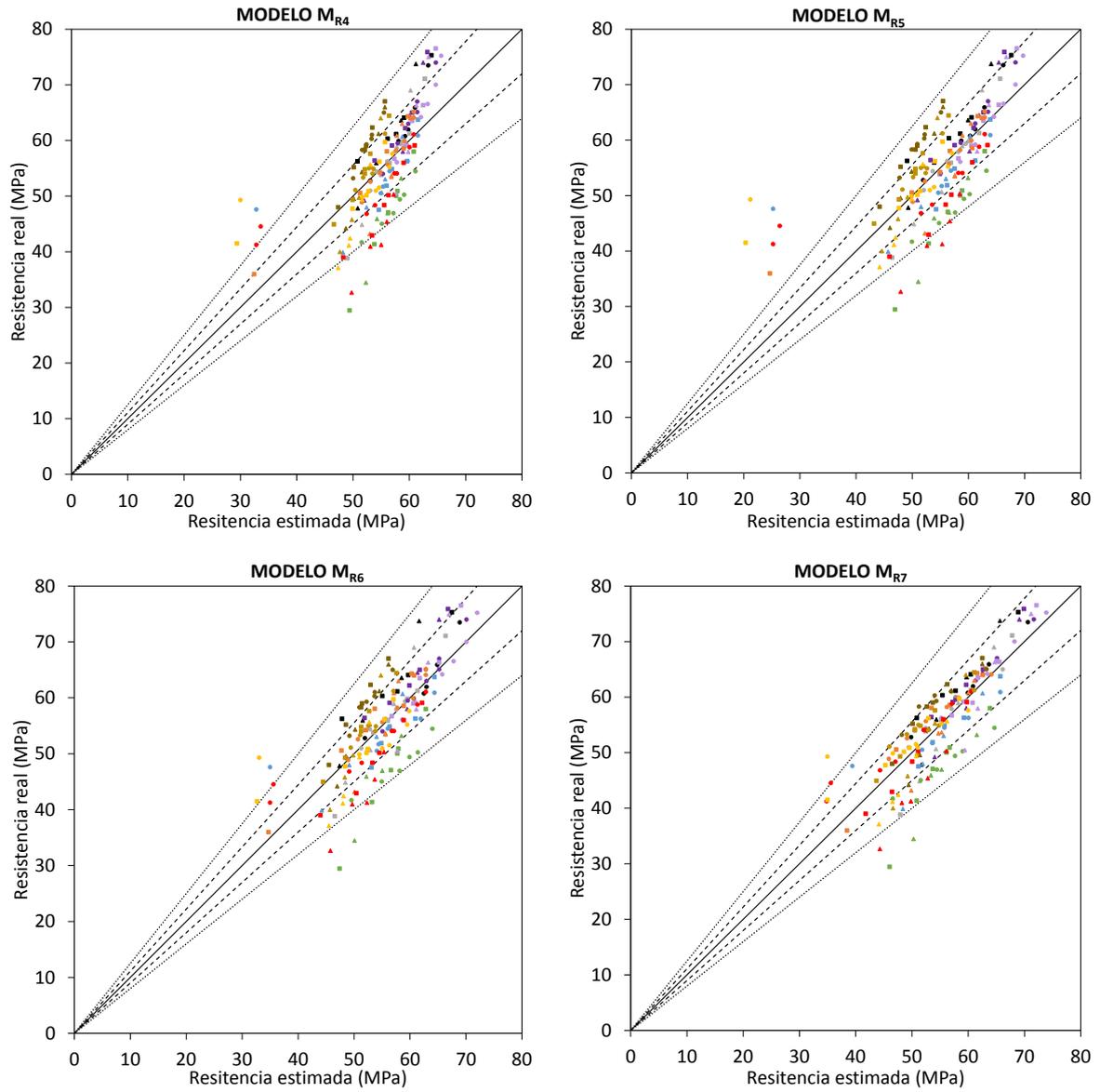


Figura 9.3. Resistencia real vs. resistencia estimada con los modelos de referencia M_{R4} a M_{R7}

En la figura 9.4 se pueden observar los resultados de estimación aplicando los modelos M_{N1} y M_{N2} . Estos modelos son similares al M_{R7} , sustituyendo la edad por la edad equivalente calculada según la ecuación 2.5 (M_{N1}) o según la ecuación 2.4 (M_{N2}). Los resultados obtenidos son similares a los obtenidos en el modelo de referencia M_{R7} , sin haberse obtenido mejoras sustanciales.

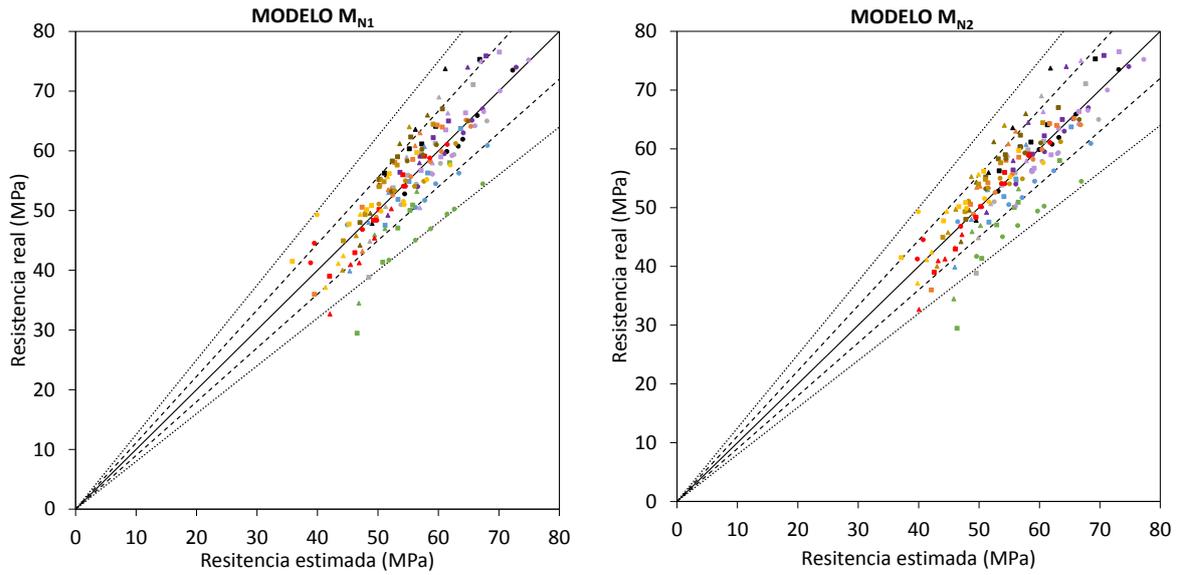


Figura 9.4. Resistencia real vs. resistencia estimada con los modelos propuestos M_{N1} y M_{N2}

La figura 9.5 muestra los resultados de estimación de resistencia a compresión obtenidos con los modelos M_{N3} a M_{N6} . En estos modelos se utilizan como datos de entrada la velocidad de ultrasonidos (UPV), la edad equivalente (calculada con ecuación 2.5 o 2.4), la cantidad de agua añadida, cemento, cenizas de biomasa y filler, así como la densidad del hormigón endurecido. Los resultados de estimación mejoran sustancialmente, obteniendo errores menores del 10% en la gran mayoría de las estimaciones.

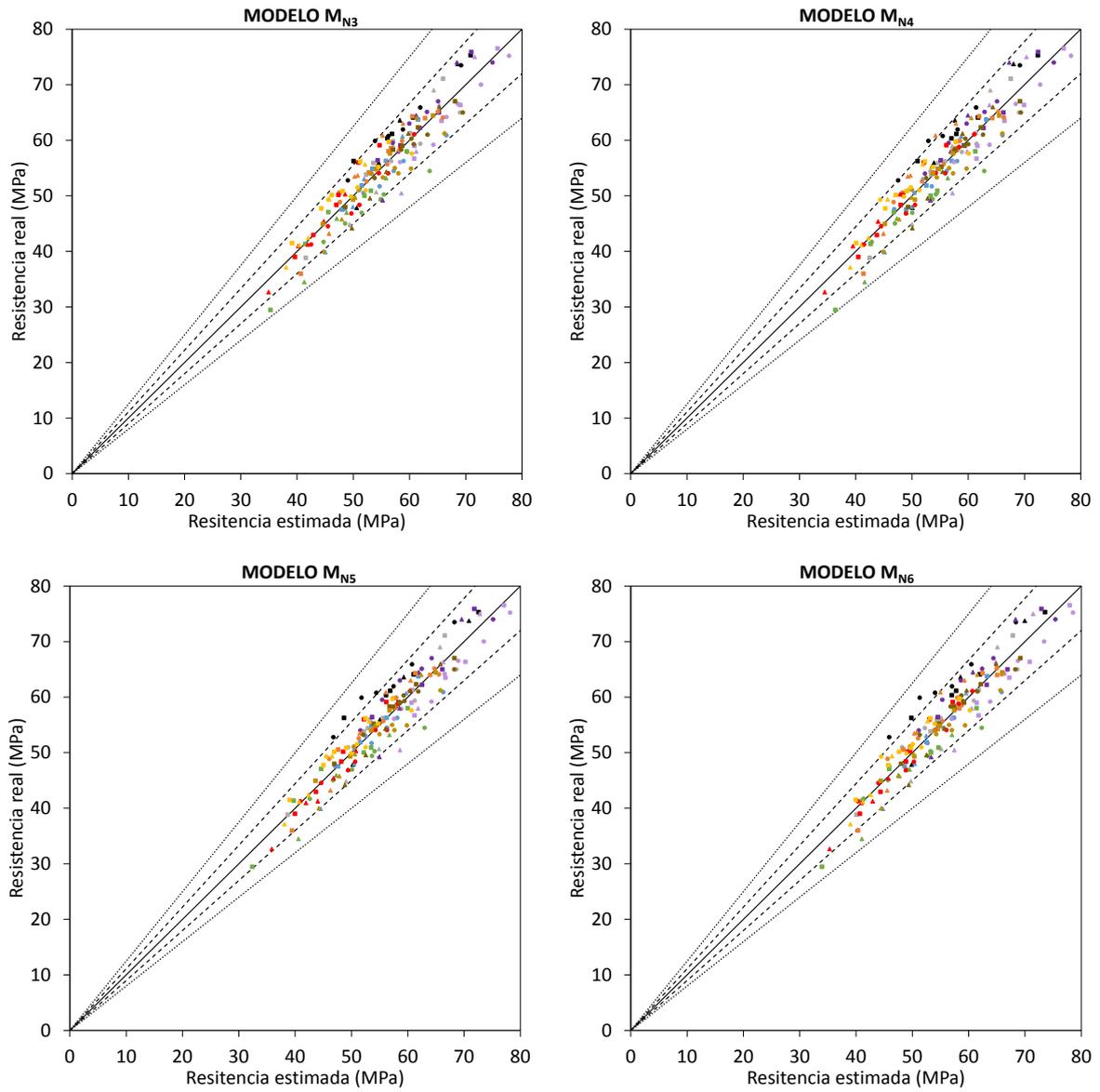


Figura 9.5. Resistencia real vs. resistencia estimada con los modelos propuestos M_{N3} a M_{N6}

En la figura 9.6 se puede observar los resultados de estimación obtenidos con los modelos M_{N7} a M_{N10} , que difieren de los modelos M_{N3} a M_{N6} (respectivamente) en que se añade un nuevo dato de entrada: el índice de rebote. Los resultados son ligeramente mejores a los obtenidos sin tener en cuenta este factor.

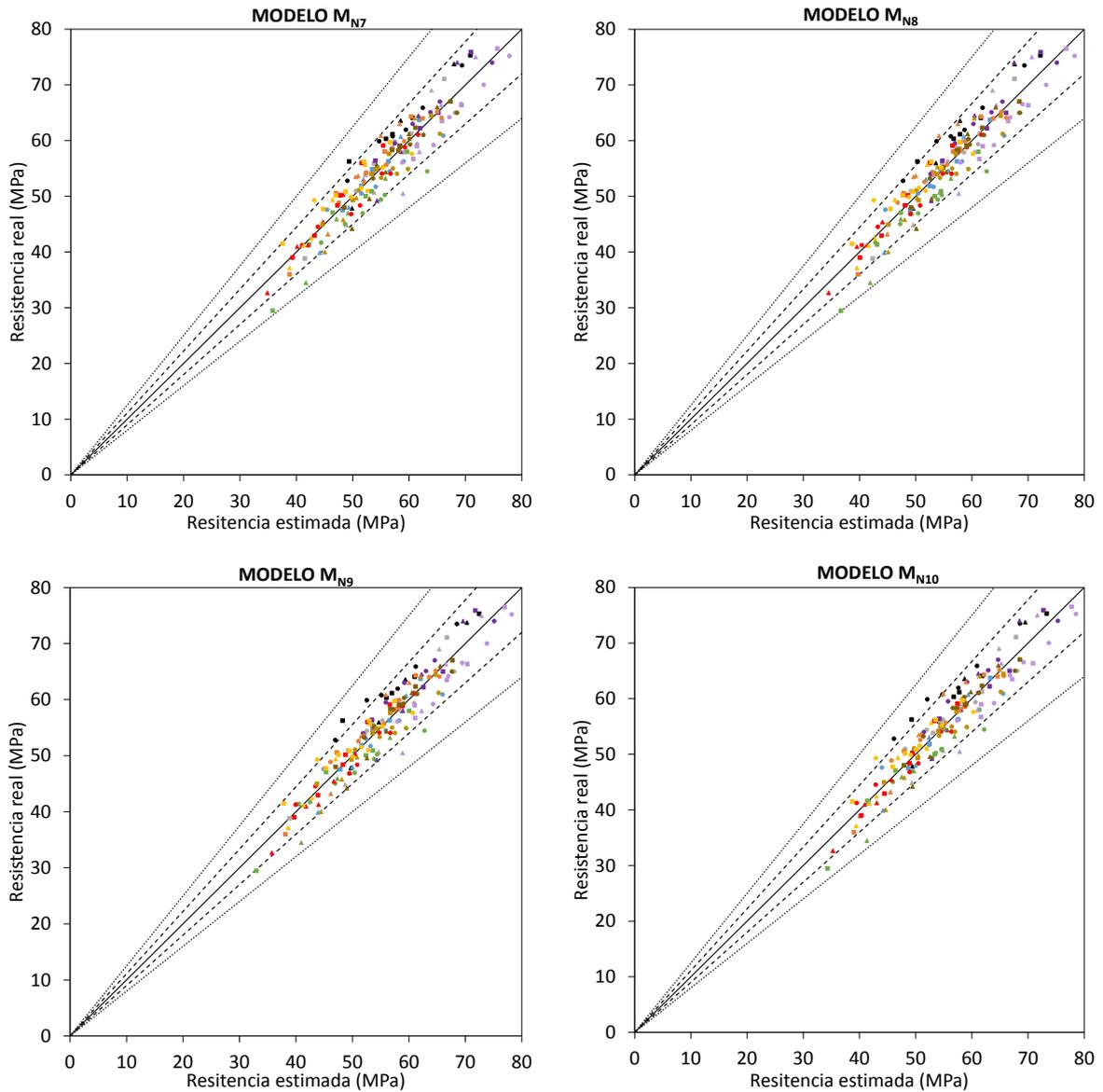


Figura 9.6. Resistencia real vs. resistencia estimada con los modelos propuestos M_{N7} a M_{N10}

En la tabla 9.4 se muestran los errores cuadráticos medios de todos los modelos. Se observa que los modelos propuestos tienen ECM mucho menores que los modelos referenciados por otros autores. La influencia de la temperatura y la introducción del factor de la densidad y de la relación agua/cemento modificada (AC') mejoran sustancialmente los resultados de estimación de la resistencia a compresión (tabla 9.4).

Existe muy poca diferencia entre aplicar la edad equivalente mediante la ecuación 2.5 (en la que es necesaria la energía de activación) y la ecuación 2.4 (con el factor tiempo-temperatura, solo es necesario el historial de temperaturas internas). Por ello, parece recomendable aplicar la ecuación 2.4, ya que con ella se obtienen resultados similares (incluso mejores con algunos modelos) y la cantidad de información necesaria es menor y más fácilmente adquirible.

La introducción de la variable índice de rebote no supone una mejora importante en la precisión de estimación del modelo. No se produce una mejora sustancial al incluir un coeficiente de ajuste como término independiente en el modelo.

Tabla 9.4. Error cuadrático medio de cada modelo después de optimización

Referencia	Modelo	ECM	Correlación propuesta
-	M _{R0}	62,98	$\hat{s} = a_0 + a_1 \cdot UPV$
RILEM NDT 1 FERN01	M _{R1}	61,79	$\hat{s} = a_1 \cdot UPV^{a_2}$
	M _{R2}	61,29	$\hat{s} = a_1 \cdot e^{a_2 \cdot UPV}$
	M _{R3}	65,64	$\hat{s} = a_0 + a_1 \cdot UPV^2 + a_2 \cdot UPV$
RAMY96 TANI84	M _{R4}	42,17	$\hat{s} = a_0 + a_1 \cdot UPV + a_2 \cdot R$
HOBBO7	M _{R5}	45,44	$\hat{s} = a_0 + a_1 \cdot UPV^2 + a_2 \cdot UPV + a_3 \cdot R$
HUAN11	M _{R6}	31,05	$\hat{s} = a_0 + a_1 \cdot UPV^3 + a_2 \cdot R^2$
	M _{R7}	21,55	$\hat{s} = a_0 + a_1 \cdot UPV + a_2 \ln(t) + a_3 \cdot AC^{-0,5} + a_4 \cdot R^2$
Presente tesis	M _{N1}	22,89	$\hat{s} = a_1 \cdot UPV + a_2 \ln(t_e) + a_3 \cdot AC^{-0,5} + a_4 \cdot R^2 + a_0$
	M _{N2}	20,11	$\hat{s} = a_1 \cdot UPV + a_2 \ln\left(\frac{FTT}{T_r}\right) + a_3 \cdot AC^{-0,5} + a_4 \cdot R^2 + a_0$
	M _{N3}	9,20	$\hat{s} = a_1 \cdot UPV + a_2 \ln(t_e) - a_3 \cdot AC' \cdot \rho$
	M _{N4}	8,82	$\hat{s} = a_1 \cdot UPV + a_2 \ln\left(\frac{FTT}{T_r}\right) - a_3 \cdot AC' \cdot \rho$
	M _{N5}	8,18	$\hat{s} = a_1 \cdot UPV + a_2 \ln(t_e) - a_3 \cdot AC' \cdot \rho + a_0$
	M _{N6}	8,18	$\hat{s} = a_1 \cdot UPV + a_2 \ln\left(\frac{FTT}{T_r}\right) - a_3 \cdot AC' \cdot \rho + a_0$
	M _{N7}	8,88	$\hat{s} = a_1 \cdot UPV + a_2 \ln(t_e) - a_3 \cdot AC' \cdot \rho + a_4 \cdot R^2$
	M _{N8}	8,61	$\hat{s} = a_1 \cdot UPV + a_2 \ln\left(\frac{FTT}{T_r}\right) - a_3 \cdot AC' \cdot \rho + a_4 \cdot R^2$
	M _{N9}	8,01	$\hat{s} = a_1 \cdot UPV + a_2 \ln(t_e) - a_3 \cdot AC' \cdot \rho + a_4 \cdot R^2 + a_0$
	M _{N10}	8,03	$\hat{s} = a_1 \cdot UPV + a_2 \ln\left(\frac{FTT}{T_r}\right) - a_3 \cdot AC' \cdot \rho + a_4 \cdot R^2 + a_0$

En las tablas 9.5 y 9.6 se muestran los resultados de los coeficientes de ajuste después de la optimización.

Tabla 9.5. Modelos de estimación con coeficientes calculados en optimización

Modelo	Correlación propuesta
M _{R0}	$\hat{s} = 1,13273 \cdot 10^{-2} \cdot UPV$
M _{R1}	$\hat{s} = 6,387 \cdot 10^{-4} \cdot UPV^{1,3382609}$
M _{R2}	$\hat{s} = 13,9670513 \cdot e^{2,808 \cdot 10^{-4} \cdot UPV}$
M _{R3}	$\hat{s} = 0,99 + 2,5455 \cdot 10^{-6} UPV^2 + 2,4642 \cdot 10^{-9} \cdot UPV$
M _{R4}	$\hat{s} = 0,55 + 0,7490878 \cdot UPV + 0,0067456 \cdot R$
M _{R5}	$\hat{s} = 1,00 + 1,05802 \cdot 10^{-6} \cdot UPV^2 + 4,0701 \cdot 10^{-10} \cdot UPV + 0,99406 \cdot R$
M _{R6}	$\hat{s} = 26,84 + 7,414 \cdot 10^{-11} \cdot UPV^3 + 0,02234 \cdot R^2$
M _{R7}	$\hat{s} = 1,29061 \cdot 10^{-5} \cdot UPV + 3,459 \cdot \ln(t) + 27,52 \cdot AC^{-0,5} + 0,01191 \cdot R^2$
M _{N1}	$\hat{s} = 1,43196 \cdot 10^{-4} \cdot UPV + 2,814 \cdot \ln(t_e) + 28,22 \cdot AC^{-0,5} + 0,01137 \cdot R^2$
M _{N2}	$\hat{s} = 9,49825 \cdot 10^{-4} \cdot UPV + 3,973 \cdot \ln\left(\frac{FTT}{T_r}\right) + 39,25 \cdot AC^{-0,5} + 0,00671 \cdot R^2 - 16,64$
M _{N3}	$\hat{s} = 1,98522 \cdot 10^{-2} \cdot UPV + 3,190 \cdot \ln(t_e) - 0,042227 \cdot AC' \cdot \rho$
M _{N4}	$\hat{s} = 1,95609 \cdot 10^{-2} \cdot UPV + 3,542 \cdot \ln\left(\frac{FTT}{T_r}\right) - 0,040605 \cdot AC' \cdot \rho$
M _{N5}	$\hat{s} = 2,65068 \cdot 10^{-2} \cdot UPV + 2,812 \cdot \ln(t_e) - 0,039642 \cdot AC' \cdot \rho - 35,84$
M _{N6}	$\hat{s} = 2,50259 \cdot 10^{-2} \cdot UPV + 3,164 \cdot \ln\left(\frac{FTT}{T_r}\right) - 0,038754 \cdot AC' \cdot \rho - 29,11$
M _{N7}	$\hat{s} = 1,87489 \cdot 10^{-2} \cdot UPV + 2,700 \cdot \ln(t_e) - 0,039732 \cdot AC' \cdot \rho + 0,00374 \cdot R^2$
M _{N8}	$\hat{s} = 1,86988 \cdot 10^{-2} \cdot UPV + 3,094 \cdot \ln\left(\frac{FTT}{T_r}\right) - 0,038755 \cdot AC' \cdot \rho + 0,00307 \cdot R^2$
M _{N9}	$\hat{s} = 2,52431 \cdot 10^{-2} \cdot UPV + 2,474 \cdot \ln(t_e) - 0,037967 \cdot AC' \cdot \rho + 0,00276 \cdot R^2 - 33,45$
M _{N10}	$\hat{s} = 2,40221 \cdot 10^{-2} \cdot UPV + 2,803 \cdot \ln\left(\frac{FTT}{T_r}\right) - 0,037272 \cdot AC' \cdot \rho + 0,00260 \cdot R^2 - 27,71$

Tabla 9.6. Coeficientes k0 y k1 de la fórmula 9.1 (AC') después de optimización

Modelo	K ₀	K ₁
M _{N1}	-	-
M _{N2}	-	-
M _{N3}	0,195	0,346
M _{N4}	0,172	0,340
M _{N5}	0,181	0,509
M _{N6}	0,163	0,471
M _{N7}	0,220	0,362
M _{N8}	0,194	0,353
M _{N9}	0,200	0,519
M _{N10}	0,182	0,484

9.2.2. Resultados obtenidos con método de entrenamiento y test

Con el fin de comprobar que los modelos propuestos son válidos para valores que no se hayan utilizado para la calibración del modelo, se hace una nueva calibración de los modelos, utilizando el 70% de los datos que se poseen para entrenar el método y calcular los parámetros de la optimización y un 30% de los datos para el test, es decir, para la comprobación de que los modelos hacen una buena estimación, utilizando valores que no se han usado para la calibración. Se dividen los 181 vectores de datos en dos

grupos de forma aleatoria: un grupo de 127 vectores para entrenamiento del método y un grupo de 54 vectores para efectuar el test.

Se ha aplicado este procedimiento para tres de los modelos estudiados: el modelo que mejor se adapta entre los modelos de referencia propuestos por otros autores (M_{R7}) y dos de los modelos propuestos que arrojan mejores resultados: M_{N6} (sin índice de rebote) y M_{N10} (incluye todos los parámetros).

La formulación resultante de la optimización efectuada con el grupo de 127 vectores de entrenamiento, tiene como resultado las correlaciones propuestas en la tabla 9.7 y 9.8.

Tabla 9.7. Modelos de estimación con coeficientes calculados en optimización

Modelo	Correlación propuesta
M_{R7}	$\hat{s} = 1,96761 \cdot 10^{-4} \cdot UPV + 3,471 \cdot \ln(t) + 32,77 \cdot AC^{-0,5} + 0,0133 \cdot R^2 - 9,18$
M_{N6}	$\hat{s} = 2,60949 \cdot 10^{-2} \cdot UPV + 3,143 \cdot \ln\left(\frac{FTT}{T_r}\right) - 0,039328 \cdot AC' \cdot \rho - 36,39$
M_{N10}	$\hat{s} = 2,46139 \cdot 10^{-2} \cdot UPV + 2,376 \cdot \ln\left(\frac{FTT}{T_r}\right) - 0,036566 \cdot AC' \cdot \rho + 0,0055 \cdot R^2 - 33,63$

Tabla 9.8. Coeficientes k_0 y k_1 de la fórmula 9.1 según optimización

Modelo	K_0	K_1
M_{N6}	0,171	0,497
M_{N10}	0,227	0,523

El parámetro “ a_1 ” del modelo de referencia (M_{R7}) ha variado significativamente con respecto al obtenido con la optimización en la que se utilizan todos los datos. Por el contrario, los parámetros de los modelos propuestos apenas difieren de los calculados con los 181 vectores, lo que parece indicar una cierta estabilidad de los modelos propuestos en la presente tesis. En las tablas 9.9 (resultados de grupo de ensayo) y tabla 9.10 (resultados de grupo test) se muestran varios indicadores de la efectividad y estabilidad de los modelos.

Tabla 9.9. Indicadores de la efectividad y estabilidad de los modelos (grupo de entrenamiento)

Indicador	M_{R7}	M_{N6}	M_{N10}
Coeficiente de variación	9,1638	5,5232	5,4091
s/\hat{s} medio	1,0013	0,9997	0,9998
Máx (s/\hat{s})	1,3386	1,1637	1,1639
Mín (s/\hat{s})	0,6512	0,8488	0,8373
R^2	0,7442	0,8889	0,8958
ECM	20,14565	8,7515	8,2026
Error medio	3,40	2,36	2,24

Tabla 9.10. Indicadores de la efectividad y estabilidad de los modelos (grupo de test)

Indicador	M _{R7}	M _{N6}	M _{N10}
Coeficiente de variación	11,3043	4,9730	5,8478
<i>s/ŝ medio</i>	1,0200	1,0021	1,0020
<i>Máx (s/ŝ)</i>	1,5127	1,1768	1,2091
<i>Mín (s/ŝ)</i>	0,8175	0,9051	0,8996
R ²	0,7350	0,9227	0,9081
ECM	24,6844	7,0818	8,6539
Error medio	3,89	2,05	2,36

Se puede observar como los modelos propuestos son más estables y arrojan resultados mejores que los obtenidos con los modelos de referencia. Los nuevos modelos propuestos tienen con R² mayor que 0,90 en test, bajos coeficientes de variación (menores de 6) y error cuadrático medio menor de 9, en contraposición con los indicadores del modelo de referencia (M_{R7}), con R² menor de 0,80, coeficiente de variación mayor de 9 y ECM mayor de 20. Por ello, se puede afirmar que los modelos propuestos mejoran sustancialmente las estimaciones y son más estables en lo referente a cambios en el conjunto de valores utilizando para la obtención de los parámetros del modelo mediante optimización.

9.3. Formulaciones resultantes de aplicar Programación Genética

9.3.1. Etapa 0 y 1: Programación orientada según formulación base.

En una primera etapa se ha aplicado programación genética [KOZA92] pura sin restricciones (etapa 0) y no se han obtenido resultados mejores o iguales que los obtenidos según la fórmula empírica propuesta. Por ello, se ha tomado la decisión de aplicar programación genética orientada (etapa 1). [PERE11, PERE10, PERE12c, CLAD14]

Para ello se parte de una estructura similar a la del modelo M_{N10}, con una serie de ramas (r) en las que se utilizan algunos de los datos de la serie de variables. Se ha decidido utilizar la edad equivalente calculado como el FTT entre T_r debido a que este término es mucho más sencillo de obtener en la práctica y se ha observado que, en estas estimaciones, los resultados son muy similares a los obtenidos con la edad equivalente calculada mediante la fórmula de Arrhenius (la cual necesita la energía de activación).

Las variables que se han utilizado en la programación genética orientada son:

UPV= velocidad de ultrasonidos (Km/s)	ASH = Cenizas de biomasa (Kg/m ³)
R = índice de rebote	F = Filler (Kg/m ³)
T= temperatura de curado (°C)	ρ = Densidad (Tn/m ³)
W = agua (Kg/m ³)	LnFTTTR = $\ln\left(\frac{FTT}{T_r}\right)$
C = Cemento (Kg/m ³)	Ŝ = Resistencia estimada con programación genética – Salida. (MPa)

La ecuación 9.2 es la ecuación base de para la programación genética orientada que se ha empleado.

$$\hat{S} = r_0 \cdot UPV + r_1 \cdot \ln FTTTR + r_2 \cdot \left(\frac{W}{C + \left(r_3 \cdot ASH \cdot \frac{T}{20} \right) + (r_4 * F)} \right) + r_5 \cdot R^{r_6} + r_7 \quad (9.2)$$

Se establecen 8 ramas (de r_0 a r_7). Algunas de estas ramas simplemente se le permiten ser contantes y otras, en cambio, pueden ser una función que utilizan algunas de las variables permitidas. Las restricciones de las ramas definen el tipo de rama que puede expresarse. En la tabla 9.11 se muestran las restricciones aplicadas mostrando únicamente las variables y o constantes permitidas..

Tabla 9.11. Restricciones aplicadas en la programación genética

Rama	Variables y/o constantes permitidas	Rama	Variables y/o constantes permitidas
r_0	T, W, C, ASH, ρ , constante	r_4	Constante
r_1	Constante	r_5	Constante
r_2	ρ , constante	r_6	Constante
r_3	Constante	r_7	Constante

En la tabla 9.12 se muestran los resultados de las ramas que proporcionan un mejor resultado de la función de estimación, una vez aplicada la programación genética aplicando los algoritmos genéticos desarrollados en la tesis doctoral del Juan Luis Pérez-Ordóñez [PERE11] para la calibración de estimaciones.

Tabla 9.12. Resultado de las ramas de programación genética (M_{PG1})

Rama	Resultado en PG1	Rama	Resultado en PG1
r_0	$10 \cdot \rho - 10$	r_4	1
r_1	4	r_5	0,0672403
r_2	$-(\rho + 0,4972) \cdot (\rho - 2) - 72$	r_6	1
r_3	0,111111	r_7	10

Por tanto, la ecuación de estimación de resistencia a compresión resultante de la programación genética orientada es la ecuación 9.3. El nuevo modelo obtenido mediante programación genética orientada se designa como M_{PG1} .

$$\hat{S} = (10 \cdot \rho - 10) \cdot UPV + 4 \cdot \ln \left(\frac{FTT}{T_r} \right) + [-(\rho + 0,4972) \cdot (\rho - 2) - 72] \cdot AC' + 0,0672403 \cdot R + 10 \quad (9.3a)$$

siendo AC' :

$$AC' = \frac{W}{C + \left(0,11 \cdot ASH \cdot \frac{T}{20} \right) + (F)} \quad (9.3b)$$

Tal y como muestran los indicadores recogidos en las tablas 9.13, 9.14 y 9.15, la función de estimación de la resistencia a compresión resultante de la programación genética mejora ligeramente los resultados obtenidos anteriormente con los nuevos modelos propuestos (M_{N10}), llegando a obtener un ECM por debajo de 6,5 y R^2 mayor de 0,90 en el grupo de test.

En la figura 9.7 se pueden observar las gráficas de los ajustes de los modelos M_{N10} (figura 9.7a) y M_{PG1} (figura 9.7b) en las que se realiza comparativa de resistencia real y resistencia estimada, con el conjunto total de datos. Se puede observar como sus regresiones se aproximan a la bisectriz.

Tabla 9.13. Comparativa de indicadores de modelos (total de datos)

Indicador	M_{R7}	M_{N6}	M_{N10}	M_{PG1}
Coefficiente de variación	9,8726	5,3519	5,5285	5,2400
s/\hat{s} medio	1,0069	1,0004	1,0005	0,9994
Máx (s/\hat{s})	1,5127	1,1768	1,2091	1,1394
Mín (s/\hat{s})	0,6512	0,8488	0,8373	0,8162
R^2	0,7370	0,8987	0,8981	0,9024
ECM	21,4998	8,2534	8,3373	7,9073
Error medio	3,55	2,27	2,28	2,22
Puntos de demérito	21	2	2	2

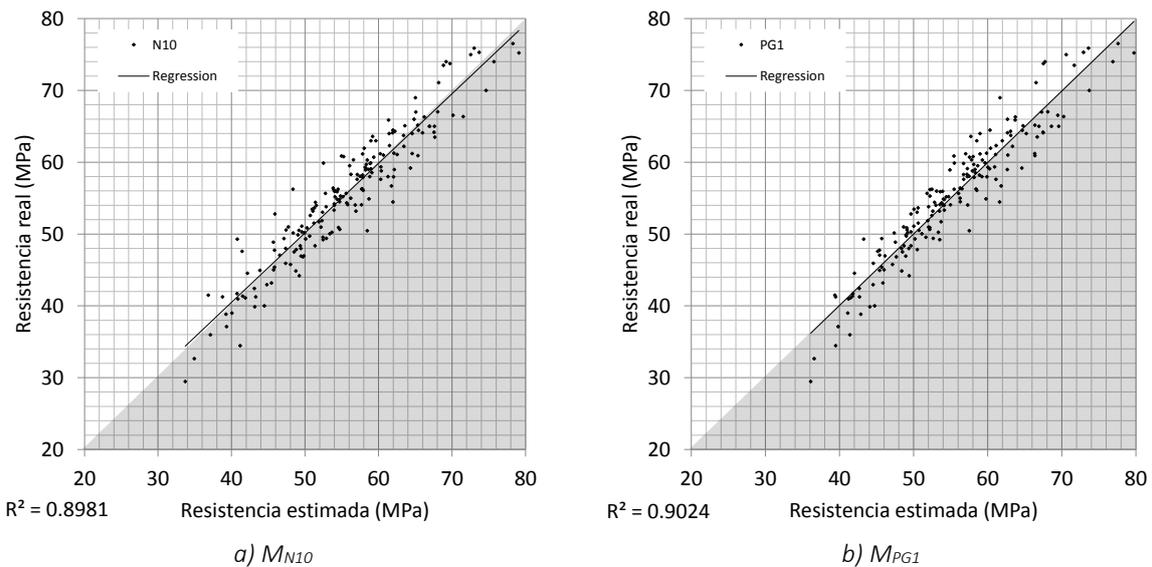


Figura 9.7. Regresiones de los modelos M_{N10} y M_{PG1}

Tabla 9.14. Comparativa de indicadores de modelos (grupo de entrenamiento)

Indicador	M_{R7}	M_{N6}	M_{N10}	M_{PG1}
Coefficiente de variación	9,1638	5,5232	5,4091	5,4418
s/\hat{s} medio	1,0013	0,9997	0,9998	0,9994
Máx (s/\hat{s})	1,3386	1,1637	1,1639	1,1192
Mín (s/\hat{s})	0,6512	0,8488	0,8373	0,8162
R^2	0,7442	0,8889	0,8958	0,8921
ECM	20,1456	8,7515	8,2026	8,5099
Error medio	3,40	2,36	2,24	2,28
Puntos de demérito	16	2	2	2

Tabla 9.15. Comparativa de indicadores de modelos (grupo de test)

Indicador	M _{R7}	M _{N6}	M _{N10}	M _{PG1}
Coefficiente de variación	11,3043	4,9730	5,8478	4,7805
<i>s/ŝ medio</i>	1,0200	1,0021	1,0020	0,9994
<i>Máx (s/ŝ)</i>	1,5127	1,1768	1,2091	1,1394
<i>Mín (s/ŝ)</i>	0,8175	0,9051	0,8996	0,8942
R ²	0,7350	0,9227	0,9081	0,9263
ECM	24,6844	7,0818	8,6539	6,4902
Error medio	3,89	2,05	2,36	2,09
Puntos de demérito	5	0	0	0

Los puntos de demérito que figuran en las tablas 9.13, 9.14 y 9.15, han sido calculados según la clasificación utilizada por Pérez et al. en 2012 [PERE12c] y por Collins et al. [COLLI01]. Las penalizaciones adoptadas por estos autores para el cálculo de los puntos de demérito, se muestran en la tabla 9.16.

Tabla 9.16. Penalizaciones adoptadas para cálculo de puntos de demérito

Valor real / valor predicho	Penalización
<0.5	10
0,5 - 0,67	5
0,67 – 0,85	2
0,85 - 1	0
1 – 1,30	0
1,30 - 2	1
>=2	2

9.3.2. Etapa 2: Programación orientada con mejora en la seguridad

Una cuestión de vital importancia a la hora de analizar la aplicabilidad de una ecuación de estimación en la práctica es que las predicciones queden del lado de la seguridad. Los errores de sobreestimación de la resistencia a compresión pueden llegar a producir una falta de seguridad si son lo suficientemente grandes. Por ello, hallar una formulación de estimación “más segura” (con menores errores de sobreestimación) mediante programación genética puede ser muy interesante en la práctica, pese a que la exactitud de las predicciones sea igual o incluso ligeramente inferior.

- **Etapa 2-a.**

Tal y como se puede observar en las tablas 9.13, 9.14 y 9.15, con las penalizaciones adoptadas en estudios anteriores [PERE12c, COLLI01] para el cálculo de los puntos de demérito no son suficientemente elevadas como para hacer una distinción entre los métodos propuestos y el resultante con programación genética orientada. Esto se debe a que los métodos propuestos ya están muy ajustados y sus estimaciones están muy próximas a las estimaciones reales. Debido a esto, con las penalizaciones adoptadas inicialmente, casi no hay puntos de demérito y los modelos son indistinguibles

(excepto el del modelo de referencia, M_{R7} , que tiene un número de puntos de demérito importante, por lo que a partir de ahora ya se descarta y no formará parte del análisis comparativo ya que es considerablemente peor que los demás en todos los indicadores).

Por ello, en esta primera parte de la búsqueda orientada teniendo en cuenta la seguridad estructural, se ha penalizado de forma moderada las mayores desviaciones con respecto a la resistencia real, sobre todo, cuando se tratan de sobreestimaciones de la resistencia (valor de la predicción mayor que el valor real), con valores mayores a los adoptados anteriormente (tabla 9.16 y 9.17).

Las penalizaciones que se han adoptado en esta nueva etapa 2-a, se muestran en la tabla 9.17. Las ramas resultantes de la aplicación de la programación genética se muestran en la tabla 9.18.

Tabla 9.17. Penalizaciones adoptadas en la PG etapa 2-a

Valor real / valor predicho	Penalización
<0,5	16
0,5 – 0,67	8
0,67 - ,.85	4
0,85 - 1	2
1 – 1,30	0
1,30 - 2	3
>=2	6

Tabla 9.18. Resultado de las ramas de programación genética (M_{PG2})

Rama	Resultado en PG2	Rama	Resultado en PG2
r_0	$3 \cdot \rho - \frac{(3 \cdot \rho)}{T} + 10$ $\frac{(ASH - 4) - 14}{(ASH - 4) - 14}$	r_4	2/3
r_1	3	r_5	0,00595238
r_2	-83	r_6	2
r_3	1/6	r_7	-4,5

Por tanto, la ecuación de estimación de resistencia a compresión resultante de la programación genética orientada, teniendo en cuenta las penalizaciones adoptadas en la etapa 2-a, es la ecuación 9.4. El nuevo modelo obtenido se designa como M_{PG2} .

$$\hat{S} = \left(3 \cdot \rho - \frac{(3 \cdot \rho)}{T} + 10 \right) \cdot UPV + 3 \cdot \ln\left(\frac{FTT}{T_r}\right) - 83 \cdot AC' + 0,00595238 \cdot R^2 - 4,5 \quad (9.4a)$$

Siendo:

$$AC' = \frac{W}{C + \left(\frac{1}{6} \cdot ASH \cdot \frac{T}{20}\right) + \frac{2}{3} \cdot F} \quad (9.4b)$$

En las tablas 9.19, 9.20 y 9.21 se muestran los indicadores de los modelos para el total de datos, para el grupo de entrenamiento y para el grupo de test respectivamente.

Tabla 9.19. Comparativa de indicadores de modelos (total de datos M_{PG2})

Indicador	M_{N10}	M_{PG1}	M_{PG2}
Coeficiente de variación	5,5285	5,2400	5,3914
<i>s/ŝ medio</i>	1,0005	0,9994	1,0153
<i>Máx (s/ŝ)</i>	1,2091	1,1394	1,2521
<i>Mín (s/ŝ)</i>	0,8373	0,8162	0,8591
R^2	0,8981	0,9024	0,9058
ECM	8,3373	7,9073	8,3072
Error medio	2,28	2,22	2,27

Tabla 9.20. Comparativa de indicadores de modelos (grupo de entrenamiento M_{PG2})

Indicador	M_{N10}	M_{PG1}	M_{PG2}
Coeficiente de variación	5,4091	5,4418	5,2128
<i>s/ŝ medio</i>	0,9998	0,9994	1,0145
<i>Máx (s/ŝ)</i>	1,1639	1,1192	1,1494
<i>Mín (s/ŝ)</i>	0,8373	0,8162	0,8591
R^2	0,8958	0,8921	0,9033
ECM	8,2026	8,5099	8,2304
Error medio	2,24	2,28	2,29

Tabla 9.21. Comparativa de indicadores de modelos (grupo de test M_{PG2})

Indicador	M_{N10}	M_{PG1}	M_{PG2}
Coeficiente de variación	5,8478	4,7805	5,8350
<i>s/ŝ medio</i>	1,0020	0,9994	1,0171
<i>Máx (s/ŝ)</i>	1,2091	1,1394	1,2521
<i>Mín (s/ŝ)</i>	0,8996	0,8942	0,9000
R^2	0,9081	0,9263	0,9158
ECM	8,6539	6,4902	8,4880
Error medio	2,36	2,09	2,23

Tal y como se observa en la figura 9.8, la ganancia de seguridad no es muy elevada con las penalizaciones adoptadas. Esto puede ser debido a que el ajuste ya está muy próximo a la bisectriz y para conseguir que las predicciones se desplacen verdaderamente al “lado seguro” (resistencia predicha menor que la resistencia real), es necesario penalizar mucho más los errores de sobrestimación. Por ello se desarrolla la etapa 2-b, en la que los valores de penalización para la sobrestimación son mucho más elevados.

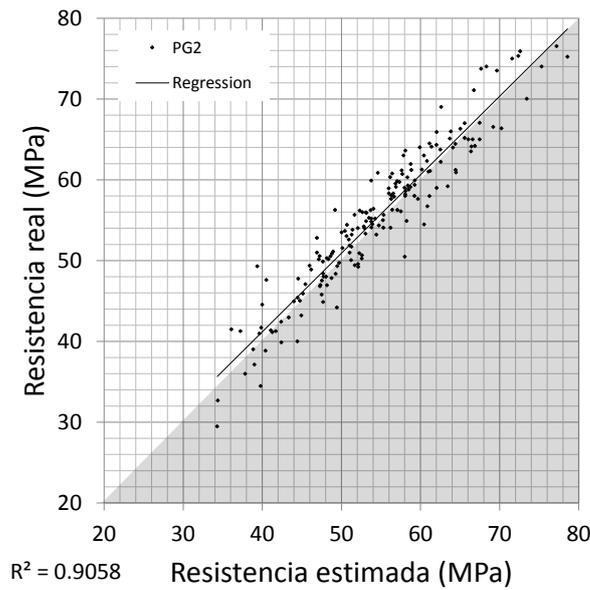


Figura 9.8. Regresiones de los modelo M_{PG2}

- **Etapa 2-b.**

En la tabla 9.22 se muestran los valores de penalización aplicados para la programación genética que tiene como resultado la ecuación del modelo M_{PG3} . Como se puede observar en la tabla 9.22, los valores de penalización utilizados en esta etapa penalizan mucho los errores de sobreestimación con el fin de obtener una estimación más segura.

Tabla 9.22. Penalizaciones adoptadas en la PG etapa 2-b

Valor real / valor predicho	Penalización
<0,5	40
0,5 – 0,67	20
0,67 – 0,85	10
0,85 - 1	5
1 – 1,30	0
1,30 - 2	2
≥ 2	4

En la tabla 9.23 se muestran los resultados de la aplicación de programación genética, que da lugar al modelo M_{PG3} .

Tabla 9.23. Resultado de las ramas de programación genética (M_{PG3})

Rama	Resultado en PG3	Rama	Resultado en PG3
r_0	$4 \cdot \rho + 7$	r_4	1
r_1	2,86282	r_5	0,00663007
r_2	$2 \cdot \rho - 68,1280$	r_6	2
r_3	0,2	r_7	-11,6191

Por tanto, la ecuación de estimación de resistencia a compresión resultante de la programación genética orientada, teniendo en cuenta las penalizaciones adoptadas en la etapa 2-a, es la ecuación 9.5. El nuevo modelo se designa como M_{PG3} .

$$\hat{S} = (4 \cdot \rho + 7) \cdot UPV + 2,86282 \cdot \ln\left(\frac{FTT}{T_r}\right) + (2 \cdot \rho - 68,1280) \cdot AC' + 0,00663007 \cdot R^2 - 11,6191 \quad (9.5a)$$

Siendo:

$$AC' = \frac{W}{C + \left(0,2 \cdot ASH \cdot \frac{T}{20}\right) + F} \quad (9.5b)$$

Tal y como se puede observar en la figura 9.9 y en las tablas 9.24, 9.25 y 9.26, la nueva regresión y la distribución de las predicciones con respecto a los valores reales se sitúa al lado de la seguridad. Se observa que con el nuevo modelo de estimación se pierde un poco de exactitud, pero se gana seguridad; el nuevo modelo tiene menos de la mitad de puntos de demérito que el resto de los modelos (calculando puntos de demérito con el criterio de tabla 9.22) y se consigue que la mayoría de las estimaciones estén del lado de la seguridad o bien tengan pequeños errores de sobreestimación.

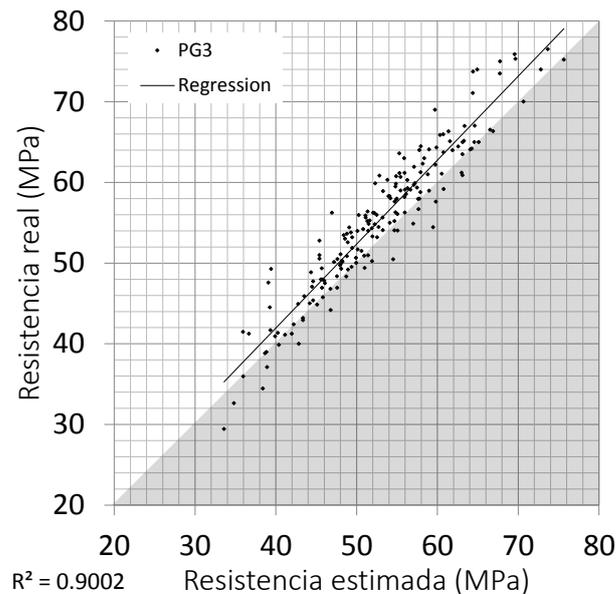


Figura 9.9. Regresiones de los modelo M_{PG3}

Tabla 9.24. Comparativa de indicadores de modelos (total de datos M_{PG3})

Indicador	M_{N10}	M_{PG1}	M_{PG2}	M_{PG3}
Coefficiente de variación	5,5285	5,2400	5,3914	5,4421
<i>s/ŝ medio</i>	1,0005	0,9994	1,0153	1,0466
<i>Máx (s/ŝ)</i>	1,2091	1,1394	1,2521	1,2511
<i>Mín (s/ŝ)</i>	0,8373	0,8162	0,8591	0,8772
R^2	0,8981	0,9024	0,9058	0,9002
ECM	8,3373	7,9073	8,3072	14,2914
Error medio	2,28	2,22	2,27	2,99
Puntos de demerito (según tabla 9.22)	435	450	345	170

Tabla 9.25. Comparativa de indicadores de modelos (grupo de entrenamiento M_{PG3})

Indicador	M_{N10}	M_{PG1}	M_{PG2}	M_{PG3}
Coefficiente de variación	5,4091	5,4418	5,2128	5,3153
<i>s/ŝ medio</i>	0,9998	0,9994	1,0145	1,0463
<i>Máx (s/ŝ)</i>	1,1639	1,1192	1,1494	1,1987
<i>Mín (s/ŝ)</i>	0,8373	0,8162	0,8591	0,8772
R^2	0,8958	0,8921	0,9033	0,8980
ECM	8,2026	8,5099	8,2304	14,4955
Error medio	2,24	2,28	2,29	3,08
Puntos de demerito (según tabla 9.22)	285	300	230	100

Tabla 9.26. Comparativa de indicadores de modelos (grupo de test M_{PG3})

Indicador	M_{N10}	M_{PG1}	M_{PG2}	M_{PG3}
Coefficiente de variación	5,8478	4,7805	5,8350	5,7796
<i>s/ŝ medio</i>	1,0020	0,9994	1,0171	1,0474
<i>Máx (s/ŝ)</i>	1,2091	1,1394	1,2521	1,2511
<i>Mín (s/ŝ)</i>	0,8996	0,8942	0,9000	0,9335
R^2	0,9081	0,9263	0,9158	0,9087
ECM	8,6539	6,4902	8,4880	13,8114
Error medio	2,36	2,09	2,23	2,79
Puntos de demerito (según tabla 9.22)	150	150	115	60

9.4. Conclusiones parciales del capítulo

Teniendo en cuenta las tendencias de la influencia de los diversos factores estudiados en capítulos anteriores en las correlaciones entre ensayos no destructivos y resistencia a compresión, se plantean una serie de modelos de estimación alternativos a los utilizados habitualmente en estudios anteriores.

Se han dividido los 181 vectores de datos (de 11 hormigones) en dos subgrupos: uno de entrenamiento y otro de test. Se concluye que los modelos propuestos mejoran sustancialmente las estimaciones que los de referencia y además son más estables en lo referente a cambios en el conjunto de valores utilizando para la obtención de los parámetros del modelo mediante optimización.

Por ello, se concluye que en las estimaciones a edades tempranas con ensayos no destructivos (índice de rebote y velocidad de ultrasonidos) es de vital importancia tener en cuenta una serie de factores que no suelen aparecer en los modelos de estimación más habituales:

- Densidad del hormigón endurecido.
- Relación agua/cemento modificada (teniendo en cuenta el aporte de adiciones y filler).
- El historial de temperaturas internas y la edad del hormigón.
- La edad equivalente (calculada con la ecuación de Arrhenius, para lo que es necesario conocer el valor de la energía de activación, o bien calculada como el cociente del factor tiempo temperatura entre la temperatura de referencia).

Teniendo en cuenta estos factores y la velocidad de ultrasonidos se consiguen muy buenas estimaciones independientemente del tipo de hormigón siempre y cuando se utilice cemento CEMI, que mejoran considerablemente la de otros modelos utilizados por otros autores.

El índice de rebote en estos nuevos modelos de estimación propuestos no mejora de forma apreciable los resultados, por lo que el trabajo de adquirir dichos datos quizás no compensa.

Los resultados obtenidos con la edad equivalente calculada con la ecuación de Arrhenius son muy similares a los obtenidos con el cociente del factor tiempo temperatura. Teniendo en cuenta que para determinar la energía de activación necesaria para calcular la edad equivalente usando la ecuación de Arrhenius es necesario hacer una campaña experimental específica. Por ello, salvo que se conozca a priori la energía de activación del hormigón, en sentido práctico se recomienda el uso de los modelos M_{N6} (ecuación 9.6), sin índice de rebote, o el M_{N10} (ecuación 9.7), con índice de rebote, en los que no es necesario conocer la energía de activación y se obtienen resultados similares.

$$\hat{s} = a_1 \cdot UPV + a_2 \ln\left(\frac{FTT}{T_r}\right) - a_3 \cdot AC' \cdot \rho + a_0 \quad (9.6)$$

$$\hat{s} = a_1 \cdot UPV + a_2 \ln\left(\frac{FTT}{T_r}\right) - a_3 \cdot AC' \cdot \rho + a_4 \cdot R^2 + a_0 \quad (9.7)$$

donde:

\hat{s} = resistencia estimada (MPa)

UPV= velocidad de ultrasonidos (m/s ó km/h)

AC'= agua/cemento modificada (ecuación 9.8)

ρ =densidad (Kg/m³)

FTT= Factor tiempo-temperatura o índice de madurez "M" (ecuación 2.3) (°C·días)

T_r = temperatura de referencia (°C)

T = temperatura de curado (°C)

$$AC' = \frac{\text{Agua total añadida}}{\text{cemento} + 0,163 \cdot \text{cenizas} \cdot \frac{T}{20} + 0,471 \cdot \text{filler}} \quad (9.8)$$

Aplicando programación genética pura o programación genética orientada, con calificación de puntos de demérito habituales en estudios anteriores, se mejora muy levemente los resultados obtenidos en los modelos propuestos inicialmente en la presente tesis.

Aplicando en el algoritmo genético grandes penalizaciones a las sobreestimaciones, se consigue hallar una ecuación de estimación de la resistencia a compresión que tiene una precisión similar a las propuestas y, además, conduce a estimaciones más seguras desde el punto de vista estructural. La ecuación resultante (9.5) puede servir como base para hacer una estimación de la resistencia a compresión muchos tipos de hormigón fabricados con cemento I, ya que se adapta a la composición del hormigón y está calibrada con 11 hormigones distintos. Si bien esta ecuación puede ser útil, es necesario resaltar que el alcance de la misma es limitado:

- En un futuro se planea hacer nuevas campañas experimentales para obtener datos de más hormigones y poder calibrar mejor la ecuación, con el fin de obtener unos coeficientes más ajustados.
- Los coeficientes que acompaña al término de las cenizas de biomasa puede variar mucho en función del tipo de adición, ya que depende en gran medida de la composición de las cenizas empleadas. Dentro de las cenizas de biomasa existe mucha variabilidad en la composición y, por tanto, en el poder cementante y en la dependencia de la temperatura, por ello, este coeficiente debe ser ajustado para cada tipo de cenizas.
- Algunos áridos especiales pueden variar las correlaciones.
- Quedan excluidos hormigones ligeros o con fibras.
- Es posible que algún aditivo modifique las correlaciones.

Por todo ello, siempre será recomendable hacer alguna probeta de control y comprobar que la fórmula estima adecuadamente la resistencia. En caso de que el resultado no sea adecuado, será necesario hacer una calibración del modelo para hallar los coeficientes, tomando como ecuación base la 9.5, o bien las ecuaciones base de alguno de los modelos propuestos inicialmente: M_{N6} o M_{N10} .

Capítulo 10. Evolución del módulo de deformación a edades tempranas

Capítulo 10. Evolución del módulo de deformación a edades tempranas

10.1. Introducción

En este capítulo se desarrolla un estudio sobre la influencia de los materiales reciclados en la evolución del módulo de deformación a edades tempranas. Los hormigones estudiados en el presente capítulo son los hormigones vibrados de clase C. En primer lugar se observa que influencia tienen las cenizas de biomasa en la evolución del módulo de deformación y en las correlaciones con diversos ensayos no destructivos. Seguidamente, se efectúa un análisis similar para los hormigones con áridos reciclados; en estos últimos hormigones, además, se ha monitorizado la evolución para dos temperaturas de curado distintas con el fin de observar la influencia de la temperatura en la evolución del módulo de deformación. Por último, se analiza la influencia de los materiales reciclados en la relación de módulo de deformación y resistencia a compresión.

10.2. Módulo de deformación en hormigones con cenizas de biomasa

10.2.1. Influencia de las cenizas de biomasa en la evolución del módulo

En la figura 10.1 se puede observar la evolución del módulo de deformación a edades tempranas para los hormigones C0, CC15 y CC30 obtenido con el método EMM-ARM. Cada una de las curvas representadas es el resultado de la media de las dos vigas fabricadas de cada dosificación. Las dispersiones entre dos curvas de una misma dosificación son despreciables (en torno al 1%). Se hace una comprobación del método para el hormigón C0, calculando su módulo según la normativa UNE-EN 12390-13, resultando un valor de módulo de deformación de 39,4 GPa, frente a los 38,3 GPa hallados a 7 días de edad mediante el método EMM-ARM. El error cometido por el EMM-ARM tomando como valor real del módulo de deformación calculado según normativa europea es del 3% (a la baja), por lo que se considera que el método EMM-ARM está haciendo una buena medición del módulo, tal y como se apuntaba en múltiples estudios [AZEN10, AZEN10-b, MAIA11, AZEN12, MAIA12, MAIA12-b].

Debido a que los hormigones estudiados son de endurecimiento rápido, durante las primeras 24 horas se produce un rápido aumento del módulo de deformación. A partir de las 6 horas de edad, se observa un tramo prácticamente lineal donde la pendiente de evolución del módulo es muy elevada (figura 10.1).

Para poder analizar la influencia de las cenizas en la velocidad de adquisición de módulo durante el fraguado y endurecimiento, se define la “velocidad de adquisición de módulo durante el fraguado y endurecimiento” como la pendiente de la rama lineal de la evolución del módulo. Para realizar este cálculo en la rama lineal, se han tomado los datos desde que se adquiere 2 GPa hasta que se adquiere

un 50% del módulo estabilizado, ya que, en dicho tramo, se observa una tendencia lineal clara en las tres dosificaciones.

En este tramo lineal se observa una disminución de la velocidad de desarrollo del módulo al aumentar el porcentaje de sustitución de cenizas. La velocidad media en el tramo señalado es de 3,8 GPa/h para el hormigón de referencia (C0), 3,5 GPa/h para el CC15 y de 3 GPa/h en el caso del hormigón CC30. Es decir, se observa un efecto negativo de las cenizas en la velocidad de desarrollo del módulo en hormigón fresco.

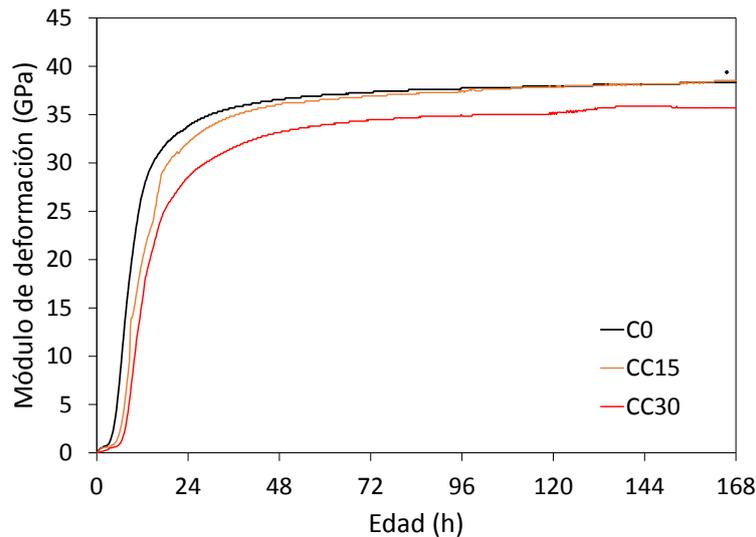


Figura 10.1. Evolución del módulo de deformación (C0 y CC)

En la figura 10.2 se representa la diferencia (en porcentaje) que existe entre el módulo desarrollado por cada uno de los hormigones con cenizas de biomasa y el módulo desarrollado por el hormigón de referencia. Así mismo, también se representa en ella la evolución de la temperatura interna de cada uno de los hormigones estudiados. Se observa que la cinética de evolución del módulo de deformación de los hormigones con cenizas de biomasa sufre grandes variaciones durante las 6 primeras horas con respecto a la del hormigón de referencia (C0), llegando a casi una disminución del 70% en el caso del CC15 y del 90% en el CC30.

A partir de 6 horas de edad, conforme pasa el tiempo y aumenta la temperatura debido al proceso exotérmico de hidratación del cemento, se acelera la activación del poder puzolánico que poseen estas cenizas de biomasa (ver capítulo 5), lo que produce una rápida disminución del efecto negativo de las cenizas hasta llegar a, aproximadamente, el 70% del módulo estabilizado.

A partir de 48 horas, la temperatura se estabiliza y, con ella, se estabiliza también la pérdida de módulo. El módulo estabilizado de CC15 es prácticamente igual que el de la dosificación de referencia (diferencias menores del 2%) mientras que, para el CC30, se observa una disminución mayor, en torno a un 6% menor que el módulo de deformación del C0.

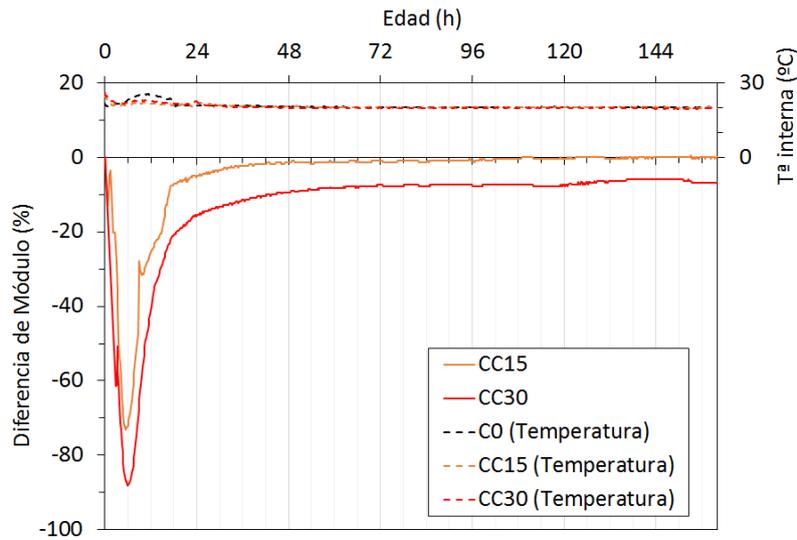


Figura 10.2. Diferencia de módulo de deformación respecto al de C0 y T^a interna (CC)

Según algunos estudios, en los que se analiza la influencia de las cenizas volantes de carbón como adición del cemento CEM I 52,5 y un 30% de sustitución, señalan una disminución de módulo en torno a un 10% a 7 días [ZAJA14]. En vista de los resultados, parece que la influencia de las cenizas de biomasa utilizadas en el presente estudio, a edades tempranas, tienen un efecto en el módulo similar al observado en algunas cenizas volantes.

10.2.2. Correlación entre módulo de deformación y END (C0 y CC)

- **Correlación de módulo de deformación con UPV**

Los historiales de temperaturas de las vigas de EMM-ARM (para el cálculo del módulo de deformación) y las probetas cúbicas sobre las que se mide velocidad de ultrasonidos son prácticamente iguales, por ello, no es necesario hacer una corrección de madurez y los datos se pueden correlacionar de forma directa. Es sabido que existe una correlación entre el módulo de deformación y el cuadrado de la velocidad de ultrasonidos [MALH04], siempre y cuando el coeficiente de Poisson sea constante (debido a que las correlaciones estudiadas se realizan con datos a partir de 1 día de edad, se puede considerar que dicho coeficiente es prácticamente constante).

En la figura 10.3 se representa el cuadrado de la velocidad de ultrasonidos frente al módulo de deformación, a partir de 9 horas de edad, para las tres mezclas estudiadas es prácticamente lineal. Se observa una variación de la correlación entre módulo y el cuadrado de la velocidad de ultrasonidos debido al remplazo parcial de cemento por cenizas de biomasa. Cuanto mayor es el porcentaje de remplazo, menor es el módulo de deformación correspondiente a una velocidad de ultrasonidos dada.

Para una misma velocidad de ultrasonidos, se observa una diferencia en los módulos de deformación correspondientes a C0 y CC30 de hasta un 20%.

Por tanto, se puede afirmar que la sustitución de cemento por cenizas de biomasa afecta a la correlación entre módulo de deformación y velocidad de ultrasonidos. Pese a ello, se puede llegar a obtener una

correlación conjunta, independientemente del contenido de cenizas de biomasa (figura 10.4) con un ajuste lineal con un R^2 de 0,84. Si bien los errores de estimación de este ajuste llegan hasta un 11%.

Existen estudios con cenizas volantes de carbón, que llegan a esta misma conclusión y correlacionan estos parámetros independientemente del contenido de cenizas volantes [YILD11]. Por tanto, parece que las cenizas de biomasa tienen una influencia en esta correlación similar a la influencia de las cenizas volantes de carbón observada por Yildirim, sobre todo, a partir de 3 días.

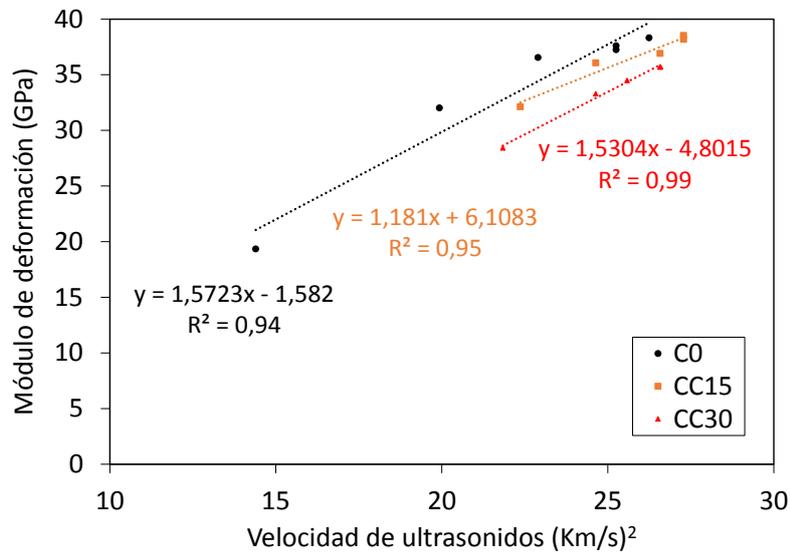


Figura 10.3. Módulo de deformación vs. $(UPV)^2$ para cada hormigón (C0 y CC)

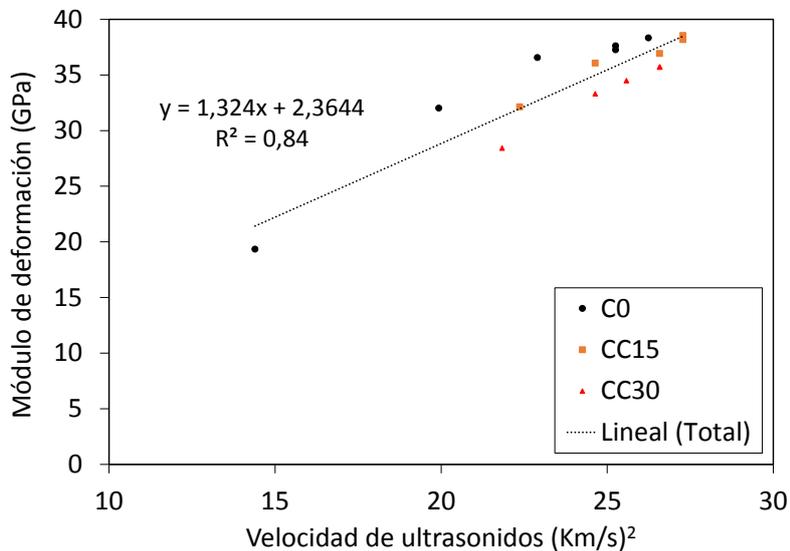


Figura 10.4. Módulo de deformación vs. $(UPV)^2$ conjunta (C0 y CC)

- **Correlación de módulo de deformación con índice de rebote**

En la figura 10.5 se muestran las correlaciones lineales entre índice de rebote y módulo de deformación. No se observa ninguna tendencia en la influencia de las cenizas de biomasa en las correlaciones. Se

puede hacer una correlación conjunta independientemente de la cantidad de cenizas con un R^2 próximo a 0,8.

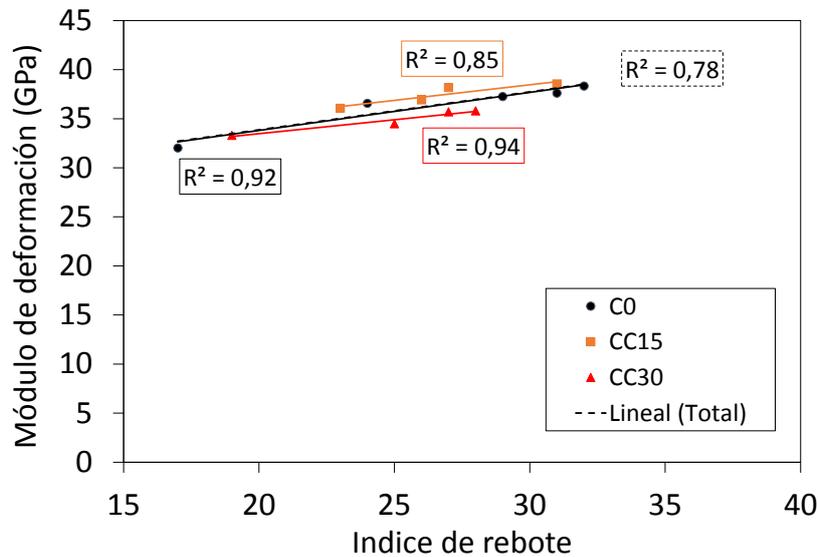


Figura 10.5. Módulo de deformación vs. índice de rebote (CO y CC)

- **Correlación de módulo de deformación con conductividad eléctrica interna**

El módulo de deformación y la conductividad se miden en especímenes de distinto tamaño, por lo que es necesario efectuar la corrección de madurez, como ya se ha explicado anteriormente en el capítulo 7. Para ello, en primer lugar, se calcula la edad equivalente de cada uno de los datos registrados, tanto del módulo de deformación como de conductividad, aplicando la ecuación de Arrhenius. Para efectuar los cálculos se toma para cada dosificación la energía de activación correspondiente y el historial de temperatura de cada espécimen. Una vez hallada la edad equivalente de cada uno de los datos registrados, se comparan los datos de módulo de deformación con los datos de conductividad registrados a las mismas edades equivalentes (interpolando los valores resultantes para edades equivalentes iguales, desde 0 a 168 horas, cada 0,25 horas).

Para todas las dosificaciones estudiadas se observa que el módulo de deformación crece conforme aumenta la edad con una fuerte velocidad de crecimiento durante las 24 primeras horas (Figura 10.1). Así mismo se puede observar que la conductividad disminuye con la edad (figuras 7.21 y 7.27) con un fuerte descenso durante las 24 primeras horas. Por ello, al correlacionar conductividad y módulo de deformación, se observa una relación inversamente proporcional entre ambas propiedades en todas las dosificaciones estudiadas. Algunos autores proponen un ajuste logarítmico para correlacionar la inversa de la conductividad (resistividad) y el módulo [WEI11]. Se observa que dicho ajuste es aplicable para cada uno de los hormigones estudiados (figura 10.6), sin embargo, se ha obtenido mejores aproximaciones con un ajuste lineal que correlaciona la conductividad y módulo de deformación (figura 10.7).

A partir de 30 GPa, la relación entre conductividad y el módulo es muy similar para los hormigones CO y CC15. Por el contrario, con un 30% de sustitución de cemento por cenizas de biomasa, la relación entre conductividad y módulo de deformación difiere significativamente con respecto al hormigón de referencia (CO). Mientras que con porcentajes bajos de sustitución de cenizas la correlación entre el módulo y conductividad no se ve afectada, con porcentajes mayores (30%), la correlación entre estas

propiedades es claramente distinta (figura 10.6). Para un mismo valor de conductividad, el módulo correspondiente es mucho mayor para los hormigones CC30 que para los hormigones C0.

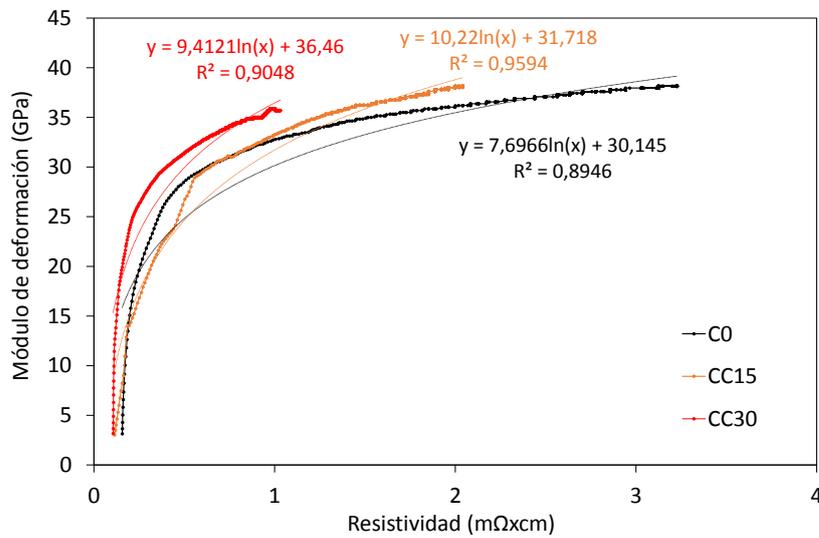


Figura 10.6. Módulo de deformación vs. resistividad (C0 y CC)

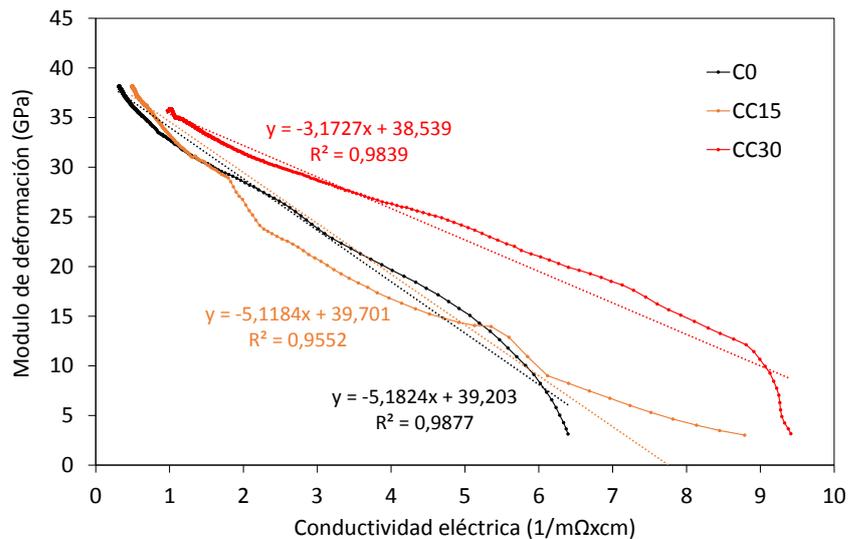


Figura 10.7. Módulo de deformación vs. conductividad (C0 y CC)

10.3. Módulo de deformación en hormigones con árido reciclado

10.3.1. Influencia del árido reciclado fino y grueso en la evolución del módulo

La figura 10.8 muestra la evolución del módulo de deformación a edades tempranas para hormigones con distintos porcentajes de sustitución de árido natural por árido reciclado. Se observa que durante las primeras horas la evolución de los 4 hormigones es muy similar, sin que se observe una influencia clara de la sustitución de árido reciclado, pero a partir de las 10-12 horas de edad comienza a observarse notables diferencias en el módulo de deformación: a mayor porcentaje de sustitución de árido reciclado,

menor módulo de deformación. Cabe destacar que la sustitución de árido reciclado influye de forma notable en la evolución del módulo de deformación a edades tempranas incluso cuando el porcentaje de sustitución es muy bajo (CH8), algo que ocurre de forma menos acusada en la evolución de la resistencia a compresión con porcentajes tan bajos de árido reciclado.

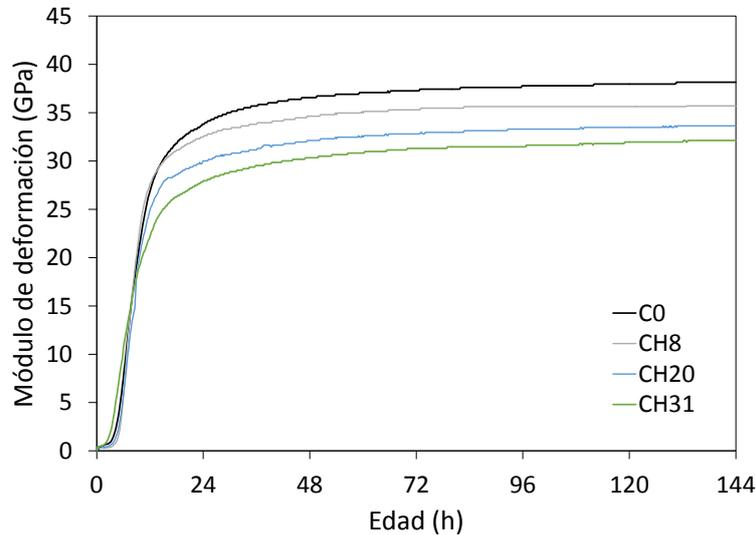


Figura 10.8. Evolución del módulo de deformación (C0 y CH)

En la figura 10.9 se puede observar la diferencia (en porcentaje) del módulo de deformación de los hormigones con distintos porcentajes de árido reciclado con respecto al módulo del hormigón de referencia (C0), a partir de 12 horas. Antes de 12 horas, pequeñas variaciones producen grandes distorsiones del porcentaje, por lo que se desechan dichos datos.

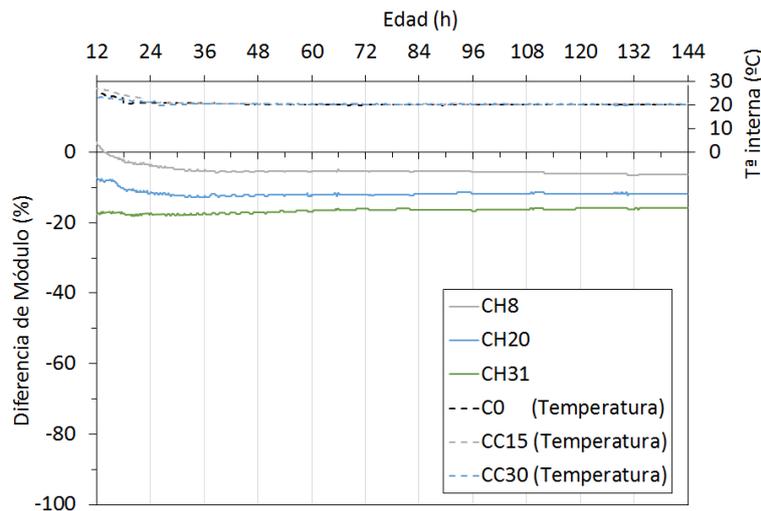


Figura 10.9. Diferencia de módulo de deformación respecto al de C0 y T^a interna (CH)

10.3.2 Correlación entre módulo de deformación y END (CO y CH)

- Correlación de módulo de deformación con UPV

Tal y como se observa en la figura 10.10, en la que se representa la correlación entre módulo de deformación y velocidad de ultrasonidos a partir de 12 horas de edad, parece que la cantidad de árido reciclado influye en gran medida en las correlaciones entre módulo de deformación y la velocidad de ultrasonidos. Para una misma velocidad de ultrasonidos, los módulos del CO y CH31 llegan a diferir más de un 20%. A mayor cantidad de árido reciclado, menor es el módulo correspondiente a un mismo valor de velocidad de ultrasonidos.

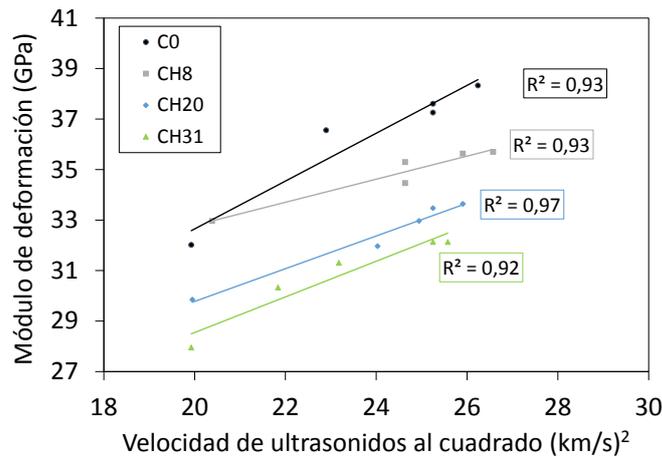


Figura 10.10. Módulo de deformación vs. (UPV)² (CO y CH)

- Correlación de módulo de deformación con índice de rebote

Mientras que en los hormigones con distintos porcentajes de cenizas de biomasa no se observaba una influencia clara de dicho material reciclado en las correlaciones de módulo con índice de rebote, en el caso del árido reciclado, sí se observa una tendencia clara de influencia en las curvas de correlación. En la figura 10.11 se puede observar como la cantidad de árido reciclado influye en la correlación entre módulo de deformación y el índice de rebote: un mismo valor de índice de rebote corresponde a un módulo de deformación menor cuanto mayor es la cantidad de árido reciclado.

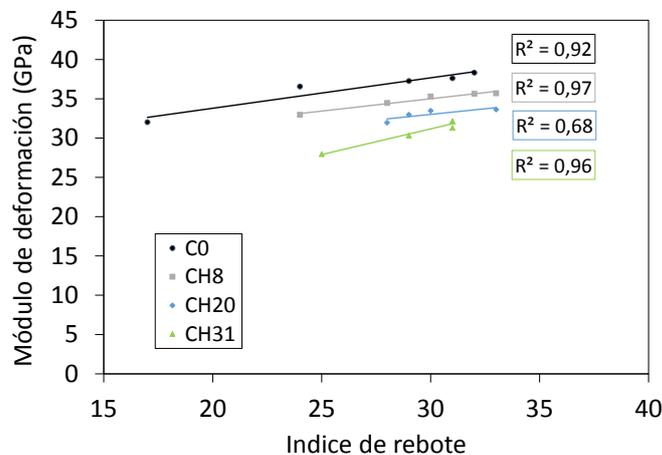


Figura 10.11. Módulo de deformación vs. índice de rebote (CO y CH)

- **Correlación de módulo de deformación con conductividad eléctrica interna**

En la figura 10.12 se puede observar la correlación entre módulo de deformación con la conductividad eléctrica interna, a partir de un valor de módulo de 20 GPa. Cuanto mayor es la cantidad de árido reciclado, menor es el módulo de deformación correspondiente a un mismo valor de conductividad (excepto para hormigones con porcentajes muy bajos de árido reciclado, con valores de módulo menores a 30 GPa). Por tanto, se observa una tendencia clara en la influencia del árido reciclado en la correlación entre módulo de deformación y conductividad eléctrica interna.

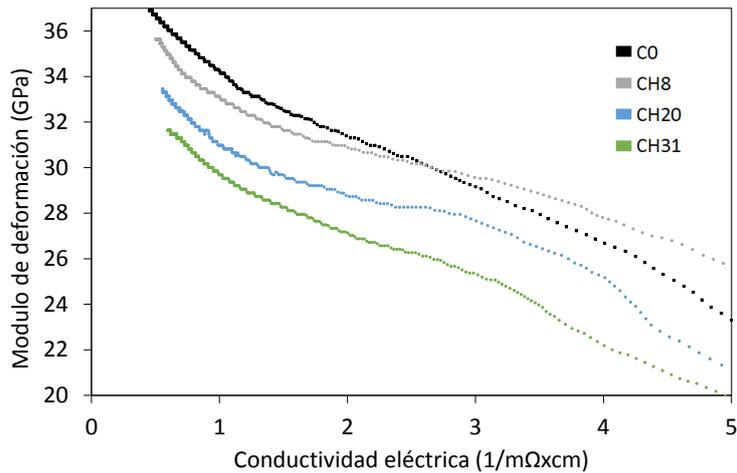


Figura 10.12. Módulo de deformación y conductividad (C0 y CH)

10.3.3. Influencia de la temperatura de curado en la evolución del módulo

Para los hormigones utilizados en las vigas doble T del capítulo 8 (C0 y CH8), además de todos los estudios expuestos anteriormente, también se ha estudiado la influencia de la temperatura de curado en la evolución del módulo. Para ello, además de la evolución del módulo de deformación mediante el EMM-ARM con vigas curadas a 20°C, también se ha monitorizado la evolución del módulo de deformación, con vigas de EMM-ARM curadas a 40°C. Tal y como se observa en la figura 10.13, las altas temperaturas producen una aceleración de la adquisición de módulo durante las primeras horas, pero el valor final es menor que el del hormigón curado a 20°C; este efecto negativo de las altas temperaturas también se observa en la resistencia a compresión en muchos casos, es el llamado “crossover effect”, referenciado en casos de estudio del efecto de temperaturas altas en resistencia a compresión ya en 1962 [ALEX62].

Con una temperatura de curado de 40°C la influencia del árido reciclado se observa desde edades más tempranas y la diferencia de módulo debido a la sustitución del árido reciclado es ligeramente superior a la observada en los hormigones curados a 20°C. La diferencia entre los valores de módulo obtenidos en hormigones curados a 20°C y los curados a 40°C se sitúa en torno a un 12%.

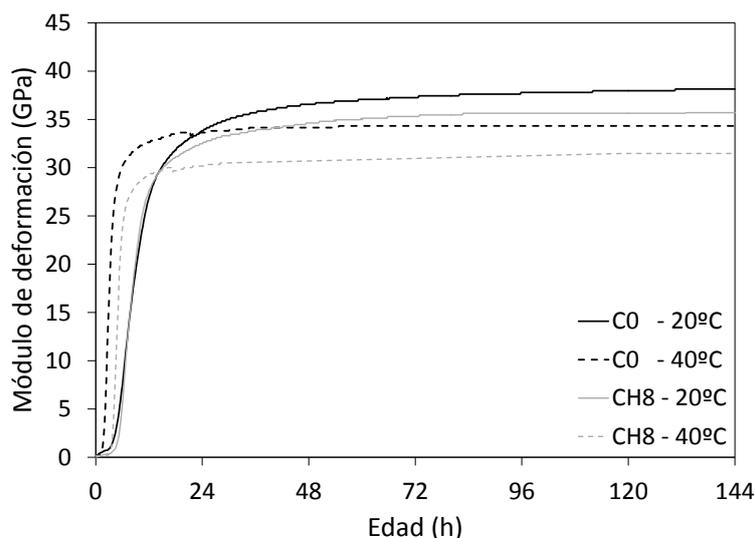


Figura 10.13. Evolución del módulo de deformación según temperatura de curado (CO y CH8)

En la figura 10.14 se muestra una gráfica donde se presentan en abscisas la edad equivalente frente a, en el eje de ordenadas, los valores del ratio módulo deformación en cada instante entre el módulo de deformación estabilizado de cada una de las temperaturas y hormigones.

La energía de activación utilizada en cada caso corresponde a la calculada para cada hormigón utilizando los valores de resistencia. Si bien hay estudios en los que se apunta que distintas propiedades pueden tener energías de activación distintas [ZHAN08], parece que en este caso, la energía de activación calculada para resistencias a compresión no difiere mucho que la correspondiente al módulo de deformación y es aplicable para calcular su edad equivalente: para distintas temperaturas, las curvas evolución del módulo relativo (ratio de módulo de deformación entre módulo de deformación estabilizado), son muy similares cuando se representan en función de la edad equivalente (siempre y cuando el ratio de módulos se calcule utilizando el valor de módulo estabilizado correspondiente al hormigón y a la temperatura correspondiente, teniendo en cuenta el efecto crossover), tal y como se puede comprobar en la figura 10.14.

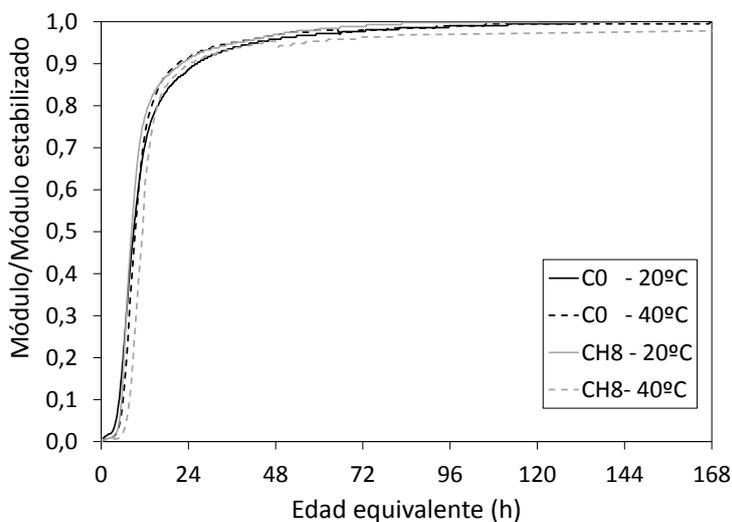


Figura 10.14. Evolución del módulo relativo frente edad equivalente

Es necesario apuntar que en el caso del CH8 con temperatura de curado 40 °C, durante las dos primeras horas de edad, la temperatura de curado fue de 20°C debido a contingencias operativas de puesta en marcha del ensayo. Este hecho se ha tenido en cuenta a la hora de hacer los cálculos de edad equivalente.

10.4. Influencia de los materiales reciclados en la relación de módulo de deformación y resistencia a compresión

- Hormigones con cenizas de biomasa

En la figura 10.15 se puede observar como la sustitución de cemento por cenizas de biomasa no influye de forma significativa en la correlación entre resistencia a compresión y módulo de deformación. Para una misma resistencia a compresión, el módulo correspondiente es ligeramente superior en los hormigones con cenizas de biomasa (variaciones menores al 5%). Por ello, se puede afirmar que las formulaciones aceptadas en las normativas para la estimación del módulo de deformación a partir de datos de la resistencia, también son aplicables para hormigones con cenizas de biomasa, tal y como se demuestra más adelante.

Se observa una relación polinómica de grado 2 (relación parabólica) entre la resistencia a compresión y el módulo de deformación sin tener en cuenta el contenido de adiciones de cenizas de biomasa (figura 10.15) con un R^2 de 0,97. Este ajuste también se aproxima bien a los resultados a 28 días de hormigones convencionales y hormigones con distintos porcentajes de cenizas volantes de carbón [YILD11]. Incluso para hormigones geopolímeros con cenizas volantes se proponen correlaciones polinómicas de grado dos (parabólica) para correlacionar resistencia a compresión y módulo de deformación y se obtienen R^2 mayores a 0,90 [PRAC14]. Con el ajuste lineal se obtiene un ajuste con un R^2 menor, pero aun así muy elevado (0,93).

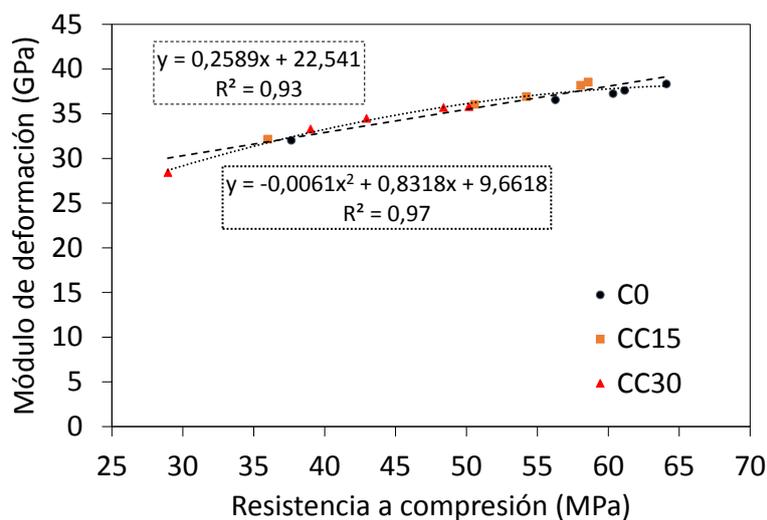


Figura 10.15. Módulo de deformación vs. resistencia a compresión (C0 y CC)

Existen estudios, como por ejemplo en desarrollado por Mesbah et al [MESB02] en los que se concluye que, a edades tempranas, el módulo es proporcional a la raíz cuadrada de la resistencia a compresión. En el Eurocódigo EC-2 se propone una ecuación (ecuación 10.1) que relaciona linealmente (sin término independiente) el módulo de deformación con la resistencia a compresión elevada a 0,3. La normativa

española EHE-08 propone una ecuación (ecuación 10.2) en la que el módulo de deformación es directamente proporcional a la raíz cúbica de la resistencia media del hormigón (a 28 días).

En la figura 10.16 se muestra el ajuste lineal imponiendo que el término independiente sea cero, es decir, se ha hallado la relación directamente proporcional entre el módulo de deformación y la raíz cúbica de la resistencia que minimiza el error cuadrático medio, con el fin de obtener una ecuación con la misma forma que la ecuación 10.2, lo que posibilita hacer una comparación del coeficiente obtenido con el propuesto en la normativa y comprobar si el modelo de expresión de la EHE-08 ofrece un buen ajuste, al hacer una corrección de su constante. Se consigue un ajuste con un R^2 de 0,88 y un error cuadrático medio de 0,36, por lo que se considera que es un ajuste aceptable.

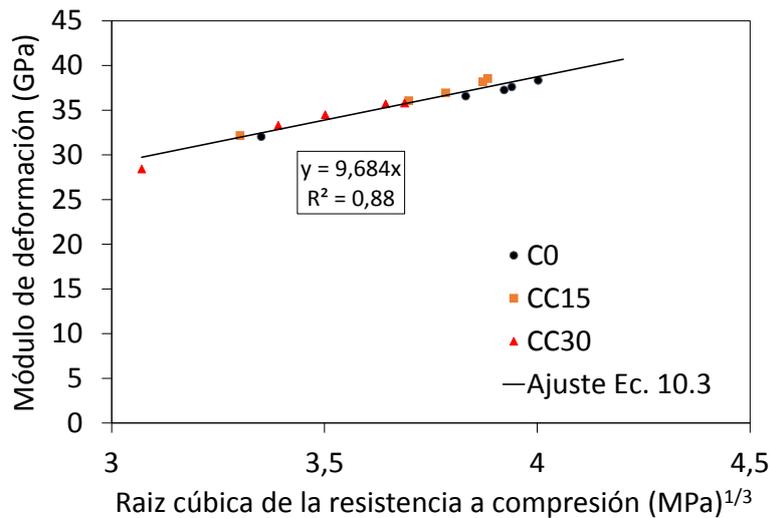


Figura 10.16. Módulo de deformación vs. raíz cúbica de la resistencia a compresión (C0 y CC)

La ecuación 10.3 muestra la relación hallada. Las fórmulas se han adaptado para que todos los módulos resulten en GPa y el dato de entrada, la resistencia a compresión, esté en MPa. De este modo se podrá comparar los resultados obtenidos con la ecuación de la normativa española EHE-08.

$$E_{cm} = 22 \times \left[\frac{f_{cm}}{10} \right]^{0,3} \quad (10.1)$$

$$E_{cm} = 8,500 \times \sqrt[3]{f_{cm}} \quad (10.2)$$

$$E_{cm} = 9,684 \times \sqrt[3]{f_{cm}} \quad (10.3)$$

Además, tanto la EHE-08 como el Eurocódigo, proponen unos coeficientes correctores en función del tipo de árido. Como es este caso el tipo de árido es cuarcítico, el coeficiente es 1 y no varía la expresión. Se observa que el coeficiente de la ecuación hallada (ecuación 10.3) es, aproximadamente, igual a 1,14 veces el módulo calculado según la normativa EHE-08 (ecuación 10.2), por lo que la expresión de la normativa queda del lado de la seguridad sin subestimar en exceso los valores de módulo.

Se concluye que las cenizas de biomasa no varían la correlación que existe entre el módulo de deformación y la resistencia a compresión, por lo que las formulaciones propuestas por la normativa

para la estimación del módulo de deformación en función de la resistencia a compresión son válidas para los hormigones con cenizas de biomasa.

- **Hormigones con árido reciclado de hormigón (fino y grueso)**

En la figura 10.17 se muestra la relación entre módulo de deformación y resistencia a compresión con dos ajustes (lineal y parabólico) independientemente del porcentaje de sustitución de árido reciclado. Con estos ajustes no se llega a un R^2 de 0,90. Con el fin de observar si esto se debe a la influencia del árido reciclado, en la figura 10.18 se muestran las relaciones entre módulo de deformación y resistencia a compresión para cada hormigón.

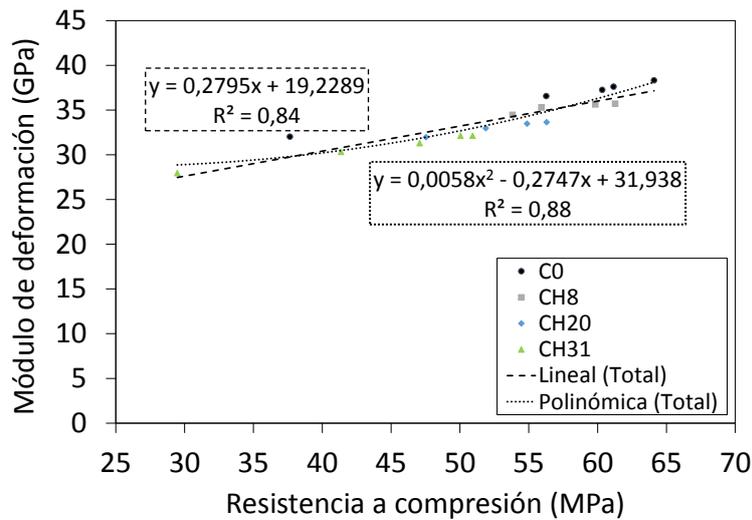


Figura 10.17. Módulo de deformación vs. resistencia a compresión (CO y CH)

Se observa que para una misma resistencia a compresión el módulo correspondiente es menor cuanto mayor es la cantidad de árido reciclado (figura 10.18). Este hecho es muy importante, ya que se concluye que la relación entre módulo de deformación y resistencia a compresión varía con la cantidad de árido reciclado, y si se utilizan las ecuaciones de estimación del módulo utilizando el dato de resistencia a compresión en hormigones con árido reciclado fino y grueso, se puede llegar a sobreestimar el módulo de deformación. Pese a ello, cabe apuntar que con un 31% de sustitución del árido total por árido reciclado fino y grueso de hormigón, no se observan errores de sobreestimación mayores del 10%. Para porcentajes mayores u otros áridos reciclados, es posible que las sobreestimación sea mayor y las ecuaciones que tradicionalmente relacionan el módulo de deformación con la resistencia a compresión no sean aplicables, debido a que arrojen resultados con una sobreestimación que pueda llegar a estar fuera del lado de la seguridad.

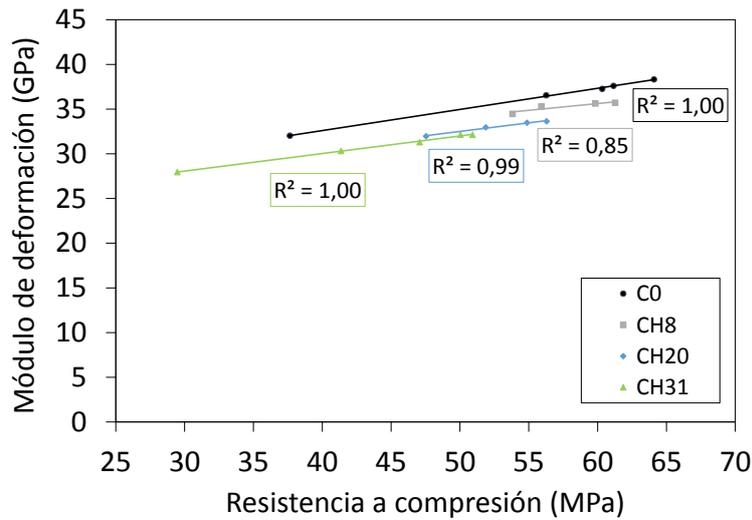


Figura 10.18. Módulo de deformación vs. resistencia para cada hormigón (CO y CH)

Tal y como expone en la EHE-08, el módulo de deformación tiene una marcada dependencia del tipo de árido con el que se ha fabricado el hormigón, por ello, se obtienen los resultados observados en la figura 10.18. Para algunos tipos de áridos se proponen unos factores de corrección, por ejemplo, para caliza normal 0,9 o para arenisca 0,7. En esta normativa no hay un coeficiente de corrección para hormigón hecho con árido reciclado. Sería de mucha utilidad tener ese coeficiente pero, debido a que existen multitud de tipos de árido reciclado en función del hormigón del que provengan, no parece posible poder hallar un único valor de corrección. No se han encontrado estudios anteriores sobre la influencia del árido reciclado fino y grueso de hormigón (de forma conjunta) en las correlaciones entre módulo de deformación y resistencia a compresión a edades tempranas.

Sí existen estudios sobre la influencia del árido reciclado grueso de hormigón en dichas correlaciones, sobre todo, a 28 días de edad. En algunos de ellos, se propone una corrección de las fórmulas de correlación mediante la inclusión una nueva variable: la densidad [ZILCO1, KATZ03, KAKI88]. La densidad varía de forma proporcional a la cantidad de árido reciclado reemplazado, por ello, añadiendo el factor de la densidad, se está teniendo en cuenta, en parte, la cantidad de árido reciclado. Otros autores proponen la inclusión de dos factores: la densidad y el porcentaje de sustitución de árido reciclado grueso de hormigón [LI08]. Una reciente investigación aplica programación genética para hallar una ecuación que correlaciona el módulo de deformación y la resistencia a compresión en función del porcentaje de sustitución de árido reciclado grueso y el ratio agua/cemento [GONZ16]. Si bien no se posee un número de datos suficientes de eco-hormigones con árido reciclado fino y grueso de hormigón como para extraer una formulación, con los datos obtenidos en el presente estudio se puede observar que una posible corrección de la fórmula, también se podría hacer con la densidad o bien con el porcentaje de sustitución de árido reciclado fino y grueso de hormigón, de forma similar a la desarrollada en las investigaciones anteriormente citadas para hormigones con árido reciclado grueso de hormigón. Tal y como se puede observar en la figura 10.18, la relación entre el módulo de deformación y la resistencia a compresión parece ser constante con la edad.

10.5. Conclusiones parciales de este capítulo

- **Conclusiones para hormigones con cenizas de biomasa**

La sustitución parcial de cemento por cenizas de biomasa tiene especial incidencia en la evolución del módulo de deformación y de la resistencia a compresión durante las primeras horas. Además, también influye negativamente en la velocidad de adquisición de módulo en su rama lineal. Pese a ello, el porcentaje de pérdida de módulo con respecto al CO disminuye fuertemente desde las 6 horas hasta 18 horas y se estabiliza en torno a una edad de 48 horas. Las pérdidas de módulo registradas a 7 días son despreciables para el CC15 y del 6% en el CC30. Por el contrario, las pérdidas de resistencia a compresión se cifran en un 7% de pérdida para el CC15 y un 23% de pérdida en el CC30. Por tanto, se puede concluir las cenizas de biomasa tienen una mayor influencia sobre la resistencia a compresión que sobre el módulo de deformación a edades tempranas. Según algunas investigaciones, la influencia de las cenizas volantes de carbón a edades tempranas en el módulo (a 7 días) y en la resistencia a compresión (a 3 y 7 días), es similar a la observada en este estudio para las cenizas de biomasa.

Con porcentajes altos (30%), las cenizas de biomasa influyen en las correlaciones de conductividad frente a módulo y de conductividad frente resistencia a compresión, mientras que, para porcentajes bajos (15%), su influencia en estas dos correlaciones es despreciable. Por el contrario, las cenizas influyen poco en la correlación entre velocidad de ultrasonidos y módulo de deformación, y es posible hacer una correlación conjunta con errores menores del 11% y un R^2 de 0,84.

En resumen, a edades tempranas, las cenizas de biomasa influyen en mayor medida en la resistencia a compresión que en el módulo de deformación (a partir de 24 horas), tanto en lo referente a su evolución como en lo referente a sus correlaciones con ensayos no destructivos. Por tanto, la propiedad de control prioritaria a edades tempranas en hormigones con cenizas de biomasa debe ser la resistencia a compresión, ya que se ve más afectada que el módulo de deformación.

Por último, cabe destacar que, la adición de cenizas de biomasa, no influye en el tipo de correlación que existe entre resistencia a compresión y módulo de deformación a edades tempranas. Por lo que se puede concluir que las fórmulas de estimación del módulo de deformación en función de un valor de resistencia a compresión conocido (o viceversa), desarrolladas para hormigones convencionales, son igualmente aplicables para hormigones con adiciones de cenizas de biomasa.

- **Conclusiones para hormigones con árido reciclado fino y grueso de hormigón:**

Durante las primeras horas no se observa influencia de los áridos reciclados. A partir de las 10-12 horas de edad se empiezan a observar notables diferencias en el módulo de deformación: a mayor porcentaje de sustitución de árido reciclado, menor es el módulo de deformación. A partir de 24 horas la disminución de módulo guarda una cierta proporcionalidad con el porcentaje de sustitución de árido reciclado.

La sustitución de árido natural por árido reciclado influye de forma clara en las correlaciones del módulo de deformación con distintos ensayos no destructivos: velocidad de ultrasonidos, índice de rebote y conductividad eléctrica interna. En los tres casos se observa que, para un mismo valor del ensayo no destructivo, el módulo correspondiente es menor cuanto mayor es la cantidad de árido reciclado, por tanto, se observa un “descenso” en las curvas de correlación de módulo de deformación frente a ensayos no destructivos.

En cuanto a la influencia de un incremento de la temperatura en la evolución del módulo, se observa que las altas temperaturas producen una aceleración de la adquisición de módulo durante las primeras horas, pero el valor final es menor que el del hormigón curado a 20°C; este efecto negativo de las altas temperaturas también se observa en la resistencia a compresión en muchos casos, es el llamado "crossover effect". Con una temperatura de curado de 40°C, la influencia del árido reciclado se manifiesta desde edades más tempranas y la diferencia de módulo debido a la sustitución del árido reciclado es ligeramente superior a la observada en los hormigones curados a 20°C. La diferencia entre los valores de módulo obtenidos en hormigones curados a 20°C y los curados a 40°C se sitúa en torno a un 12%.

En lo referente a la relación entre módulo de deformación y resistencia a compresión a edades tempranas, cabe destacar que se observa, para una misma resistencia a compresión, el módulo de deformación correspondiente es menor cuanto mayor es la cantidad de árido reciclado.

Cabe destacar que, tanto en los hormigones con cenizas de biomasa como en los hormigones con árido reciclado se observa que la relación entre módulo de deformación frente a resistencia a compresión parece ser prácticamente constante con la edad y, por tanto, no parece necesario la inclusión de la edad como variable, pese a estar estudiando las correlaciones a edades tempranas.

Capítulo 11. Propuesta de nuevo procedimiento para mejora del control de calidad para grandes obras

Capítulo 11. Propuesta de nuevo procedimiento para mejora del control de calidad para grandes obras

11.1. Introducción

Aplicando los conocimientos desarrollados en esta tesis, se propone el desarrollo de un nuevo procedimiento para el control de calidad y la caracterización de hormigones de grandes obras o de plantas de prefabricados. Esta caracterización supondría un valor añadido tanto a largo plazo, como a corto plazo. En apartados posteriores se expondrán las ventajas que supone desarrollar este tipo de caracterización.

El objetivo es confeccionar unas fichas técnicas de cada hormigón en las que, no solo aparecería la resistencia característica, consistencia, etc. sino que se incluirían características propias del hormigón que son de gran utilidad tanto a corto plazo como a largo plazo, tales como energía de activación, curvas de correlación de la resistencia a compresión (y con el módulo de deformación) con ensayos no destructivos en función de la temperatura de curado.

Para desarrollar esta caracterización habría que hacer la serie de ensayos que se ha desarrollado en el hormigón convencional (patrón de los hormigones con ceniza de biomasa). Se obtendrían unas gráficas que correlacionan los resultados de ensayos no destructivos con la resistencia a compresión en función de la temperatura de curado y de la relación a/c, de forma que, sabiendo ambos datos de los puntos críticos de una estructura, se podría estimar de forma mucho más fiable la resistencia in situ de del hormigón en cualquier punto de la estructura y a cualquier edad.

Estas gráficas junto a los datos que se obtienen al hacer el estudio de la influencia de la temperatura (energía de activación y coeficiente cinético propuesto en esta tesis) conforman una ficha técnica de caracterización del hormigón mucho más útil que las convencionales

El desarrollo de esta investigación, **permite conocer la resistencia a compresión del hormigón in situ** mediante ensayos no destructivos en cualquier punto de la estructura y en cualquier momento.

11.2. Utilidad y ventajas

11.2.1. A corto plazo

A corto plazo, conocer la resistencia in situ es de gran interés, ya que se **incrementa la seguridad y posibilita la reducción de los tiempos de ejecución** al conocer el momento exacto en el que el hormigón ha alcanzado la resistencia adecuada para descimbrar y/o transferir el pretensado, por ejemplo.

11.2.2. A largo plazo

A largo plazo, tener las fichas técnicas del hormigón que contengan las tablas de correlación de ensayos no destructivos será de **gran interés a la hora de tener que reforzar, rehabilitar o ampliar una estructura**. Es común que, cuando se tiene que rehabilitar o ampliar una estructura ya construida, sea necesario extraer testigos de la estructura a los que se le hacen ensayos no destructivos y se ensayan a compresión con el fin de obtener unos puntos que permitan hacer una curva de correlación entre ambos. Posteriormente, mediante la realización de ensayos no destructivos en distintos puntos de la estructura, se hace una estimación de la resistencia del hormigón de la estructura sirviéndose de la curva confeccionada con los pocos datos que se pueden extraer de un número muy limitado de testigos. Gracias a la caracterización que se propone, esas curvas de correlación ya estarían hechas, **se reduce el número de testigos necesarios y, al mismo tiempo, se aumenta en gran medida la precisión de la estimación de la resistencia**.

11.3. Descripción de ensayos necesarios

11.3.1. Determinaciones previas y equipos necesarios

- Determinaciones previas:

En primer lugar se hacen las amasadas de prueba necesarias para comprobar que el hormigón tiene las propiedades requeridas en obra (trabajabilidad y propiedades mecánicas) y, posteriormente se comprueba que en planta los resultados son similares y admisibles. Para ello es necesario controlar la evolución de las resistencias de las amasadas durante varios días, para comprobar si existe una variabilidad importante debida a la variación humedad de los áridos a lo largo de un día o entre distintos días. Es importante tener en cuenta que la humedad de los áridos varía a lo largo del día debido a que durante la noche o en durante periodos largos de parada, el agua va depositándose en la parte inferior del silo. Debido a que la relación agua/cemento influye en todos los aspectos, siempre que se pueda, se debe tener en cuenta la humedad de los áridos en cada amasada. En caso de no poder tener controlada esta variable, hay que tener en cuenta la incertidumbre que esto produce y suponer que el hormigón tiene la mayor relación agua/cemento en función de la humedad máxima de árido que se haya medido.

Para poder desarrollar este control de calidad es necesario fijar la temperatura máxima y mínima que se van a estudiar.

- La temperatura mínima debe ser similar a la temperatura ambiente mínima, en la zona de sombra, del lugar donde se producirá el curado de la estructura. Si se dispone de datos históricos de la fábrica o zona, se puede determinar en base a ellos. En caso contrario se puede hacer una estimación en función de la experiencia. 5°C puede ser una buena temperatura mínima, teniendo en cuenta que con temperaturas más bajas empieza a ser muy desaconsejable el hormigonado debido al riesgo de congelación del agua.

- La temperatura máxima debe ser similar a la que se espera en el interior de la estructura durante el proceso de fraguado. Esta temperatura depende en gran medida del tipo de hormigón y del espesor de la estructura en cada punto. Temperaturas entre 40°C y 60°C son habituales.

- **Equipos necesarios:**

- Moldes cúbicos, de medidas adecuadas en función del tamaño máximo de árido. Para tamaños de árido mayores, el procedimiento deberá adaptarse a los medios de los que se disponga. Se necesitan el número de moldes necesarios para poder fabricar un total de 63 probetas que puedan ser agrupadas en tres grupos de 21 probetas nada más se haya acabado el hormigonado.
- Tres cámaras de curado de probetas que alcancen las temperaturas necesarias.
- Baño termostático que alcance la temperatura más elevada de las fijadas.
- Recipientes de agua para el curado de las probetas de la temperatura estándar y temperatura baja.
- Equipo para medición de ultrasonidos, con transductores de 54 kHz y gel acoplador.
- Martillo para determinación del índice de rebote.
- Báscula
- Amasadora
- Registrador de humedad y temperatura ambiente
- Registrador y sensores de temperatura interna

11.3.2. En laboratorio: caracterización complementaria del hormigón

En el caso de un hormigón que va a ser empleado en una gran obra o de un hormigón que se emplea de forma continuada en una fábrica de prefabricados, tener una caracterización completa el hormigón empleado puede producir una mejora sustancial del control de calidad en obra o en fábrica. Lejos de ser un gasto extra, puede suponer un importante ahorro de tiempo y dinero. Una vez se tiene una buena dosificación, ajustada según los métodos pertinentes y que cumple las especificaciones de trabajabilidad y tenga las propiedades que se desean, se aconseja hacer una caracterización complementaria.

Para ello, son necesarias tres amasadas de 75 litros de hormigón para la fabricación de 63 probetas (6 de ellas instrumentadas con sensor de temperatura interna) y el ensayo del cono de Abrams (hormigón vibrado) o el ensayo de la torta (hormigón autocompactante). Una amasada tendrá la composición teórica del hormigón. Y se harán otras dos con relaciones a/c ligeramente distintas en función de la variabilidad observada en planta. En el caso de que la planta desarrolle un buen control de la humedad de los áridos y lo tenga en cuenta a la hora de adicionar el agua correspondiente en cada amasada, podría ser necesaria una única amasada de 75 litros. Es importante que se anote el día y hora en el que el cemento entra en contacto con el agua, ya que ese será el instante cero desde el cual se calcularán las edades reales.

Las 63 probetas se dividen en tres grupos de 21 probetas. Un grupo para cada temperatura de curado: mínima, estándar (20°C) y máxima. Durante todo el proceso de amasado y curado, un sensor de humedad y temperatura externa acompaña a cada grupo de probetas. Nada más se acaban de fabricar, se cubren con un paño húmedo que está a la temperatura correspondiente de curado de cada grupo, se envuelven en plástico y se llevan a la cámara de temperatura controlada correspondiente. En cuanto se pueden desmoldar, se desmoldan, se pesan y se sumergen en agua, en su correspondiente cámara

de curado (la de temperatura máxima, una vez desmoldada, se cura en un baño termostático de temperatura controlada).

La edad de desmoldeo depende en gran medida de la temperatura de curado. Las probetas curadas a alta temperatura se pueden desmoldar antes de un día; por ejemplo, probetas curadas a 45°C suelen poder desmoldarse a partir de 8-10 horas. Las probetas curadas a 20°C a 1 día y las de 5°C es recomendable esperar a la edad de 2 días.

Se ensayan 3 probetas de cada temperatura a 6 edades: 5 edades tempranas entre 1 y 7 días, y la edad de referencia 28 días. A cada probeta se le hacen tres ensayos: esclerómetro [EN 11] ultrasonidos [EN 12] y resistencia a compresión [EN 15]. Las 3 probetas restantes de cada temperatura (2 de ellas con sensor de temperatura interna) se ensayan a edad igual o superior a 90 días, para obtener la resistencia estabilizada próxima a la resistencia a tiempo infinito.

De este modo, además de la composición del hormigón, para cada probeta se tendrán los datos que figuran en la tabla 11.1 de ejemplo de toma de datos. Es solo un ejemplo y, en realidad, el apartado de índice de rebote debe ser más amplio ya que se hacen un mínimo de 9 medidas por probeta.

Tabla 11.1. Ejemplo de toma de datos

Nombre probeta	Tipo de hormigón	Relación agua/cemento	Tª de curado	Densidad	Edad real	Velocidad de ultrasonidos	Índice de rebote	Resistencia a compresión

Con los datos obtenidos, se puede obtener la energía de activación calculada según la ASTM C1074-11, tal y como se describe en el capítulo 2 de la presente tesis. Con dicha energía de activación se puede calcular la edad equivalente de cada una de las probetas ensayadas. Así mismo, se pueden hallar las constantes de los modelos de estimación de la resistencia que minimicen el error cuadrático medio, tal y como se hace en el capítulo 8 de la presente tesis.

Debido a que también se ha obtenido la evolución de la temperatura interna de las probeta de cada temperatura de curado, gracias a la instrumentación de temperatura interna, se puede hallar el factor tiempo-temperatura, tal y como se describe en el capítulo 2 de la presente tesis.

11.3.3. En obra

La humedad y temperatura ambiente de la zona de la obra se mide y se registra en distintos puntos de la obra.

Antes del hormigonado, se colocarán sensores de temperatura interna en diversas zonas de la estructura, en las zonas que se prevean más frías y más calientes, teniendo en cuenta la orientación de la estructura y el volumen de hormigón que rodea a cada punto de medida. Es necesario recordar que las bajas temperaturas pueden producir bajas de resistencia importantes con respecto a la resistencia de las probetas curadas a 20°C, sobre todo durante los primeros días. Así mismo, las zonas donde el hormigón alcanza grandes temperaturas, a largo plazo, pueden tener una resistencia menor que las probetas curadas a temperatura estándar (efecto crossover).

Es necesario tener en cuenta la necesidad de poder acceder a la zona correspondiente tanto para la instalación de los sensores como posteriormente para la descarga de datos y recuperación de las cajas

de registro. Si es posible, se intentará elegir zona donde se puedan hacer, además, ensayos de índice de rebote y velocidad de ultrasonidos (en la medida de lo posible, se intentará hacer medidas directas de ultrasonidos, entre dos caras paralelas).

La densidad se calcula con las probetas de control cúbicas, fabricadas en obra y curadas a la temperatura ambiente de obra, a poder ser, en zona de sombra e instrumentadas con sensores de temperatura interna.

Con estos datos se puede proceder a la estimación de la resistencia. En función de ciertos condicionantes, se adapta la forma de estimar la resistencia. Se describen cuatro posibles escenarios:

- **Opción 1.** Si se ha desarrollado previamente la caracterización completa del material y además se tiene acceso a la zona de la estructura para poder efectuar los ensayos no destructivos de índice de rebote y velocidad de ultrasonidos.

En este caso, que es el más idóneo pero el menos probable, se obtienen los datos de velocidad de ultrasonidos, resistencia a compresión e historial de temperatura y, con ello, se estima la resistencia a compresión mediante la formulación ajustada en laboratorio para este hormigón concreto.

- **Opción 2.** Si se ha desarrollado previamente la caracterización completa del material pero no se pueden efectuar los ensayos no destructivos de índice de rebote y velocidad de ultrasonidos.

En este caso, se puede aplicar el método de la madurez para la estimación de la resistencia a compresión, mediante la utilización del modelo hiperbólico o el exponencial, por ejemplo, tal y como se hace en el capítulo 8.

- **Opción 3.** No se ha desarrollado previamente la caracterización completa del material pero se pueden efectuar los ensayos no destructivos de índice de rebote y velocidad de ultrasonidos.

En este caso, con las probetas de control se comprueba si la formulación propuesta en el capítulo 9 de la presente tesis, obtenida mediante programación genética orientada y penalizada para evitar grandes sobreestimaciones. Si es así, se aplica esta formulación para la estimación de la resistencia en obra. Estas formulaciones no utilizan la edad equivalente calculada con la energía de activación, por lo que se pueden utilizar pese a no haber hecho la caracterización complementaria que se indica en el apartado 11.3.2. Esta formulación tiene en cuenta la influencia de la temperatura mediante el factor tiempo-temperatura que, pese a no ser ligeramente menos exacto que el índice de madurez calculado mediante la formulación de Arrhenius, da buenos resultados, si necesidad de hallar la energía de activación.

En caso de que en la comprobación del modelo con las probetas de obra se obtenga una sobrestimación de la resistencia, será necesaria la calibración del modelo MN9 propuesto en el capítulo 9, utilizando los resultados obtenidos con las probetas de control.

- **Opción 4.** No se ha desarrollado previamente la caracterización completa del material y no se pueden efectuar los ensayos no destructivos de índice de rebote y velocidad de ultrasonidos.

Este es el peor de los casos, ya que apenas se tienen datos. En este caso se puede aplicar el modelo exponencial y el hiperbólico, calculando el índice de madurez mediante el factor tiempo-temperatura y hallando las constantes del modelo escogido según los resultados de las probetas de control obra.

11.3.4. En fábrica de prefabricados

11.3.4.1. Opción 1: tabla de temperaturas y madurez correspondiente

A edades tempranas, las bajas temperaturas pueden ralentizar mucho la evolución de las propiedades mecánicas del hormigón y producir problemas debido a ello. Para poder desmoldar, transferir el pretensado, transportar las piezas a un acopio, etc., es necesario que el hormigón haya adquirido una cierta resistencia. Por ello, para evitar problemas debidos a las bajas temperaturas, se propone desarrollar una serie de tablas para el hormigón utilizado en la fábrica correspondiente de manera que los operarios, sin necesidad de hacer cálculos, puedan comprobar si ya se puede hacer una determinada operación (transferir el pretensado, por ejemplo), solo teniendo en cuenta la temperatura de curado. Por ello, es necesario tener monitorizada la temperatura de curado y tomar la menor que se haya alcanzado o bien una cercana (para estar del lado de la seguridad) o bien tomar la temperatura media. Debido a que el fraguado del hormigón es un proceso exotérmico, siempre y cuando la dimensión máxima de la probeta sea menor que la dimensión mínima de la pieza, una probeta curada en el mismo ambiente que la pieza prefabricada, estará sometida a un historial de temperaturas igual o inferior al del hormigón de la pieza prefabricada, por lo que la estimación de la resistencia teniendo en cuenta el historial de temperaturas internas de la probeta estará del lado de la seguridad.

Para ello es necesario haber desarrollado antes la caracterización completa del hormigón descrita en el apartado 11.3.2., de forma que se ha obtenido la energía de activación y el valor de las constantes del modelo elegido, de forma que se minimice el error cuadrático medio. Con estos datos se puede hacer una estimación de la resistencia a compresión y completar una tabla en la que se recoja cual es la resistencia estimada a cada edad en función de la temperatura de curado.

- Pasos a seguir para desarrollar la tabla:

I- *Hacer la caracterización complementaria del hormigón descrita en el apartado 11.3.2 (no necesaria la parte de ensayos no destructivos en este caso) para el cálculo de la energía de activación según ASTM C1074-11 [RN04], tal y como se explica en el capítulo 2.*

II- *Elegir el modelo de estimación y calcular el valor de las constantes que minimice el error cuadrático medio.*

Para ello, previamente se debe elegir el modelo de estimación de la resistencia a compresión. Dos modelos habituales son el modelo exponencial (2.2) y el modelo hiperbólico (2.7).

III- *Aplicar el modelo y hacer la tabla de estimación*

Con el dato de “k” o “A” y el dato de la energía de activación, se puede calcular la resistencia a compresión estimada para cada edad real, en función de cual sea la temperatura de curado.

En la tabla 11.2 se muestra un ejemplo de tabla de estimación de la resistencia a compresión para bajas temperaturas, para cada edad en función de la temperatura de curado, utilizando el modelo hiperbólico.

Tabla 11.2. Ejemplo de tabla de resistencias estimadas para temperaturas bajas (MPa)

	Edad real (horas)								
	8 h	16 h	24 h	32 h	40 h	48 h	56 h	64h	72 h
5 °C									
7 °C									
9 °C									
11 °C									
13 °C									
15 °C									
17 °C									
19 °C									
21 °C									

Otra opción alternativa a esta tabla podría ser la de desarrollar un simple programa que se alimente de los datos de temperatura ambiente que se van registrando y avise cuando la resistencia a compresión llegue a un cierto valor, que puede ser por ejemplo, el valor necesario para desmoldar o transferir. Una vez implementado, los operarios únicamente tendrían que esperar al aviso del programa. Para evitar posibles errores, es posible que se haga una doble ejecución del programa y que cada ejecución se alimente de los datos de temperatura de sensores independientes, de manera que el programa solo avise cuando ambas ejecuciones lleguen al valor deseado. De esta manera la estimación sería mucho más ajustada al valor real, ya que se tendría en cuenta el historial de temperaturas a la hora de calcular el valor del índice de madurez como el producto de la temperatura de referencia por la edad equivalente calculada mediante la ecuación 2.5, cuyo resultado se utiliza para el cálculo de la estimación de la resistencia mediante un cierto modelo, que puede ser, por ejemplo, el modelo exponencial (ecuación 2.2) o el modelo hiperbólico (ecuación 2.7).

11.3.4.2. Opción 2: aplicación del método combinado

Existen dos posibles métodos, en función de si se ha desarrollado o no la caracterización complementaria descrita en el apartado 11.3.2.

Opción 2-a. Si se ha desarrollado la caracterización complementaria del hormigón.

En este caso, se pueden hallar los coeficientes del modelo M_{N9} que minimicen el error cuadrático medio de las estimaciones (véase capítulo 9). De este modo, se obtendrá una ecuación de estimación de la resistencia a compresión en función de los resultados de ensayos no destructivos y de la temperatura de curado. Otra variante de esta misma opción es la de hacer un programa muy sencillo en el que, introduciendo los datos de roturas y ensayos no destructivos obtenidos según la caracterización completaría descrita en el apartado 11.3.2, calcule los valores de los coeficientes del modelo M_{N9} (que utiliza la definición de edad equivalente de Arrhenius). Si no se ha calculado la energía de activación o no se quiere utilizar por algún motivo, se puede utilizar el modelo M_{N10} , que utiliza el factor tiempo-temperatura. Este mismo programa puede alimentarse con los datos del historial de temperatura en obra y de los datos de velocidad de ultrasonidos e índice de rebote que el operario vaya introduciendo (junto con la hora a la que se hicieron) de forma que se pueda hallar de forma automática y simple la resistencia estimada y se puedan hacer las operaciones correspondientes, como puede ser, por ejemplo, transferir el pretensado, de forma segura.

Opción 2-b. Si no se ha desarrollado la caracterización complementaria del hormigón

En este caso, se recomienda el uso de la ecuación propuesta en el capítulo 9 para la estimación de la resistencia a compresión, diseñada para una estimación del lado de la seguridad. Antes de su aplicación será necesario comprobar que las estimaciones son iguales o menores a los valores reales obtenidos en las probetas de control en obra. La ecuación para la estimación del lado de la seguridad, hallada mediante la aplicación de Programación Genética orientada en el capítulo 9 (ecuación 9.5), se muestra como ecuación 11.1 del presente capítulo.

$$\hat{S} = (4 \cdot \rho + 7) \cdot UPV + 2,86282 \cdot \ln\left(\frac{FTT}{T_r}\right) + (2 \cdot \rho - 68,1280) \cdot AC' + 0,00663007 \cdot R^2 - 11,6191 \quad (11.1a)$$

Siendo:

$$AC' = \frac{W}{C + \left(0,2 \cdot ASH \cdot \frac{T}{20}\right) + F} \quad (11.1b)$$

Si se aplica dicha ecuación, teniendo en cuenta el historial de temperaturas y los resultados de UPV e índice de rebote, la dosificación y la densidad del hormigón, se obtienen unas estimaciones de resistencia que deberían estar del lado de la seguridad, si bien es recomendable comprobar la validez de la fórmula con los resultados obtenidos en probetas de control.

11.3.4.3. Ejemplos de aplicación

Ejemplo de la opción 1. Tabla de temperaturas y madurez correspondiente

1- Caracterización complementaria (no necesarios END) y cálculo de la energía de activación

Se desarrolla el ejemplo con los datos del hormigón C0. En la tabla 11.3 se recogen los datos de resistencia a compresión de este hormigón (junto con los datos de ensayo son destructivos, que no serían necesarios en esta modalidad).

La relación agua/cemento es de 0,45 y la densidad media resultante es de 2480 kg/m³.

A continuación se calcula la energía de activación según la ASTM C1074-11. Tal y como se ha explicado en el capítulo 2, para el cálculo de la energía de activación según dicha ASTM simplemente hay que seguir los siguientes pasos:

1º- Hallar los valores de “k”. Para cada temperatura de curado, se representa en el eje de abscisas los valores de la inversa de la edad y en ordenadas los valores de la inversa de la resistencia. Se halla la recta de ajuste. El valor “k” es el cociente de ordenada en el origen entre pendiente de la recta correspondiente. Para cada temperatura se obtiene un valor de “k”.

2º- Cálculo de “Q”. Se representa en abscisas la inversa de la temperatura en kelvin y en ordenadas el logaritmo neperiano de los valores de “k” correspondientes. La pendiente de la recta de ajuste es igual al valor opuesto de “Q”.

3- Cálculo de la energía de activación. La energía de activación es igual a Q entre la constante de los gases.

Tabla 11.3. Resultados de los ensayos de la caracterización complementaria del hormigón C0

Temperatura (°C)	Edad (días)	Resistencia (MPa)	Velocidad de Ultrasonidos (m/s)	Índice de rebote
5	1,93	36,95	4785	-
	2,93	47,84	4902	23
	3,80	55,96	5058	26
	6,70	63,60	5157	31
	29,75	73,74	5435	32
20	0,76	37,64	4464	17
	1,98	56,26	4785	24
	2,94	60,34	5025	29
	3,81	61,16	5025	31
	6,72	64,10	5123	32
	29,74	75,31	5399	36
45	0,73	52,80	4674	28
	1,97	59,90	4757	34
	2,93	60,79	4814	35
	3,79	61,95	4902	35
	6,72	65,90	4965	36
	29,76	73,50	5092	38

Todos los datos correspondientes al cálculo de la energía de activación se recogen en la tabla 11.4.

Tabla 11.4. Cálculos para hallar la energía de activación

Temperatura (°C)	5	20	45
Pendiente	0,02801	0,00993	0,00335
Ordenada en origen	0,01172	0,01338	0,01467
k	0,41831	1,34828	4,37383
Ln (k)	-0,87153	0,29883	1,47564
1 / T ^a (1/Kel)	0,00360	0,00341	0,00314
S _∞ (MPa)	80,9	80,0	73,5
Resultados totales	Pendiente (-Q)	-5129,21	
	R (gases)	8,314462	
	Ea (J/mol)	42647	

Por tanto, el valor de la energía de activación que se ha obtenidos es de 42,65 kJ/mol.

II- Elegir el modelo de estimación y calcular el valor de las constantes que minimice el error cuadrático medio.

En el ejemplo se escoge el modelo hiperbólico. El valor de “A” que minimiza el error cuadrático medio para los datos del ejemplo es 4,41.

III- Aplicar el modelo y hacer tabla de estimación

Con el dato de “A”, el de S_{∞} y el de la energía de activación se puede calcular la resistencia a compresión estimada para cada edad real, en función de cual sea la temperatura de curado. S_{∞} varía muy levemente entre las probetas curadas a 5°C y las curadas a 20°C, se toma el valor de 20°C por ser el más bajo entre los obtenidos a 5 y a 20°C.

En la tabla 11.5, se muestra un ejemplo de tabla de estimación de la resistencia a compresión, para cada edad en función de la temperatura de curado, utilizando el modelo hiperbólico. Se supone que a partir de 35 MPa se pueden eliminar los costeros del molde y, a partir de los 45 MPa se puede transferir el pretensado y transportar las piezas prefabricadas al acopio (estos valores de resistencias son arbitrarios y no responden a la realidad, solo se utilizan para poner un ejemplo de cómo se marcarían en la tabla dos valores relevantes según las exigencias de la fábrica y de las piezas).

Tabla 11.5. Resistencia a compresión estimada para temperaturas bajas (MPa)

	Edad real (horas)								
	8 h	16 h	24 h	32 h	40 h	48 h	56 h	64	72 h
5 °C	10,00	17,78	24,01	29,10	33,34	36,93	40,01	42,67	45,01
7 °C	11,21	19,67	26,28	31,58	35,93	39,56	42,64	45,28	47,58
9 °C	12,53	21,66	28,62	34,09	38,51	42,16	45,21	47,81	50,05
11 °C	13,94	23,74	31,01	36,62	41,07	44,70	47,70	50,24	52,41
13 °C	15,45	25,90	33,44	39,14	43,59	47,17	50,10	52,56	54,64
15 °C	17,07	28,13	35,89	41,63	46,04	49,55	52,40	54,76	56,75
17 °C	18,77	30,41	38,33	44,07	48,42	51,83	54,57	56,83	58,72
19 °C	20,57	32,73	40,75	46,45	50,70	54,00	56,63	58,77	60,56
21 °C	22,45	35,06	43,14	48,75	52,88	56,05	58,55	60,58	62,26

En azul se ha marcado el primer valor que cumple la resistencia mínima para poder retirar los costeros (valor ficticio mayor o igual a 35 MPa). En amarillo se han marcado marcan el primer valor que cumple la resistencia mínima para poder transferir el pretensado y transportar las piezas prefabricadas a la zona de acopio (valor ficticio mayor o igual a 45 MPa). De este modo, los operarios tienen una orientación rápida de cuál es la edad mínima a la que pueden hacer ciertas operaciones con seguridad, simplemente sabiendo cual ha sido la temperatura media y/o mínima (si se toma la mínima, se está siendo muy conservador, con la temperatura media, se está ajustando bastante el resultado; la decisión de tomar uno u otro valor dependerá de la política de la empresa y de experiencias anteriores).

Ejemplo de la opción 2a. Método combinado si se ha desarrollado caracterización complementaria.

Se ha tomado como modelo de referencia el modelo M_{N9} descrito en el Capítulo 9. Los coeficientes del modelo se han calculado de modo que minimizan el error cuadrático medio de la estimación de las probetas ensayadas. De este modo, aplicando este método para los resultados del hormigón C0 se

obtiene la ecuación de estimación de la resistencia a compresión mediante el método combinado (ecuación 11.2).

$$\hat{s} = 0,01955 \cdot UPV + 2,96718 \cdot \ln(t_e) - 0,02164 \cdot AC \cdot \rho + 0,00549 \cdot R^2 - 22,19 \quad (11.2)$$

donde:

\hat{s} = resistencia estimada (MPa) t_e = edad equivalente (ecuación 2.5) (días)

UPV= velocidad de ultrasonidos (m/s) AC= agua/cemento

R = índice de rebote ρ =densidad (kg/m³)

Teniendo en cuenta el historial de temperatura en fábrica desde el momento del hormigonado, los valores de velocidad de ultrasonidos y de índice de rebote (medidos en la estructura en las zonas que se supongan más expuestas a bajas temperaturas), la dosificación y la densidad del hormigón, se obtienen las estimaciones recogidas en la tabla 11.6. Como ya se ha comentado anteriormente, debido a que el fraguado del hormigón es un proceso exotérmico, la temperatura ambiente será menor que la temperatura interior del hormigón, por lo que tomar como temperatura del hormigón la temperatura ambiente, es una hipótesis que da como resultado una estimación del lado de la seguridad, si se trata de un hormigonado con tiempo frío, que es el caso en el que se encuadra este ejemplo (en tiempo caluroso, los puntos calientes dentro del hormigón pueden alcanzar temperaturas muy elevadas que provoquen una bajada de la resistencia a compresión a largo plazo, con respecto a la resistencia a compresión del mismo hormigón curado a temperaturas más bajas, es lo que se llama el efecto crossover).

Se han tomado medidas de ultrasonidos en cuatro puntos de la viga y se ha comprobado que la dispersión es poca o ninguna. Así mismo se ha hecho el ensayo para la determinación del índice de rebote en dos zonas distintas de la viga y se ha observado que los valores son similares. Con los valores medios, se calcula la resistencia estimada aplicando la ecuación de estimación ajustada (ecuación 11.2).

Tabla 11.6. Datos tomados pieza prefabricada y resultados de estimación con ecuación 11.2

Edad real (días)	T ^a media intervalo (°C)	UPV	Índice de rebote	Resistencia estimada (MPa)
1,21	10,1	4381	-	38,17
2,20	8,9	4497	36	49,08
3,06	9,9	4749	40	56,58
5,88	4,9	4885	40	60,63
34,00	10	5030	41	69,00

En la figura 11.1 se muestra una gráfica comparativa de los resultados de estimación del hormigón de la pieza prefabricada con método combinado, según tabla 11.5 (tomando como temperatura media 9°C) comparados con los resultados obtenidos de los ensayos de las probetas de control curadas a 5°C y a 20°C (temperaturas entre las que se encuentra la temperatura media ambiente durante el curado de la pieza). Se puede observar como la resistencia estimada con el método combinado se sitúa entre ambas curvas de resistencia real, tal y como era de esperar teniendo en cuenta las temperaturas medias

ambiente durante el curado de la pieza. Parece que la estimación con método combinado se adapta mejor a la posible realidad de evolución del hormigón de la pieza.

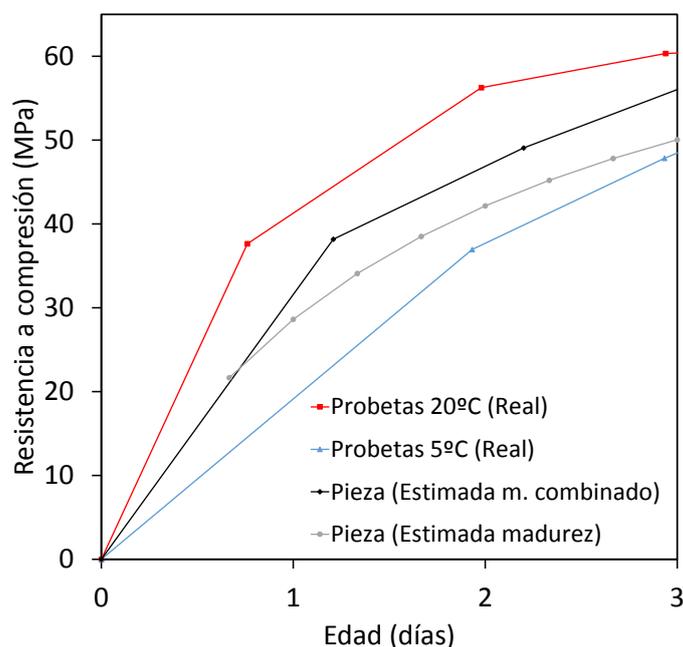


Figura 11.1. Comparación de la evolución de la resistencia estimada de pieza y real en probetas

Ejemplo de la opción 2b. Método combinado sin caracterización complementaria.

Aplicando la ecuación de estimación de resistencia a compresión hallada mediante Programación Genética orientada del lado de la seguridad (ecuación 11.1) y teniendo en cuenta el historial de temperaturas, los resultados de UPV, el índice de rebote, la dosificación y la densidad del hormigón, los resultados obtenidos para el ejemplo de las vigas fabricadas con hormigón C0 se muestran en la tabla 11.7.

Tabla 11.7. Datos tomados pieza prefabricada y resultados de estimación con ecuación 11.1

Edad real (días)	Tª media intervalo (°C)	UPV	Índice de rebote	Resistencia estimada (MPa)
1,21	10,1	4381	-	32,61
2,20	8,9	4497	36	44,24
3,06	9,9	4749	40	51,17
5,88	4,9	4885	40	54,91
34,00	10	5030	41	61,91

En la figura 11.2 se observa que, en este caso, la estimación con el método de la madurez mediante el modelo hiperbólico (utilizando la energía de activación, temperatura media y todos los datos de roturas a distintas edades del C0 para hallar el valor óptimo del parámetro A) y la estimación del modelo M_{PG3} (utilizando velocidad de ultrasonidos, resistencia a compresión, temperatura, densidad media y datos de dosificación) tienen un resultado prácticamente idéntico, ligeramente por debajo del obtenido con

la estimación hallada con el modelo base M_{N9} , en la que se han calculado los coeficientes que minimizan el error cuadrático medio de los resultados de laboratorio.

Por tanto, se observa que la aplicación de la ecuación hallada mediante programación genética orientada, con penalizaciones extra para mejorar la seguridad de las estimaciones, M_{PG3} , en un caso real, tiene como resultado unas estimaciones conservadoras, similares a las que se obtienen mediante el método de la madurez, pero sin requerir una campaña experimental previa para la determinación de la energía de activación y de los parámetros del modelo. Si bien esto es cierto en este caso, es necesario apuntar que, pese a que los resultados son prometedores, para poder generalizar esta ecuación (la correspondiente al M_{PG3}) para cualquier hormigón, es necesario hacer pruebas con más tipos de hormigones y comprobar si la ecuación es válida para otros hormigones; esta ecuación ha sido hallada con 11 tipos de hormigones (3 autocompactantes y 8 vibrados) cuya dosificación se diferencia en uno o varios parámetros (relación agua/cemento, cantidad de cemento, tipo de árido, adiciones, etc), ensayados a distintas edades y curados a varias temperaturas. Todos los hormigones están fabricados con cemento CEM I. En futuros trabajos, se pretenderá comprobar validar o mejorar la expresión en función de los resultados obtenidos en otros hormigones, variando distintas propiedades que pueden influir en las correlaciones y dejando como único punto común el tipo de cemento CEM I.

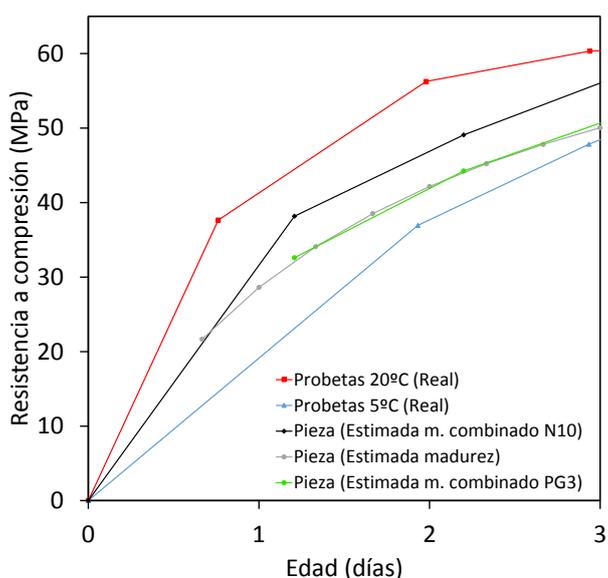


Figura 11.2. Comparación de la evolución de la resistencia estimada de pieza y real en probetas (M_{PG3})

11.4. Contenido de ficha técnica propuesta de caracterización complementaria de hormigones estructurales para grandes obras o para plantas de prefabricados.

Si se desarrolla la campaña experimental descrita en el apartado 11.3.2. “Caracterización complementaria del hormigón” en laboratorio y en obra se adquieren los datos de humedad y temperatura de curado y de temperatura interna en puntos clave (puntos previsiblemente fríos y previsiblemente calientes), se obtendrán todos los datos necesarios para poder tener un mayor control de calidad, tanto en la fase de ejecución, como en la fase de servicio y en la eventual reparación, tal y como se expone en el apartado 11.2 de “utilidad y ventajas” tanto a corto como a largo plazo.

Los datos que debe recoger son los siguientes:

- Dosificación
- Día y hora de amasado
- Cono de Abrams.
- Tabla de toma de datos (tabla 11.1).
- Tabla de evolución de la resistencia a distintas temperaturas y END (tabla 11.2).
- Energía de activación y S_{∞} .
- Historial de temperaturas de humedad y temperatura durante los primeros días en obra / fábrica e historial de temperatura interna en puntos críticos (calientes y fríos).
- Curvas de correlación entre UPV - Resistencia a compresión en función de la temperatura.
- Curvas de correlación entre índice de rebote - Resistencia a compresión en función de la temperatura.
- Curvas de correlación entre UPV - Resistencia a compresión en función de la relación a/c. Huso de incertidumbre.
- Curvas de correlación entre índice de rebote - Resistencia a compresión en función de la relación a/c. Huso de incertidumbre.
- Ecuación de estimación de la resistencia a compresión con método combinado, hallando los valores de los coeficientes que optimizan los resultados, minimizando el error cuadrático medio de las estimaciones.

Capítulo 12. Conclusiones y futuras líneas de investigación

Capítulo 12. Conclusiones y futuras líneas de investigación

12.1. Conclusiones

12.1.1. Efecto de la temperatura en poder cementante de cenizas de biomasa

Se concluye que las cenizas de biomasa que se han estudiado en esta investigación, procedentes de la industria papelera, tienen un poder cementante que depende fuertemente de la temperatura de curado: para temperaturas bajas, la pasta de cenizas de biomasa (fabricada únicamente con cenizas y agua) no endurece, mientras que a 45°C, endurece rápidamente.

12.1.2. Determinación empírica de la relación agua/cemento efectiva

En cuanto a la determinación empírica de la relación agua/cemento efectiva en función de la absorción de los áridos, se concluye que para obtener una relación a/c efectiva en morteros u hormigones igual que de un mortero u hormigón fabricado con áridos naturales, es necesario corregir el agua añadiendo una cantidad de agua que se encuentra entre el 64% y el 78% del agua que se necesitaría para saturar los áridos que componen la mezcla, siempre y cuando los áridos de la mezcla estén inicialmente secos.

12.1.3. Conclusiones sobre factores que influyen en la resistencia a compresión

En los hormigones convencionales o con árido reciclado estudiados, la resistencia a 28 días de las probetas curadas a 45°C y a 5°C es menor que la de las probetas curadas a 20°C. Por tanto, cuando la temperatura difiere mucho de 20°C, las probetas de control de calidad (que normalmente están curadas a 20°C) mostrarán una resistencia superior a la resistencia real del hormigón de obra.

Se observa que a 20°C, la sustitución de cemento por cenizas de biomasa influye negativamente en la resistencia a compresión, sobre todo durante los primeros tres días llegando a disminuir hasta un 30% para el hormigón con un 30% de cenizas. A partir de 3 días, la pérdida de resistencia a compresión es mayor cuanto menor es el tiempo de curado hecho también observado en hormigones con cenizas volantes de carbón [DEMI04, FANG15].

En lo tocante a la resistencia a largo plazo (90 días) de los hormigones con cenizas de biomasa, se observa que cuanto menor es la temperatura de curado, mayor es la influencia negativa de las cenizas de biomasa: Por tanto, en caso de hormigonado a bajas temperaturas, se recomienda tomar especiales precauciones en el uso de hormigones con cenizas de biomasa.

La temperatura influye en gran medida en el desarrollo de la resistencia a compresión durante los tres primeros días. A partir del cuarto día, la influencia es mucho menor en todos los hormigones estudiados. Para los hormigones de referencia o con árido reciclado, esta influencia es menor del 10%.

La evolución de la resistencia a compresión es más susceptible a los cambios de temperatura de curado en los hormigones con cenizas de biomasa; hecho que cabía esperar ya que, se ha comprobado que las cenizas de biomasa tienen un cierto poder cementante que depende de la temperatura de curado. Mientras que a 45°C las resistencias son ligeramente mayores que a 20°C, a 5°C son mucho menores.

12.1.4. Conclusiones sobre factores que influyen en las correlaciones entre END y resistencia a compresión

Existe una influencia de los áridos reciclados en las correlaciones entre resistencia a compresión y dos de los ensayos no destructivos: velocidad de ultrasonidos e índice de rebote. En ambas correlaciones se observa un desplazamiento de las curvas de correlación debido a la sustitución de árido reciclado: para un mismo valor de velocidad de ultrasonidos o índice de rebote, la resistencia correspondiente es menor cuanto mayor sea la cantidad de árido reciclado. En la correlación entre resistencia a compresión y conductividad eléctrica no se observa una tendencia clara de la influencia de los áridos reciclados.

A temperatura estándar, con pequeñas sustituciones de cenizas de biomasa (15%), no se observan variaciones significativas en las correlaciones de resistencia a compresión y los ensayos no destructivos empleados. Con un 30% de sustitución de cenizas de biomasa ya se observan variaciones considerables.

Se observa una influencia de la temperatura de curado en las curvas de correlación entre velocidad de ultrasonidos y resistencia a compresión, sobre todo, a edades tempranas. Estas curvas de correlación se desplazan hacia arriba cuanto mayor es la temperatura de modo que, para una misma velocidad de ultrasonidos, la resistencia a compresión correspondiente es mayor cuanto mayor haya sido su temperatura de curado. Por tanto, cuando la temperatura sea menor que la estándar se incurrirá en un error de sobreestimación de la resistencia a compresión. Debido a este hecho se proponen las siguientes recomendaciones:

- Para la estimación de la resistencia en estructuras, es aconsejable utilizar una curva de correlación obtenida con probetas que hayan estado expuestas a temperaturas previsiblemente iguales o más bajas que las de la zona de medición, para no incurrir en una sobreestimación de la resistencia a compresión.
- Si se utilizan testigos de la propia estructura para hallar las curvas de correlación, se recomienda su extracción en las zonas que previsiblemente hayan estado sometidas a menor temperatura durante el fraguado y endurecimiento de la estructura.

Cuanto mayor es la temperatura de curado, mayor es la influencia de los áridos reciclados en las curvas de correlación velocidad de ultrasonidos-resistencia a compresión, tanto en los hormigones vibrados como en los autocompactantes. Por el contrario, la influencia de las cenizas de biomasa en las curvas de correlación es levemente mayor a temperaturas bajas, probablemente debido a la minimización del efecto cementante de las cenizas.

12.1.5. Conclusiones sobre el método de la madurez en eco-hormigones

Para porcentajes iguales o mayores del 20% la energía de activación del hormigón para la resistencia a compresión aumenta a medida que se incrementa la cantidad de árido reciclado fino y grueso. Con porcentajes bajos (8%) no se observan variaciones significativas.

En todos los hormigones estudiados, a excepción del BH50, se observa que, para un rango de temperaturas bajas la energía de activación es mayor que la calculada según las directrices de la ASTM con las temperaturas 5°C, 20°C y 45°C. En el BH50 la energía de activación para temperaturas bajas es

ligeramente inferior. Por ello, se recomienda que, en el caso de que el hormigón vaya a estar sometido siempre a temperaturas superiores a la temperatura intermedia o siempre inferiores a la misma, se tenga en cuenta esta variación de la energía de activación.

Se ha comprobado que existe una única relación entre el ratio de resistencia a compresión frente a resistencia estabilizada (S/S_{∞}) y la madurez (o la edad equivalente) independientemente de la cantidad de árido reciclado sustituido.

Para la estimación de la resistencia a compresión mediante el método de la madurez se observa que con la ecuación hiperbólica, se obtienen mejores resultados que con la exponencial, tanto en el caso de tomar el índice de madurez igual al factor tiempo-temperatura como en el caso de calcularlo con la ecuación Arrhenius. Si bien aplicando esta ecuación se obtienen estimaciones ligeramente mejores que las obtenidas con el factor tiempo temperatura, cabe señalar que con este último (que no requiere el conocimiento del valor de la energía de activación) se obtienen estimaciones con errores asumibles (menores del 20%) en la mayoría de los casos.

La sustitución parcial de cemento por cenizas de biomasa (que implica una disminución del cemento), produce una disminución de la energía de activación. Mientras que con un 15% de sustitución se podrían utilizar los parámetros "k" (ec. 2.2) y "A" (ec. 2.7) del hormigón de referencia sin tener errores excesivos, con un 30% no serían aplicables.

La energía de activación aumenta al incrementar la relación agua/cemento. Una disminución de la relación agua/cemento de 0,45 a 0,40 puede suponer una disminución de la energía de activación en torno a 18%. Si se desea aplicar el método de la madurez en una obra o en una planta de prefabricados, es necesario que se tenga en cuenta la posible variabilidad de la relación agua /cemento debido al desconocimiento de la humedad exacta de los áridos en planta.

En cuanto a los resultados obtenidos en las tres campañas experimentales llevadas a cabo se concluye que, en las piezas prefabricadas estudiadas no hay grandes diferencias de evolución de la resistencia entre distintos puntos de una misma pieza, si bien para piezas de mayor tamaño o con una sección más irregular, puede llegar a ser un factor a tener en cuenta.

Haciendo un análisis comparativo de los resultados obtenidos en hormigones con distintos porcentajes de árido reciclado, se concluye que las diferencias de resistencia debidas a las distintas temperaturas de curado en cámara y en obra, son similares en todos los hormigones. Parece que la evolución de la resistencia de los eco-hormigones con árido reciclado tiene la misma susceptibilidad a los cambios de temperatura de curado que los hormigones con áridos naturales. Por ello, para los eco-hormigones con árido reciclado, son aplicables los criterios de madurez que se aplican en los hormigones convencionales.

En cuanto al estudio de la aplicabilidad de la definición de mortero equivalente a hormigones con árido reciclado, se concluye que el método de mortero equivalente es desaconsejable para el cálculo de la energía de activación en hormigones con árido reciclado, ya que no tiene en cuenta las particularidades del árido reciclado. Por ello, se recomienda utilizar la adaptación propuesta en esta investigación del método del mortero equivalente para hormigones con árido reciclado, o bien, proceder al cálculo de la energía de activación con probetas de hormigón en lugar de recurrir al método del mortero equivalente.

12.1.6. Propuesta de nuevos modelos de estimación de la resistencia a compresión

Teniendo en cuenta las tendencias de la influencia de los diversos factores estudiados en capítulos anteriores en las correlaciones entre ensayos no destructivos y resistencia a compresión, se plantean una serie de modelos de estimación alternativos a los utilizados habitualmente en estudios anteriores.

Se concluye que en las estimaciones a edades tempranas con ensayos no destructivos (índice de rebote y velocidad de ultrasonidos), es de vital importancia tener en cuenta una serie de factores que no suelen aparecer en los modelos de estimación más habituales:

- Densidad del hormigón endurecido.
- Relación agua/cemento modificada (teniendo en cuenta aporte de adiciones y filler).
- El historial de temperaturas internas y la edad del hormigón.
- La edad equivalente (calculada con la ecuación de Arrhenius, para lo que es necesario conocer el valor de la energía de activación, o bien calculada como el cociente del factor tiempo temperatura entre la temperatura de referencia).

Teniendo en cuenta estos factores y la velocidad de ultrasonidos se consiguen muy buenas estimaciones independientemente del tipo de hormigón siempre y cuando se utilice cemento CEMI, que mejoran considerablemente los modelos utilizados por otros autores.

Las estimaciones obtenidas con los nuevos modelos utilizando la edad equivalente calculada con la ecuación de Arrhenius son muy similares a las obtenidas con el cociente del factor tiempo temperatura. Para el cálculo del factor tiempo temperatura es necesario realizar una campaña experimental mucho menor, por ello desde el punto de vista práctico, parece aconsejable recomendar el uso de los modelos que utilizan el factor tiempo temperatura.

Por todo ello, salvo que se conozca a priori la energía de activación del hormigón, en sentido práctico se recomienda el uso de los modelos que dependan de la velocidad de ultrasonidos, del factor tiempo temperatura, de la densidad y de una relación agua/cemento modificada que contemple el efecto de las adiciones utilizadas (M_{N6} o M_{N10}).

En estos nuevos modelos de estimación, el índice de rebote no mejora de forma apreciable los resultados, por lo que el trabajo de adquirir dichos datos puede no compensar.

Aplicando programación genética pura o programación genética orientada, con calificación de puntos de demérito habituales en estudios anteriores, se mejora muy levemente los resultados obtenidos en los modelos propuestos inicialmente (modelos de M_{N6} a M_{N10} .) en la presente tesis.

Aplicando en el algoritmo genético grandes penalizaciones a las sobreestimaciones, se consigue hallar mediante programación genética una ecuación de estimación de la resistencia a compresión que tiene una precisión similar a las propuestas y, además, conduce a estimaciones más seguras desde el punto de vista estructural. La ecuación resultante puede servir como base para hacer una estimación de la resistencia a compresión muchos tipos de hormigón fabricados con cemento I. Si bien esta ecuación puede ser útil, es necesario resaltar que el alcance de la misma es limitado, debido a que existen algunos tipos de hormigón como los ligeros o los hormigones con fibras cuyas correlaciones pueden variar con respecto a los hormigones estudiados.

Por todo ello, siempre será recomendable ensayar alguna probeta de control y comprobar que la ecuación estima adecuadamente la resistencia. En caso de que el resultado no sea adecuado, será

necesario hacer una calibración del modelo para hallar los coeficientes, tomando como ecuación base los modelos propuestos inicialmente M_{N6} o M_{N10} .

12.1.7. Conclusiones sobre la evolución del módulo de deformación en eco-hormigones

- **Hormigones con cenizas de biomasa.**

La sustitución parcial de cemento por cenizas de biomasa tiene especial incidencia en la evolución del módulo de deformación y de la resistencia a compresión durante las primeras horas. Además, también influye negativamente en la velocidad de adquisición de módulo durante las primeras 12 horas. Pese a ello, las pérdidas de módulo registradas a partir de 48 horas son despreciables para el CC15 y de menos de un 10% en el CC30. Por el contrario, las pérdidas de resistencia a compresión debido a la sustitución parcial de cemento por cenizas de biomasa superan el 20% para el hormigón CC30.

Por tanto, se puede concluir las cenizas de biomasa tienen una mayor influencia sobre la resistencia a compresión que sobre el módulo de deformación a edades tempranas. Según algunas investigaciones [ZAJA14], la influencia de las cenizas volantes de carbón a 7 días, es similar a la observada en este estudio para las cenizas de biomasa.

Con porcentajes altos (30%), las cenizas de biomasa influyen en las correlaciones de conductividad frente a módulo y de conductividad frente resistencia a compresión, mientras que, para porcentajes bajos (15%), su influencia en estas dos correlaciones es despreciable. Por el contrario, las cenizas influyen poco en la correlación entre velocidad de ultrasonidos y módulo de deformación.

En resumen, a edades tempranas, las cenizas de biomasa influyen en mayor medida en la resistencia a compresión que en el módulo de deformación (a partir de 24 horas), tanto en lo referente a su evolución como en lo referente a sus correlaciones con ensayos no destructivos. Por tanto, la propiedad de control prioritaria a edades tempranas en hormigones con cenizas de biomasa debe ser la resistencia a compresión, tal y como es habitual, ya que se ve más afectada que el módulo de deformación.

Por último, cabe destacar que, la adición de cenizas de biomasa, no influye en el tipo de correlación que existe entre resistencia a compresión y módulo de deformación a edades tempranas. Por lo que se puede concluir que las fórmulas de estimación del módulo de deformación en función de un valor de resistencia a compresión conocido (o viceversa), desarrolladas para hormigones convencionales, son igualmente aplicables para hormigones con adiciones de cenizas de biomasa.

- **Hormigones con árido reciclado fino y grueso de hormigón.**

Durante las primeras horas no se observa influencia de los áridos reciclados. A partir de las 12 horas de edad se empiezan a observar notables diferencias en el módulo de deformación: a mayor porcentaje de sustitución de árido reciclado, menor es el módulo de deformación. A partir de 24 horas la disminución de módulo guarda una cierta proporcionalidad con el porcentaje de sustitución de árido reciclado.

La sustitución de árido natural por árido reciclado influye de forma notable en las correlaciones del módulo de deformación con distintos ensayos no destructivos: velocidad de ultrasonidos, índice de rebote y conductividad eléctrica interna. En los tres casos se observa que, para un mismo valor del ensayo no destructivo, el módulo correspondiente es menor cuanto mayor es la cantidad de árido reciclado.

En cuanto a la influencia de un incremento de la temperatura en la evolución del módulo, se observa que a mayor temperatura se produce una aceleración de la adquisición de módulo, pero su valor final estabilizado es menor que el del hormigón curado a 20°C. Este efecto negativo de las altas temperaturas también se observa en la resistencia a compresión en muchos casos, es el llamado “crossover effect”, observado ya en 1962 [ALEX62]. Se observa que a mayor temperatura de curado, el efecto del árido reciclado en el módulo de deformación es mayor.

En lo referente a la relación entre módulo de deformación y resistencia a compresión a edades tempranas, se observa que, para una misma resistencia a compresión, el módulo de deformación correspondiente es menor cuanto mayor es la cantidad de árido reciclado.

Cabe destacar que, tanto en los hormigones con cenizas de biomasa como en los hormigones con árido reciclado se observa que la relación entre el módulo de deformación y la resistencia a compresión parece no depender de la edad.

12.1.8. Propuesta de control de calidad y aplicación de la M_{PG3} a un caso práctico

Se ha desarrollado una propuesta de mejora del control de calidad del hormigón para grandes obras y para fábricas de prefabricados, así como una ficha técnica de caracterización complementaria de los hormigones estructurales. La aplicación de estas propuestas puede suponer grandes ventajas tanto a corto como a largo plazo. Además, esta mejora no supone un gran aumento en el coste del control de calidad y puede suponer un ahorro económico importante debido al acortamiento de plazos de ejecución, la disminución de problemas durante la construcción y la reducción de número de testigos necesarios para hacer una estimación de la resistencia a la hora de reformar, rehabilitar o ampliar una estructura.

La estimación de la resistencia a compresión aplicando la ecuación hallada mediante programación genética orientada, con penalizaciones extra para mejorar la seguridad de las estimaciones, M_{PG3} , en un caso real, tiene como resultado unas estimaciones conservadoras. Estas estimaciones son similares a las que se obtienen mediante el método de la madurez, pero sin requerir una campaña experimental previa para la determinación de la energía de activación y de los parámetros del modelo. Si bien esto es cierto en este caso, es necesario apuntar que, pese a que los resultados son prometedores, para poder generalizar esta ecuación (la correspondiente al M_{PG3}) para cualquier hormigón, es necesario hacer pruebas con más tipos de hormigones.

12.2. Futuras líneas de investigación

Se muestra como una línea interesante, el estudio del efecto de la temperatura de curado en la influencia de la sustitución parcial o total de árido natural por árido reciclado mixto, tanto en la evolución de la resistencia a compresión y del módulo de deformación, como en las correlaciones de éstos con los ensayos no destructivos.

También sería interesante realizar un estudio similar al desarrollado, aplicado a eco-hormigones con áridos reciclados de hormigón (finos y gruesos utilizados de forma conjunta) de distintas calidades y con áridos reciclados mixtos, con el fin de hacer un análisis comparativo de la influencia de la calidad de los áridos reciclados en el efecto que éstos tienen en las características estudiadas.

Otra posible línea de investigación sería la determinación de la influencia del árido reciclado grueso en la energía de activación con el fin de cuantificar cuales serían los errores cometidos al calcular la energía

de activación mediante el método del mortero equivalente descrito en la ASTM C1074-11 [RN04], que no tiene en cuenta el tipo de árido grueso empleado.

En cuanto al estudio de las aplicaciones de las cenizas de biomasa, debido a que se han observado muy buenos resultados con un porcentaje de sustitución del 15%, en futuros trabajos se podría estudiar otros aspectos importantes como su influencia en el aislamiento térmico y acústico, así como su efecto en la durabilidad del hormigón, con el fin de analizar otros aspectos relevantes a la hora de evaluar la viabilidad del uso de estas cenizas de biomasa como adición del cemento. Además, debido al poder cementante de la pasta de cemento y agua que se ha observado durante esta investigación, se plantea la posibilidad de estudiar nuevas aplicaciones de estas cenizas de biomasa como posible material de revestimiento siempre y cuando la temperatura de curado sea mayor o igual a 20 °C.

También parece interesante realizar las mismas campañas experimentales que las desarrolladas en la presente tesis con hormigones con otros tipos de cenizas de biomasa y con hormigones con cenizas volantes comerciales, con el fin de analizar la influencia del tipo de cenizas en la evolución de la resistencia a compresión, en la evolución del módulo de deformación así como de sus correlaciones con distintos ensayos no destructivos. Un punto de interés, es el de analizar la influencia de la temperatura en la evolución de las propiedades de los eco-hormigones en función del tipo de cenizas utilizadas, por ello, se plantea extender la campaña experimental de monitorización del módulo de deformación mediante EMM-ARM para hormigones con distintos tipos de cenizas, todos ellos curados a tres temperaturas, con el fin de poder observar la influencia de la temperatura en la evolución del módulo en estos hormigones.

Se ha observado que ciertas modificaciones en la composición del hormigón producen variaciones en la energía de activación. Tres variables importantes parecen ser: la densidad del hormigón, la cantidad de cemento y el agua efectiva. Se podría desarrollar un extenso proyecto en el que se estudien estas y otras variables (como las adiciones) en los que se varíen estas propiedades, de forma que se podría llegar a proponer una ecuación de estimación de la energía de activación.

Además, desarrollando una serie de campañas experimentales sería posible cuantificar la diferencia que existe entre curar las probetas a una cierta temperatura constante o curar las probetas sometidas a un ciclo de temperaturas, cuya temperatura media sea igual a la temperatura constante de la comparativa.

Así mismo, se desea analizar la aplicabilidad de los modelos de estimación propuestos en la presente tesis a otros tipos de hormigones distintos a los estudiados en esta investigación. En futuros trabajos, se pretenderá comprobar, validar o mejorar la expresión de estimación de la resistencia a compresión propuesta en función de los resultados obtenidos en otros hormigones, variando distintas propiedades que pueden influir en las correlaciones y dejando como único punto común el tipo de cemento CEM I.

Sería conveniente estudiar la posible implementación de procedimiento propuesto de control de calidad en obras y en fábricas, así como la posibilidad de ampliar el procedimiento para incluir la utilización de monitorización del módulo en obra utilizando el EMM-ARM.

Otra futura línea de investigación de interés sería la cuantificación del diferencial de huella de carbono debido a la utilización de cenizas de biomasa como sustitutivo parcial del cemento y de la utilización de áridos reciclados (finos y gruesos de forma conjunta) como sustitutivo parcial o total de los áridos naturales.

Chapter 12. Conclusions and future research

Chapter 12. Conclusions and future research

12.1. Conclusions

12.1.1. Effect of temperature in the cementing power of biomass ashes

It is concluded that the biomass ashes from the paper industry used in this study present a cementing power that depends strongly on the curing temperature: for low temperatures the biomass ashes paste (made only with ashes and water) does not acquire any stiffness, while it hardens quickly at 45°C.

12.1.2. Heuristic determination of the effective water/cement ratio

Regarding the heuristic determination of the effective water/cement ratio as a function of the aggregate absorption, it is concluded obtaining an effective water/cement ratio in mortars or concretes equivalent to that of a mortar or concrete made from natural aggregates, requires changing the amount of water by adding between 64% and 78% of the amount needed to saturate the aggregates that compose the mixture, as long as the aggregates of the mixture are initially dry.

12.1.3. Conclusions about the factors that influence the compressive strength

In the conventional concretes or concretes with recycled aggregates that have been studied, the strength at 28 days of the test cubes cured at 45°C and 5°C is lower than that of the test cubes cured at 20°C. As a consequence, when the temperature differs significantly from 20°C, the quality control test cubes (which are usually cured at 20°C) will show a greater strength than that of the *in situ* concrete.

It is observed that at 20°C, the replacement of cement for biomass ashes reduces the compressive strength, especially during the first three days reaching a 30% reduction for a concrete with an ash fraction of 30%. After three days, the compressive strength reduction is greater as the curing time is reduced. This phenomenon has also been observed in concretes with coal fly ashes [DEMI04, FANG15].

Regarding the long-term strength (90 days) of concretes with biomass ashes, it is observed that the lower the curing temperature, the greater the negative impact of biomass ashes: Therefore, in the event of low-temperature casting, it is recommended to take special precautions with the use of concretes with biomass ashes.

Temperature has a strong influence in the development of compressive strength in the first three days. From the fourth day on, the influence is much milder in all the studied concretes. For the reference concretes with recycled aggregates, the influence is lower than 10%.

The evolution of the compressive strength is more sensitive to changes in the curing temperature in concretes with biomass ashes; this fact was to be expected because biomass ashes have certain

cementing power that depends on the curing temperature. While at 45°C the strength is slightly greater than at 20°C, at 5°C they are much lower.

12.1.4. Conclusions about factors that influence the correlations between non-destructive tests and compressive strength

There is an influence of recycled aggregates and the correlations between compressive strength and two non-destructive tests: ultrasonic pulse velocity and rebound index. In both correlations, it is observed a displacement of the correlation curves due to the substitution of recycled aggregates: for the same value of the ultrasonic pulse velocity or the rebound index, the corresponding strength is lower the higher is the fraction of recycled aggregates. I have not observed a clear trend for the influence of recycled aggregates on the correlation between the compressive strength and the electric conductivity.

At a standard temperature, with little biomass ash substitutions (15%), no significant variations in the correlations of compressive strength and the employed non-destructive tests are observed. With a 30% biomass ash substitution, noteworthy variations are observed.

An influence of the curing temperature on the correlation curves between the ultrasonic pulse velocity and the compressive strength is observed, especially at early ages. These correlations curves are shifted upwards as the temperature increases, so that for the same ultrasonic pulse velocity, the corresponding compressive strength is greater the greater has been its curing temperature. As a consequence, when the temperature is lower than the standard one, the compressive strength will be overestimated. For this reason, we propose the following recommendations:

- To estimate the strength of structures, it is advisable to use the correlation curve obtained with test cubes that have been exposed to temperatures equal or lower than those in the measurement area, so that the compressive strength is not overestimated.
- If core of the structure being built are utilized to determine the correlation curves, it is recommended to take them from the areas that we believe have been exposed to lower temperatures during the hardening and curing of the structure.

The greater the curing temperature is, the greater the influence of recycled aggregates on the ultrasonic pulse velocity -compressive strength correlation curves, both in vibrated and self-compacting concrete. In contrast, the influence of biomass ashes on the correlation curves is slightly higher at low temperatures, probably due to the minimization of the cementitious effect of ashes.

12.1.5. Conclusions about the maturity method in eco-concretes

For percentages equal or greater than 20% the concrete activation energy for compressive strength increases as the amount of fine and coarse recycled aggregates is increased. For low percentages (8%) no significant variations are observed.

For all of the studied concretes, except BH50, it is observed that for a range of low temperatures the activation energy is lower than that computed according to the ASTM guidelines with temperatures 5°C, 20°C y 45°C. The activation energy of the BH50 concrete is slightly lower. As a consequence, if the concrete is going to be exposed to temperatures which are always higher than the average temperature or always lower than the average temperature, we recommend to consider the aforementioned variation of the activation energy.

It has been verified that there exists a unique relationship between the ratio of the compressive strength to the stabilized strength (S/S_{∞}) and the maturity (or equivalent age) regardless of the amount of the recycled aggregate substitution.

To estimate the compressive strength by the maturity method, it is observed that the hyperbolic equation leads to better results than the exponential formula, both if we take the maturity index to be equal to the time-temperature factor and if we compute it with Arrhenius equation. Although applying this equation produces estimates slightly better than those obtained with the time-temperature factor, it should be noted that the latter (which does not require knowing the value of the activation energy) produces estimates with acceptable errors (lower than 20%) in most cases.

The partial substitution of cement for biomass ashes (which entails a reduction of cement), produces a reduction of the activation energy. While with a 15% substitution, the parameters “k” (eq. 2.2) y “A” (eq. 2.7) of the reference concrete may be used without incurring an excessive error, they are not applicable for a 30% substitution.

The activation energy increases as we raise the water/cement ratio. A reduction of the water/cement ratio from 0.45 to 0.40 may lead to a reduction of the activation energy of about 18%. If one wants to apply the maturity method *in situ* or in a precast production facility, it is necessary to account for the potential variability of the water/cement ratio due to the lack of knowledge of the precise humidity of the aggregates.

As for the results obtained in the three experimental campaigns carried out, it is concluded that in the precast components that we studied, there are no significant differences in the strength evolution for different points of the same component, although larger components or pieces with a more irregular shape might show larger variations.

By making a comparative analysis of the obtained results with different percentages of recycled aggregates, it is concluded that the differences attributed to distinct curing temperatures in environmental chamber or *in situ* are similar for all concretes. The data suggest that the strength evolution of eco-concretes with recycled aggregates has the same sensitivity to temperature changes than concretes with natural aggregates. For this reason, the maturity criteria that are used in conventional concretes remain applicable to concretes with recycled aggregates.

Regarding the study of the applicability of the definition of equivalent mortar [RN04] to concretes with recycled aggregates, it is concluded that this method is not recommended to calculate the activation energy, because it does not consider the particularities of the recycled aggregates. It is recommended to employ the modification proposed in this Thesis or to compute the activation energy using test cubes rather than resorting to the equivalent mortar method.

12.1.6. Proposal of new estimation methods for the compressive strength

Considering the trends of the influence of different factors studied in previous chapters on the correlations between non-destructive tests and compressive strength, we propose new estimation models as an alternative to those previously used.

It is concluded that in the estimates at early ages with non-destructive tests (rebound index and ultrasonic pulse velocity) it is of vital importance to take into account several factors which are not usually accounted for in the most common estimation models:

- Density of the hardened concrete.
- Modified water/cement ratio (accounting for the contribution of additives and filler).
- History of internal temperatures and the concrete's age.
- Equivalent age (computed with Arrhenius equation, which requires knowing the activation energy or computed as the quotient of the time-temperature factor to the reference temperature).

Considering these factors and the ultrasonic pulse velocity leads to very good estimates, which improve the models proposed by other authors, regardless of the concrete type, as long as cement CEM I is used.

The estimates obtained with the new models using the equivalent age computed with Arrhenius equation are very similar to those obtained with the quotient of the time-temperature factor. For the computation of the time-temperature factor it is necessary to carry out a much smaller experimental campaign. From this, we conclude that from a practical point of view, it seems advisable to recommend the use of the models which employ the time-temperature factor.

Taking into account all of these, unless the activation energy is known *a priori*, from a practical point of view, we recommend the use of the models that depend on the ultrasonic pulse velocity, the time-temperature factor, the density and the modified water/cement ratio accounting for the employed additives (M_{N6} or M_{N10}).

In these new estimation models, the rebound index produces marginal improvements of the results, which indicates that the work needed to acquire such data may not be warranted.

By applying pure or oriented genetic programming with the usual demerit points values in previous studies, the results marginally improve those obtained in the initially proposed models (models from M_{N6} to M_{N10}) in the present Thesis.

By applying large penalty to the overestimations of the genetic algorithm, it is possible to find with genetic programming an equation that estimates the compressive strength with similar accuracy to that of the proposed equations and, in addition, leads to safer estimates from the structural point of view. The resulting equation may be used as a basis to estimate the compressive strength of a number of types of concrete made of cement I. Although this equation may be useful, it is necessary to highlight, that its applicability might be limited because there are some types of concretes, such as, light concretes or fiber-reinforced concretes, whose correlations may vary with respect to those of the studied concretes.

For these reasons, it is always advisable to test a few control test cubes and verify that the equation correctly estimates the strength. If the result is not adequate, it will be necessary to calibrate the model to find the coefficients, taking as basis equation the models initially proposed M_{N6} or M_{N10} .

12.1.7. Conclusions about the evolution of the E-modulus in eco-concretes

- **Concretes with biomass ashes.**

The partial substitution of cement by biomass ashes has special relevance in the evolution of the E-modulus and the compressive strength in the initial hours. In addition, it also influences negatively the velocity of E-modulus acquisition in the first 12 hours. In spite of this, the E-modulus reductions registered after the first 48 hours are negligible for CC15 and lower than 10% for CC30. In contrast, the reductions of compressive strength due to partial substitution of cement by biomass ashes are greater than 20% for concrete CC30.

As a consequence, it may be concluded that biomass ashes have a greater impact on the compressive strength than on the E-modulus at early ages. According to some studies [ZAJA14], the influence of coal fly ashes at 7 days is similar to that observed in this Thesis for biomass ashes.

With high percentages (30%), biomass ashes influence the correlations of conductivity and E-modulus as well as conductivity and compressive strength, while for low percentages (15%), its impact on these two correlations is negligible. In contrast, ashes have little influence in the correlation of ultrasonic pulse velocity and E-modulus.

In summary, at early ages, biomass ashes have a greater influence on the compressive strength than on the E-modulus (after the first 24 hours), both in what concerns its evolution and in what concerns its correlations with non-destructive tests. Therefore, as usually done, the most important property to be controlled at early ages in concretes with biomass ashes should be its compressive strength because it is more strongly affected than the E-modulus.

Finally, it is worth noting that, the addition of biomass ashes, does not have an impact on the type of correlation that exists between compressive strength and E-modulus at early ages. From this, it may be concluded that the formulas to estimate E-modulus from a known value of the compressive strength (or vice versa) developed for conventional concretes, are likewise applicable to concretes with biomass ashes.

- **Concretes with fine and coarse recycled aggregates.**

We did not observe any influence of the recycled aggregates during the first hours. After age 12 hours, we started to observe significant differences in the E-modulus: the greater the percentage of recycled aggregate substitution, the lower the E-modulus. After 24 hours, the reduction of E-modulus, keeps some proportionality to the percentage of the recycled aggregate substitution.

The substitution of natural aggregate with recycled aggregate has a significant impact on the correlations of the E-modulus and several non-destructive tests: ultrasonic pulse velocity, rebound index and internal electric conductivity. For all three cases, it was observed that for a given value of the non-destructive test, the corresponding modulus is lower the greater the amount of recycled aggregate.

Regarding the influence of a temperature increase in the E-modulus evolution, it is observed that a temperature rise produces an acceleration of the E-modulus acquisition rate, but its stabilized final value is lower than that of the concrete cured at 20°C. This negative effect of high temperatures, which is also observed in a number of cases in the compressive strength, is referred to as crossover effect and was reported on in 1962 [ALEX62]. It is observed that the greater the curing temperature, the greater the effect of the recycled aggregate on the E-modulus.

Regarding the relationship between E-modulus and compressive strength at early ages, it is observed that for a given compressive strength, the corresponding E-modulus is lower as the amount of recycled aggregate increases.

It is worth noting that, both in concretes with biomass ashes and in concretes with recycled aggregates, we observe that the relationship between E-modulus and compressive strength does not seem to depend on age.

12.1.8. Proposal for quality control and application of M_{PG3} to a practical case

A proposal for improvement concrete quality control for major public works and precast production facilities has been developed. A technical datasheet for the complementary characterization of structural concrete has also been introduced. The application of these proposals may entail significant short- and long-term advantages. In addition, this improvement does not require an important increase in the cost of quality controls and may lead to important economic saves due to the reduction of execution times, the decrement of problems during construction and the diminution of core needed to estimate the strength when it comes to remodeling, rehabilitating or extending a structure.

The estimation of the compressive strength applying the equation found by oriented genetic programming with extra penalties to improve the estimates safety, M_{PG3} , in a real-world case leads to conservative estimates. These estimates are similar to those obtained by the maturity method, but do not require a prior experimental campaign to determine the activation energy and the model parameters. Although this is true in this case, it is necessary to note that, even if the results are encouraging, extending this equation (that corresponding to M_{PG3}) for any time of concrete, more tests with additional types of concrete are needed.

12.2. Future research

The study of the effect of the curing temperature on the influence of the partial or total substitution of natural aggregates by mixed recycled aggregates on the evolution of compressive strength and E-modulus as well as their correlations with non-destructive tests looks like an interesting research topic.

It would be also interesting to perform a similar study to this Thesis, applied to eco-concretes with recycled aggregates from concrete (fine and coarse used in combination) of different qualities and with mixed recycled aggregates. The goal is to make a comparative analysis of the influence of the quality of recycled aggregates on their effect on the studied properties.

Other possible line of research would be the determination of the influence of coarse recycled aggregate on the activation energy to quantify the error that results from computing the activation energy by using the equivalent mortar method as described in ASTM C1074-11 [RN04], which does not consider the type of coarse aggregated being employed.

Regarding the study of the application of biomass ashes, due to the fact that we have observed very good results with a substitution percentage of 15%, in future works other important aspects could be studied, such as, their influence on thermal and acoustic isolations, as well as their effect in the concrete's durability. The goal is to analyze additional aspects which are relevant to evaluate the viability of biomass ashes as cement additive. In addition, due to the cementitious capacity of the water and ashes paste observed in this work, we propose to study new applications of biomass ashes as a lining material as long as the curing temperature is greater than 20 °C.

Carrying out the experimental campaigns developed in this Thesis with concretes with different types of biomass ashes and with concretes with commercial coal fly ashes looks like an interesting research topic. The goal is to analyze the influence of the ashes type on the evolution of compressive strength, the evolution of the E-modulus, as well as their correlations with several non-destructive tests. An important topic is to analyze the influence of the temperature on the evolution of the properties of eco-concretes as a function of the type of ashes employed. For this reason, we propose to extend the experimental campaign to monitor the E-modulus by using EMM-AMR for concretes with different types of ashes. The concretes would be cured at three distinct temperatures to be able to observe the influence of temperature on the E-modulus evolution for these concretes.

It has been observed that some changes in the concrete composition produce variations of the activation energy. It looks like the density of concrete, the amount of cement and the effective water are three important variables. A project could be developed in which these and some other variables (such as additives) are studied for a significant number of concrete types for which these properties are varied. This research would permit to propose an equation to estimate the activation energy.

In addition, developing a series of experimental campaigns it would be possible to quantify the difference between curing test cubes at a particular constant temperature and curing test cubes exposed to a temperature cycle, whose average temperature matches the previously-mentioned constant temperature.

Likewise, we wish to analyze the applicability of the estimation models proposed in the current Thesis for concretes different than those studied here. In future works, we will aim at verifying, validating or improving the estimate of the compressive strength proposed taking into account the results obtained for different types of concrete, varying several properties that may influence the correlations and leaving the use of cement CEM I as the only common point.

It would be advisable to study the potential implementation of the proposed quality control procedure in public works and factories, as well as the possibility of extending the procedure to include the use of monetarization of the E-modulus *in situ* using EMM-ARM.

Another interesting topic of future research would be the quantification of the differential carbon footprint due to the use of biomass ashes as a partial replacement of cement and the use of recycled aggregates (fine and coarse in combination) as a total or partial replacement of natural aggregates.

Referencias y bibliografía

Referencias

- [ABDE06] Abdel-Jawad,Y.A. 2006. The maturity method: Modifications to improve estimation of concrete strength at later ages. *Construction and Building Materials*, Vol 20 (10), 893-900.
- [ACHE06] ACHE Grupo de Trabajo2/5 "Hormigón reciclado". 2006. Coordinadora: P. Alaejos, Secretaría: M. Sánchez, Vocales: F. Aleza, M. Barra, M. Burón, J. Castilla, E. Dapena, M. Etxebarría, G. Francisco, B. Glez. Fonteboa, F. Mtnez. Abella, I. Mtnez. Lage, J.L. Parra, J.A. Polanco, M. Sanabria, E. Vázquez. Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. ACHE Monografía M-11. Madrid. ISBN 84-89670-55-2.
- [AGRE11] Agrela,F., Sánchez De Juan,M., Ayuso,J., Galdes,V.L., Jiménez,J.R. 2011. Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete. *Construction and Building Materials*, Vol 25 (10), 3950-3955.
- [ALAE11] Alaejos,P., Sánchez,M., Martínez,F., González,B., Vázquez,E., Barra,M. 2011. Estudio Prenormativo sobre la utilización de los RCDs en hormigón reciclado de aplicación estructural (Proyecto RECNHOR) y Reciclado de los RCDs como áridos de hormigones estructurales (Proyecto CLEAM). IECA.
- [ALEX62] Alexander,K.,Taplin,J. 1962. Concrete strength, paste strength, cement hydration, and the maturity rule. *Australian Journal of Applied Science*, Vol 13 (4), 277-284.
- [ALME93] de Almeida,I.R. 1993. Emprego do esclerômetro e do ultra-som para efeito da avaliação qualitativa dos concretos de alto desempenho (Portuguese). Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia do Centro Tecnológico da Universidade Federal Fluminense. Professorship thesis.
- [AVIL13] Ávila Córdoba,L., Martínez-Barrera,G., Barrera Díaz,C., Ureña Nuñez,F., Loza Yañez,A. 2013. Effects on mechanical properties of recycled PET in cement-based composites. *International Journal of Polymer Science*, Vol 2013
- [AVIL15] Avila-López,U., Almanza-Robles,J.M., Escalante-García,J.I. 2015. Investigation of novel waste glass and limestone binders using statistical methods. *Construction and Building Materials*, Vol 82, 296-303.
- [AYAZ15] Ayaz,Y., Kocamaz,A.F., Karakoç,M.B. 2015. Modeling of compressive strength and UPV of high-volume mineral-admixed concrete using rule-based M5 rule and tree model M5P classifiers. *Construction and Building Materials*, Vol 94, 235-240.
- [AZEN10a] Azenha,M., Magalhães,F., Faria,R., Cunha,A. 2010. New method for continuous monitoring of concrete E-modulus since casting. *Concrete under Severe Conditions: Environment and Loading - Proceedings of the 6th International Conference on Concrete under Severe Conditions, CONSEC'10*. Vol 2 1709-1716.
- [AZEN10b] Azenha,M., Magalhães,F., Faria,R., Cunha,Á. 2010. Measurement of concrete E-modulus evolution since casting: A novel method based on ambient vibration. *Cement and Concrete Research*, Vol 40 (7), 1096-1105.
- [AZEN12a] Azenha,M., Faria,R., Magalhães,F., Ramos,L., Cunha,A. 2012. Measurement of the E-modulus of cement pastes and mortars since casting, using a vibration based technique. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Vol 45 (1-2), 81-92.

- [AZEN12b] Azenha,M., Ramos,L.F., Aguilar,R., Granja,J.L. 2012. Continuous monitoring of concrete E-modulus since casting based on modal identification: A case study for in situ application. *Cement and Concrete Composites*, Vol 34 (7), 881-890.
- [AZEN15] Azenha,M., Granja,J., Dunant,C. 2015. EMM-ARM Retrospective and current developments.Presentations eBook: according to 1st Workshop with focus on experimental testing of cement-based materials. Ljubljana, Slovenia.
- [BARB13] Barbosa,R., Lapa,N., Dias,D., Mendes,B. 2013. Concretes containing biomass ashes: Mechanical, chemical, and ecotoxic performances. *Construction and Building Materials*, Vol 48, 457-463.
- [BELI08] De Belie,N., Grosse,C., Baert,G. 2008. Ultrasonic transmission to monitor setting and hardening of fly ash concrete. *ACI Materials Journal*, Vol 105 (3), 221-226.
- [BOGA13] Bogas,J.A., Gomes,M.G., Gomes,A. 2013. Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method. *Ultrasonics*, Vol 53 (5), 962-972.
- [BRAV15a] Bravo,M., de Brito,J., Pontes,J., Evangelista,L. 2015. Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. *Journal of Cleaner Production*, Vol 99 (0), 59-74.
- [BRAV15B] Bravo,M., De Brito,J., Pontes,J., Evangelista,L. 2015. Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. *Construction and Building Materials*, Vol 77, 357-369.
- [BREY12] Breyse,D. 2012. Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods. *Construction and Building Materials*, Vol 33, 139-163.
- [BROO07] Brooks,A.G., Schindler,A.K., Barmes,R.W. 2007. Maturity method evaluated for various cementitious materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol 19 (12), 1017-1025.
- [BUNG89] Bungey,J. 1989. *The Testing Of COncrete in structures*, surrey Lniversity Press. Surrey University Press. London.
- [BUNG06] Bungey,J.H., Grantham,M.G., Millard,S. 2006. *Testing of concrete in structures*. Crc Press.
- [BUST10] Bustillo Revuelta,M. 2010. *Manual de RCD y Áridos reciclados*. Fueyo Editores. Madrid. ISBN 978-84-935279-7-6.
- [CABR10] Cabral,A.E.B., Schalch,V., Molin,D.C.C.D., Ribeiro,J.L.D. 2010. Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, Vol 24 (4), 421-430.
- [CARI92] Carino,N.J.,Tank,R.C. 1992. Maturity functions for concretes made with various cements and admixtures. *ACI Materials Journal*, Vol 89 (2), 188-196.
- [CARR14] Carrasco,B., Cruz,N., Terrados,J., Corpas,F.A., Pérez,L. 2014. An evaluation of bottom ash from plant biomass as a replacement for cement in building blocks. *Fuel*, Vol 118, 272-280.

- [CARR15] Carro-López,D., González-Fonteboa,B., De Brito,J., Martínez-Abella,F., González-Taboada,I., Silva,P. 2015. Study of the rheology of self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, Vol 96, 491-501.
- [CARR15a] Carro López, D., González-Fonteboa, B., Martínez García, C., Martínez-Abella, F. Seara-Paz, S., Rodríguez Alvaro, R. 2015. Design and properties of mortar with seashells fine aggregates. *First International Conference on Bio-based Building Materials: ICBBM2015*. Clermont-Ferrand (Francia). ISBN: 978-2-35158-154-4.
- [CARR15b] Carro-López, D., González-Fonteboa, B., Martínez-García, C. Martínez-Abella, F. Seara-Paz, S., Rodríguez-Álvaro, R., Prego-Martínez, F.J., Millán-Pérez, J.. *Diseño de morteros de revestimiento para bioconstrucción con arenas procedentes de concha de bivalvo*. CONPAT 2015. Lisboa, Portugal
- [CEME16] Cementometer Hand Held Microwave Moisture Meter for Water/Cement Ratios of Fresh Concrete. <http://www.ndtjames.com/Cementometer-p/t-c.htm#pdf>.
- [CHAN06] Chan,D.,Poon,C.S. 2006. Effects of fine recycled aggregate as sand replacement in concrete. *Transactions Hong Kong Institution of Engineers*, Vol 13 (4), 2-6.
- [CLAD14] Cladera,A., Pérez-Ordóñez,J.L., Martínez-Abella,F. 2014. Shear strength of RC beams. Precision, accuracy, safety and simplicity using genetic programming. *Computers and Concrete*, Vol 14 (4), 479-501.
- [COLL01] Collins,M. 2001. Evaluation of shear design procedures for concrete structures. A Report prepared for the CSA technical committee on reinforced concrete design.
- [COMI11] Comisión Europea. 2011. Comunicación de la Comisión al parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones. Hoja de ruta hacia una Europa eficiente en el uso de los recursos. Bruselas.
- [COMI16] Comisión Europea. 2016. Medio Ambiente para los Europeos. Acuerdo histórico sobre el clima en París. *Revista de la Dirección General de Medio Ambiente*. Vol. 59.
- [CONS16] ConSensor 2.0 – User Manual. <http://www.consenssor.eu/docs/user-manual.pdf>.
- [CORI04] Corinaldesi,V.,Moriconi,G. 2004. Concrete and mortar performance by using recycled aggregates.Proceedings of the international conference on sustainable waste management and recycling: construction demolition waste. UK: Thomas Telford. 157-164.
- [CORI09] Corinaldesi,V.,Moriconi,G. 2009. Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, Vol 23 (8), 2869-2876.
- [CORI12] Corinaldesi,V.,Moriconi,G. 2012. Characterization of lightweight mortars containing wood waste. *American Concrete Institute, ACI Special Publication*. (289 SP), 215-228.
- [CORR06] Correia,J.R., De Brito,J., Pereira,A.S. 2006. Effects on concrete durability of using recycled ceramic aggregates. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Vol 39 (286), 169-177.

- [CUEN13] Cuenca,J., Rodríguez,J., Martín-Morales,M., Sánchez-Roldán,Z., Zamorano,M. 2013. Effects of olive residue biomass fly ash as filler in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, Vol 40, 702-709.
- [DEMI04] Demirboga,R., Türkmen,I., Karakoç,M.B. 2004. Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixtured concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol 34 (12), 2329-2336.
- [DEMI14] Demis,S., Tapali,J.G., Papadakis,V.G. 2014. An investigation of the effectiveness of the utilization of biomass ashes as pozzolanic materials. *Construction and Building Materials*, Vol 68, 291-300.
- [ELIN02] Elinwa,A.U.,Mahmood,Y.A. 2002. Ash from timber waste as cement replacement material. *Cement and Concrete Composites*, Vol 24 (2), 219-222.
- [ELIN14] Elinwa,A.U.,Mamuda,A.M. 2014. Sawdust ash as powder material for self-compacting concrete containing naphthalene sulfonate. *Advances in Civil Engineering*, Vol 2014
- [ELVE76] Elvery,R.H.,Ibrahim,L.A.M. 1976. ULTRASONIC ASSESSMENT OF CONCRETE STRENGTH AT EARLY AGES. *Magazine of Concrete Research*, Vol 28 (97), 181-190.
- [ESTE12] Esteves,T.C., Rajamma,R., Soares,D., Silva,A.S., Ferreira,V.M., Labrincha,J.A. 2012. Use of biomass fly ash for mitigation of alkali-silica reaction of cement mortars. *Construction and Building Materials*, Vol 26 (1), 687-693.
- [EVAN07] Evangelista,L.,de Brito,J. 2007. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, Vol 29 (5), 397-401.
- [EVAN10] Evangelista,L.,de Brito,J. 2010. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, Vol 32 (1), 9-14.
- [EVAN14] Evangelista,L.,De Brito,J. 2014. Concrete with fine recycled aggregates: A review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Vol 18 (2), 129-172.
- [ETXE07] Etxeberria,M., Marí,A.R., Vázquez,E. 2007. Recycled aggregate concrete as structural material. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Vol 40 (5), 529-541.
- [FANG15] Fanghui,H., Qiang,W., Jingjing,F. 2015. The differences among the roles of ground fly ash in the paste, mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, Vol 93, 172-179.
- [FERN01] Fernández Gómez,J., González Isabel,G., Hostalet Alba,F., Ley Urzáiz,J., Izquierdo,J., Quirós,B. 2001. Evaluación de la capacidad resistente de estructuras de hormigón: ensayos no destructivos y pruebas de carga. INTEMAC (Instituto Técnico de Materiales y Construcciones). ISBN 84-88764-12-X.
- [FLOR14] Flores-Medina,D., Flores Medina,N., Hernández-Olivares,F. 2014. Static mechanical properties of waste rests of recycled rubber and high quality recycled rubber from crumbed tyres used as aggregate in dry consistency concretes. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Vol 47 (7), 1185-1193.
- [FONS11] Fonseca,N., De Brito,J., Evangelista,L. 2011. The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste. *Cement and Concrete Composites*, Vol 33 (6), 637-643.

- [GARA81] Garay Guerrero,A. 1981. Comportamiento de sólidos heterogéneos (hormigón) frente a sollicitaciones ultrasónicas. *Informes de la Construcción*, Vol 33 (332), 43-54.
- [GARC10] García Calvo, J.L., Hidalgo, A., Alonso, M.C., Luxán, M.P., Fernández Luco, L. 2010. Caracterización de residuos procedentes de los procesos de combustión de biomasa. Viabilidad de uso como materiales de construcción.
- [GARC13] Garcia,M.D.L.,Sousa-Coutinho,J. 2013. Strength and durability of cement with forest waste bottom ash. *Construction and Building Materials*, Vol 41, 897-910.
- [GEAR12] GEAR. 2012. Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD). Proyecto GEAR. GERD, Gremio de Entidades de Reciclaje de Derribos, Universidad Politécnica de Catalunya, Universidad Politécnica de Valencia, Universidad de A Coruña, Universidad de Oviedo, AITEMIN, INTROMAC y AIDICO, Madrid. Madrid. ISBN 978-84-939391-2-0.
- [GESO15a] Gesoglu,M., Güneysi,E., Öz,H.Ö., Yasemin,M.T., Taha,I. 2015. Durability and Shrinkage Characteristics of Self-Compacting Concretes Containing Recycled Coarse and/or Fine Aggregates. *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol 2015
- [GESO15b] Gesoglu,M., Güneysi,E., Öz,H.Ö., Taha,I., Yasemin,M.T. 2015. Failure characteristics of self-compacting concretes made with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, Vol 98, 334-344.
- [GOME09] Gomes,M.,De Brito,J. 2009. Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: Durability performance. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Vol 42 (5), 663-675.
- [GONC95] Gonçalves,A. 1995. In situ concrete strength estimation. Simultaneous use of cores, rebound hammer and pulse velocity. *International Symposium NDT in Civil Engineering*. Germany. 977-984.
- [GONZ02] González Fonteboa,B. 2002. Hormigones con áridos reciclados procedentes de demoliciones: dosificaciones, propiedades mecánicas y comportamiento estructural a cortante. Universidade da Coruña. Tesis doctoral
- [GONZ14] Gonzalez-Corominas,A.,Etxeberria,M. 2014. Properties of high performance concrete made with recycled fine ceramic and coarse mixed aggregates. *Construction and Building Materials*, Vol 68, 618-626.
- [GONZ15a] González-Fonteboa, B., Carro López, D., Martínez-Abella, F., Martínez García C.,; Seara-Paz, S. 2015. Effects of seashell aggregates in concrete properties. *First International Conference on Bio-based Building Materials: ICBBM2015*. Clermont-Ferrand (Francia). ISBN: 978-2-35158-154-4.
- [GONZ15b] González-Fonteboa, B., Carro-López, D., Martínez-Abella, F., Martínez-García, C. Hormigones de limpieza y en masa con áridos procedentes de concha de bivalvo. *CONPAT 2015*. Lisboa, Portugal.

- [GONZ16] González-Taboada,I., González-Fonteboa,B., Martínez-Abella,F., Pérez-Ordóñez,J.L. 2016. Prediction of the mechanical properties of structural recycled concrete using multivariable regression and genetic programming. *Construction and Building Materials*, Vol 106, 480-499.
- [GRAN16] Granja,J.L. 2016. Continuous characterization of stiffness of cement-based materials: experimental analysis and micro-mechanics modelling. Universidade do Minho. Tesis doctoral.
- [HAN10] Han,M., Han,C. 2010. Use of maturity methods to estimate the setting time of concrete containing super retarding agents. *Cement and Concrete Composites*, Vol 32 (2), 164-172.
- [HASN77] Hansen P.F., Pedersen E.J. 1977. Maturity computer for controlled curing and hardening of concrete, *Nord. Betong*, 1, 19.
- [HANS92] Hansen,T. 1992. Recycling of demolished concrete and masonry—report of Technical Committee 37-DRC (demolition and reuse of concrete). *Rilem Report*, Vol 6
- [HANS04] Hansen,T.C. 2004. *Recycling of demolished concrete and masonry*. CRC Press.
- [HOBB07] Hobbs,B.,Tchoketch Kebir,M. 2007. Non-destructive testing techniques for the forensic engineering investigation of reinforced concrete buildings. *Forensic science international*, Vol 167 (2-3), 167-172.
- [HOSS09] Anwar Hossain,K.M. 2009. Influence of extreme curing conditions on compressive strength and pulse velocity of lightweight pumice concrete. *Computers and Concrete*, Vol 6 (6), 437-450.
- [HUAN11] Huang Q., Gardoni P., Hurlbauss S. 2011. Predicting concrete compressive strength using ultrasonic pulse velocity and rebound number. *ACI Materials Journal*, Vol 108 (4), 403-412.
- [HU14] Hu,J. 2014. The implementation of waste sawdust in concrete. *Advanced Materials Research*, Vol 941-944, 849-853.
- [JANG15] Jang,S.,Yun,H. 2015. Mechanical properties of ready-mixed concrete incorporating fine recycled aggregate. *Magazine of Concrete Research*, Vol 67 (12), 621-632.
- [JOHM10] Johnson,A., Catalan,L.J.J., Kinrade,S.D. 2010. Characterization and evaluation of fly-ash from co-combustion of lignite and wood pellets for use as cement admixture. *Fuel*, Vol 89 (10), 3042-3050.
- [JONE54] Jones,R. 1954. Testing of concrete by an ultrasonic pulse technique, *RILEM Int.Symp. on Nondestructive Testing of Materials and Structures*, Paris. Vol 1
- [KAKI88] Kakizaki,M., Harada,M., Soshiroda,T., Kubota,S., Ikeda,T., Kasai,Y. 1988. Strength and elastic modulus of recycled aggregate concrete.2nd International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry. 726-735. Tpkyp, Japón.
- [KAPL58] Kaplan,M. 1958. Compressive strength and ultrasonic pulse velocity relationships for concrete in columns. *American Concrete Institute*.

- [KATZ03] Katz,A. 2003. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol 33 (5), 703-711.
- [KEE71] Kee,C.F. 1971. Relation between strength and maturity of concrete. *American Concrete Institute*, Vol 68 (3), 196-203.
- [KHAF14] Khafaga,S.A. 2014. Production of High Strength Self Compacting Concrete Using Recycled Concrete as Fine and/or Coarse Aggregates. *World Applied Sciences Journal*, Vol 29 (4), 465-474.
- [KHAL06] Khalaf,F.M. 2006. Using crushed clay brick as coarse aggregate in concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol 18 (4), 518-526.
- [KHAT05] Khatib,J.M. 2005. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Research*, Vol 35 (4), 763-769.
- [KHOS14] Khoshkenari,A.G., Shafigh,P., Moghimi,M., Mahmud,H.B. 2014. The role of 0-2mm fine recycled concrete aggregate on the compressive and splitting tensile strengths of recycled concrete aggregate concrete. *Materials and Design*, Vol 64, 345-354.
- [KIM11] Kim,H., Chun,B., Park,T., Ryou,J. 2011. An investigation of the recycling of waste concrete as a cementitious material. *Journal of Ceramic Processing Research*, Vol 12 (2), 202-206.
- [KLEM16] Klemczak,B.,Batog,M. 2016. Heat of hydration of low-clinker cements. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol 123 (2), 1351-1360.
- [KLIE55] Klieger,P. 1955. Discussion of "Relation of Rebound Hammer Test Results to Sonic Modulus and Compressive Strength Data" by Perry H. Petersen and Ulrich W. Stoll.*Proc. Highway Res. Board*. Vol 34 392.
- [KOU09] Kou,S.C.,Poon,C.S. 2009. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, Vol 31 (9), 622-627.
- [KOZA92] Koza,J.R. 1992. Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection. MIT press.
- [LACH07] Lachemi,M., Hossain,K.M.A., Anagnostopoulos,C., Sabouni,A.R. 2007. Application of maturity method to slipforming operations: Performance validation. *Cement and Concrete Composites*, Vol 29 (4), 290-299.
- [LAPO11] Laport Rivas, F. 2011. Desarrollo de un nuevo sistema de instrumentación para la aplicación del método de la madurez en puentes de hormigón. Proyecto técnico. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidade da Coruña.
- [LATI12] Latif Al-Mufti,R.,Fried,A.N. 2012. The early age non-destructive testing of concrete made with recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, Vol 37 (0), 379-386.
- [LAWS11] Lawson,I., Danso,K.A., Odoi,H.C., Adjei,C.A., Quashie,F.K., Mumuni,I.I., et al. 2011. Non-destructive evaluation of concrete using ultrasonic pulse velocity. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, Vol 3 (6), 499-504.

- [LI09] Li,X. 2009. Recycling and reuse of waste concrete in China. Part II. Structural behaviour of recycled aggregate concrete and engineering applications. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol 53 (3), 107-112.
- [LI08] Li,X. 2008. Recycling and reuse of waste concrete in China: Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol 53 (1–2), 36-44.
- [LIN07] Lin,Y., Kuo,S.-, Hsiao,C., Lai,C.-. 2007. Investigation of pulse velocity-strength relationship of hardened concrete. *ACI Materials Journal*, Vol 104 (4), 344-350.
- [LOGT14] TREX-8 multi use temperature recorder with remote sensor. 2014. http://www.logtag-recorders.com/page/pdf/LTR-TREX-8_eng.pdf.
- [LOTF15] Lotfi,S., Eggimann,M., Wagner,E., Mróz,R., Deja,J. 2015. Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology. *Construction and Building Materials*, Vol 95, 243-256.
- [MAIA11] Maia,L., Azenha,M., Faria,R., Figueiras,J. 2011. Influence of the cementitious paste composition on the E-modulus and heat of hydration evolutions. *Cement and Concrete Research*, Vol 41 (8), 799-807.
- [MAIA12a] Maia,L., Azenha,M., Geiker,M., Figueiras,J. 2012. E-modulus evolution and its relation to solids formation of pastes from commercial cements. *Cement and Concrete Research*, Vol 42 (7), 928-936.
- [MAIA12b] Maia,L., Azenha,M., Faria,R., Figueiras,J. 2012. Identification of the percolation threshold in cementitious pastes by monitoring the E-modulus evolution. *Cement and Concrete Composites*, Vol 34 (6), 739-745.
- [MAIO03] Di Maio,A.A.,Traversa,L.P. 2003. Evaluation of recycled concrete by means of non destructive tests. *Materiales de Construcción*, Vol 53 (271-272), 37-46.
- [MALH04] Malhotra,V.M.,Carino,N.J. 2004. Handbook on nondestructive testing of concrete. CRC Press. West Conshohocken - USA. ISBN 0-8031-2099-0.
- [MART12] Martínez-Lage,I., Martínez-Abella,F., Vázquez-Herrero,C., Pérez-Ordóñez,J.L. 2012. Properties of plain concrete made with mixed recycled coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, Vol 37, 171-176.
- [MARTXX] Martínez-Lage,I., Velay-Lizancos,M., Vázquez-Burgo,P., Rivas-Fernández,M., Vázquez-Herrero,C., Ramírez-Rodríguez,A., Martín-Cano,M., *Concretes and mortars with waste paper industry: biomass ash and dregs (sin publicar)*.
- [MART14] Martínez-Molina W., Torres-Acosta A.A., Jáuregui J.C., Chávez-García H.L., Alonso-Guzmán E.M., Graff M., et al. 2014. Predicting concrete compressive strength and modulus of rupture using different NDT techniques. *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol 2014
- [MAS09] Mas Gracia,B., Cladera Bohigas,A. 2009. Efecto de la incorporación de árido mixto reciclado en las propiedades de hormigones no estructurales. *Hormigón y acero*, (253), 83-94.

- [MAS12] Mas,B., Cladera,A., Olmo,T.D., Pitarch,F. 2012. Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use. *Construction and Building Materials*, Vol 27 (1), 612-622.
- [MASC11] Maschio,S., Tonello,G., Piani,L., Furlani,E. 2011. Fly and bottom ashes from biomass combustion as cement replacing components in mortars production: Rheological behaviour of the pastes and materials compression strength. *Chemosphere*, Vol 85 (4), 666-671.
- [MATO15] Matos,A.M., Nunes,S., Sousa-Coutinho,J. 2015. Cork waste in cement based materials. *Materials and Design*, Vol 85, 230-239.
- [MEDI14] Medina,C., Zhu,W., Howind,T., Sánchez De Rojas,M.I., Frías,M. 2014. Influence of mixed recycled aggregate on the physical-mechanical properties of recycled concrete. *Journal of Cleaner Production*, Vol 68, 216-225.
- [MENE99] Meneghetti,L.C. 1999. Avaliação da resistência à compressão de concretos nas primeiras idades através do ultra-som. Dissertação (Mestrado)-Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
- [MESB02] Mesbah,H.A., Lachemi,M., Aïtcin,P.-. 2002. Determination of elastic properties of high-performance concrete at early ages. *ACI Materials Journal*, Vol 99 (1), 37-41.
- [MITC61] Mitchell,L.,Hoagland,G. 1961. Investigation of the Impact-Type Concrete Test Hammer. *Highway Research Board Bulletin*, (305).
- [NAVA14] Navarrina King, L. 2014. Estudio acústico en tubo de kundt de morteros con áridos procedentes de concha de bivalvo. Trabajo Fin de Máster. Máster de Investigación en Ingeniería Civil. Universidade da Coruña.
- [NYKA56] Nykanen,A. 1956. Hardening of concrete at different temperatures, especially below the freezing point.Proceedings of the RILEM Symposium: Winter Concreting, Copenhagen.
- [NUNE13] Nunes,S., Matos,A.M., Duarte,T., Figueiras,H., Sousa-Coutinho,J. 2013. Mixture design of self-compacting glass mortar. *Cement and Concrete Composites*, Vol 43, 1-11.
- [OHDA00] Ohdaira,E.,Masuzawa,N. 2000. Water content and its effect on ultrasound propagation in concrete - the possibility of NDE. *Ultrasonics*, Vol 38 (1), 546-552.
- [PASC00] Pascale,G., Di Leo,A., Carli,R. 2000. Evaluation of actual compressive strength concrete by NDT.15th world conference on non-destructive testing, 10p, Roma.
- [PERE10] Pérez,J.L., Cladera,A., Rabuñal,J.R., Abella,F.M. 2010. Optimal adjustment of EC-2 shear formulation for concrete elements without web reinforcement using Genetic Programming. *Engineering Structures*, Vol 32 (11), 3452-3466.
- [PERE11] Pérez Ordóñez,J.L. 2011. Metodología para orientar procesos de extracción de conocimiento basados en computación evolutiva. Aplicación al desarrollo de modelos y formulaciones en el ámbito del hormigón estructural. Universidade da Coruña. Tesis doctoral.

- [PERE12a] Pereira,P., Evangelista,L., De Brito,J. 2012. The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, Vol 28 (1), 722-729.
- [PERE12b] Pereira,P., Evangelista,L., De Brito,J. 2012. The effect of superplasticizers on the mechanical performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, Vol 34 (9), 1044-1052.
- [PERE12c] Pérez,J.L., Cladera,A., Rabuñal,J.R., Martínez-Abella,F. 2012. Optimization of existing equations using a new Genetic Programming algorithm: Application to the shear strength of reinforced concrete beams. *Advances in Engineering Software*, Vol 50 (1), 82-96.
- [PETE55] Petersen,P.H., Stoll,U.W., Klieger,P. 1955. Relation of Rebound-Hammer Test Results to Sonic Modulus and Compressive-Strength Data. *Highway Research Board Proceedings*. Vol 34
- [PHOO99] Phoon,K.K., Wee,T.H., Loi,C.S. 1999. Development of statistical quality assurance criterion for concrete using ultrasonic pulse velocity method. *ACI Materials Journal*, Vol 96 (5), 568-573.
- [PINT10] Pinto,R.C.A.,Schindler,A.K. 2010. Unified modeling of setting and strength development. *Cement and Concrete Research*, Vol 40 (1), 58-65.
- [POPO01] Popovics,S. 2001. Analysis of the concrete strength versus ultrasonic pulse velocity relationship. *Materials Evaluation*, Vol 59 (2), 123-130.
- [PRAC14] Prachasaree,W., Limkatanyu,S., Hawa,A., Samakrattakit,A. 2014. Development of Equivalent Stress Block Parameters for Fly-Ash-Based Geopolymer Concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol 39 (12), 8549-8558.
- [QASR00] Qasrawi H.Y. 2000. Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted. *Cement and Concrete Research*, Vol 30 (5), 739-746.
- [RAJA09] Rajamma,R., Ball,R.J., Tarelho,L.A.C., Allen,G.C., Labrincha,J.A., Ferreira,V.M. 2009. Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials. *Journal of hazardous materials*, Vol 172 (2–3), 1049-1060.
- [RAMO13] Ramos,T., Matos,A.M., Sousa-Coutinho,J. 2013. Mortar with wood waste ash: Mechanical strength carbonation resistance and ASR expansion. *Construction and Building Materials*, Vol 49, 343-351.
- [RAMO14] Ramos,T., Matos,A., Sousa Coutinho,J. 2014. Strength and Durability of Mortar Using Cork Waste Ash as Cement Replacement. *Materials research*, Vol 17 (4), 893-907.
- [RAST54] Rastrup,E. 1954. Heat of hydration in concrete. *Magazine of concrete research*, Vol 6 (17), 79-92.
- [RAVI88] Sri Ravindrajah,R., Loo,Y.H., Tam,C.T. 1988. Strength evaluation of recycled-aggregate concrete by in-situ tests. *Materials and Structures*, Vol 21 (4), 289-295.
- [RIDI11] Riding,K.A., Poole,J.L., Folliard,K.J., Juenger,M.C.G., Schindler,A.K. 2011. New model for estimating apparent activation energy of cementitious systems. *ACI Materials Journal*, Vol 108 (5), 550-557.

- [SALE11] Sales,A., De Souza,F.R., Almeida,F.D.C.R. 2011. Mechanical properties of concrete produced with a composite of water treatment sludge and sawdust. *Construction and Building Materials*, Vol 25 (6), 2793-2798.
- [SANC10] Sánchez de Juan,M. 2010. Áridos reciclados para aplicaciones de hormigón no estructural.
- [SANC04] Sánchez de Juan,M. 2004. Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Universidad Politécnica de Madrid. Tesis doctoral.
- [SBAR12] Sbartai,Z.M., Laurens,S., Elachachi,S.M., Payan,C. 2012. Concrete properties evaluation by statistical fusion of NDT techniques. *Construction and Building Materials*, Vol 37, 943-950.
- [SHU13] Shu,X.,Huang,B. 2013. Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview. *Construction and Building Materials*.
- [SOSH06] Soshiroda,T., Voraputhaporn,K., Nozaki,Y. 2006. Early-stage inspection of concrete quality in structures by combined nondestructive method. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Vol 39 (286), 149-160.
- [STRU84] Sturup,V., Vecchio,F., Caratin,H. 1984. Pulse velocity as a measure of concrete compressive strength. *American Concrete Institute, Special Publication*, Vol 82, 201-228.
- [SOUT13] Soutsos,M.N., Turu'Allo,G., Owens,K., Kwasny,J., Barnett,S.J., Basheer,P.A.M. 2013. Maturity testing of lightweight self-compacting and vibrated concretes. *Construction and Building Materials*, Vol 47, 118-125.
- [SOUT16] Soutsos,M., Hatzitheodorou,A., Kwasny,J., Kanavaris,F. 2016. Effect of in situ temperature on the early age strength development of concretes with supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials*, Vol 103, 105-116.
- [SU15] Su,H., Yang,J., Ling,T.-., Ghataora,G.S., Dirar,S. 2015. Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes. *Journal of Cleaner Production*, Vol 91, 288-296.
- [TEOD89] Teodoru,G. 1989. Use of simultaneous nondestructive tests to predict the compressive strength of concrete. *American Concrete Institute, Special Publication*, Vol 112, 137-152.
- [TKAC12] Tkaczewska,E., Mróz,R., Lój,G. 2012. Coal-biomass fly ashes for cement production of CEM II/A-V 42.5R. *Construction and Building Materials*, Vol 28 (1), 633-639.
- [TRTN14] Trtnik,G.,Gams,M. 2014. Recent advances of ultrasonic testing of cement based materials at early ages. *Ultrasonics*, Vol 54 (1), 66-75.
- [TRTN15] Trtnik,G.,Gams,M. 2015. Ultrasonic assessment of initial compressive strength gain of cement based materials. *Cement and Concrete Research*, Vol 67, 148-155.
- [VANB00] Van Beek,A. 2000. Dielectric properties of young concrete. Non-destructive dielectric sensor for monitoring the strength development of young concrete. Technische Universiteit Delft. Tesis doctoral

- [VELA11] Velay-Lizancos,M. 2011. Desarrollo de un nuevo procedimiento de estimación de la resistencia in situ del hormigón mediante ensayos no destructivos. Aplicación durante la construcción del viaducto del Ulló de la línea de FFCC del eje atlántico de alta velocidad. Universidad de A Coruña. Proyecto Técnico.
- [VELA15] Velay-Lizancos,M., Martínez-Lage,I., Vázquez-Herrero,C., Vázquez-Burgo,P. 2015. Empirical Definition of Effective Water/Cement Ratio in Mortars with Recycled Aggregate Depending on the Absorption. II International Congress on Sustainable Construction and Eco-Efficient Solutions. Sevilla - España.
- [VOIG03] Voigt T., Akkaya Y., Shah S.P. 2003. Determination of early age mortar and concrete strength by ultrasonic wave reflections. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol 15 (3), 247-254.
- [WADE10] Wade,S.A., Nixon,J.M., Schindler,A.K., Barnes,R.W. 2010. Effect of temperature on the setting behavior of concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol 22 (3), 214-222.
- [WANG07] Wang,S.,Baxter,L. 2007. Comprehensive study of biomass fly ash in concrete: Strength, microscopy, kinetics and durability. *Fuel Processing Technology*, Vol 88 (11–12), 1165-1170.
- [WANG08a] Wang,S., Miller,A., Llamazos,E., Fonseca,F., Baxter,L. 2008. Biomass fly ash in concrete: Mixture proportioning and mechanical properties. *Fuel*, Vol 87 (3), 365-371.
- [WANG08b] Wang,S., Llamazos,E., Baxter,L., Fonseca,F. 2008. Durability of biomass fly ash concrete: Freezing and thawing and rapid chloride permeability tests. *Fuel*, Vol 87 (3), 359-364.
- [WEI11] Wei,X.,Xiao,L. 2011. Influence of the aggregate volume on the electrical resistivity and properties of portland cement concretes. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, Vol 26 (5), 965-971.
- [YAPR11] Yaprak,H., Aruntas,H.Y., Demir,I., Simsek,O., Durmus,G. 2011. Effects of the fine recycled concrete aggregates on the concrete properties. *International Journal of Physical Sciences*, Vol 6 (10), 2455-2461.
- [YE01] Ye,G., Van Breugel,K., Fraaij,A.L.A. 2001. Experimental study on ultrasonic pulse velocity evaluation of the microstructure of cementitious material at early age. *Heron*, Vol 46 (3), 161-167.
- [YIKI15] Yikici,T.A.,Chen,H.-. 2015. Use of maturity method to estimate compressive strength of mass concrete. *Construction and Building Materials*, Vol 95, 802-812.
- [YILD11] Yildirim,H.,Sengul,O. 2011. Modulus of elasticity of substandard and normal concretes. *Construction and Building Materials*, Vol 25 (4), 1645-1652.
- [YUN89] Yun,C., Choi,K., Kim,S., Song,Y. 1989. Comparative evaluation of nondestructive test methods for in-place strength determination. *American Concrete Institute, Special Publication*, Vol 112, 111-136.
- [ZAJA14] Zajac,M.,Ben Haha,M. 2014. Experimental investigation and modeling of hydration and performance evolution of fly ash cement. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Vol 47 (7), 1259-1269.

- [ZHAN08] Zhang,J., Cusson,D., Monteiro,P., Harvey,J. 2008. New perspectives on maturity method and approach for high performance concrete applications. Cement and Concrete Research, Vol 38 (12), 1438-1446.
- [ZILCO1] Zilch,K.,Roos,F. 2001. HAUPTAUFSATZE-An equation to estimate the modulus of elasticity of concrete with recycled aggregates. Bauingenieur, Vol 76 (4), 187-190.

Referencias de normativas

Nomenclatura:

[EN XX] Normas europeas del CEN en su versión española de AENOR.

[UNE XX] Normas españolas de AENOR.

[RN XX] Normativa general.

CEN, Comité Europeo de Certificación y AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación

- [EN 01] Eurocódigo 2 - UNE-EN 1992-1-1:2013/A1:2015. Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación.
- [EN 02] UNE-EN 196-1:2005. Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas.
- [EN 03] UNE-EN 196-3:2005+A1:2009. Métodos de ensayo de cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen.
- [EN 04] UNE-EN 450-1:2013. Cenizas volantes para hormigón. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad.
- [EN 05] UNE-EN 933-1:2012. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.
- [EN 06] UNE-EN 933-3:2012. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas.
- [EN 07] UNE-EN 933-11:2009. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados.
- [EN 08] UNE-EN 933-11:2009/AC:2010. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados.
- [EN 09] UNE-EN 1097-2:2010. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación.
- [EN 10] UNE-EN 1097-6:2014. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua.

- [EN 11] UNE-EN 12504-2:2013 Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 2: Ensayos no destructivos. Determinación del índice de rebote.
- [EN 12] UNE-EN 12504-4:2006. Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos.
- [EN 13] UNE-EN 12390-2:2009. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia.
- [EN 14] UNE-EN 12390-2:2009/1M:2015. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia.
- [EN 15] UNE-EN 12390-3:2009. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.
- [EN 16] UNE-EN 12390-3:2009/AC:2011. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.
- [EN 17] UNE-EN 12390-13:2014. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 13: Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión
- [EN 18] UNE-EN 13791:2009. Evaluación de la resistencia a compresión in-situ en estructuras y elementos prefabricados de hormigón.
- [EN 19] UNE-EN 13791:2009 ERRATUM:2010. Evaluación de la resistencia a compresión in-situ en estructuras y elementos prefabricados de hormigón.
- [EN 20] UNE-EN 1015-9:2000/A1:2007. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 9: Determinación del periodo de trabajabilidad y del tiempo abierto de mortero fresco.

AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación

- [UNE 01] UNE 83-454-91. Adiciones al hormigón. Cenizas volantes: determinación del principio y fin de fraguado del cemento portland conteniendo ceniza volante.
- [UNE 02] UNE 103-103-94. Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande.
- [UNE 03] UNE 103-104-93. Determinación del límite plástico de un suelo.
- [UNE 04] UNE 103-109-95. Método de ensayo para determinar el índice "Equivalente de Arena" de un suelo.

Otras normativas

- [RN 01] ACI Committee 228. 1998. ACI Committee 228, Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures, ACI 228.2R-98. American Concrete Institute, Farmington Hills.
- [RN 02] ASTM International. 2008. C618-08a. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- [RN 03] ASTM International. 2013. ASTM C805 / C805M - 13a Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete.

- [RN 04] ASTM International. 2011. ASTM C1074-11. Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method.
- [RN 05] BS 1881-203:1986. Testing concrete. Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete.
- [RN 06] BS 8500-2:2015. Concrete. Complementary British Standard to BS EN 206. Specification for constituent materials and concrete.
- [RN 07] DIN 4226-1:2001-07. Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel - Teil 1: Normale und schwere Gesteinskörnungen. Deutschland.
- [RN 08] Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas. Diario Oficial de la Unión Europea del 22 de noviembre de 2008.
- [RN 09] EHE-08. 2008. Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08. Ministerio de Fomento. Gobierno de España.
- [RN 10] ISO 1920-7:2004. Testing of concrete - Part 7: Non-destructive tests on hardened concrete.
- [RN 11] LNEC E 471-2009. Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos. Portugal.
- [RN 12] NTC-2008. Norme tecniche per le costruzioni. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Italia.

Bibliografía

Ahmad,N., Rahim,R.A., Rahim,H.A., Rahiman,M.H.F. 2014. A review of ultrasonic application on non-destructive testing method for concrete structure. *Jurnal Teknologi*, (3), 119-122.

Alves,A.V., Vieira,T.F., De Brito,J., Correia,J.R. 2014. Mechanical properties of structural concrete with fine recycled ceramic aggregates. *Construction and Building Materials*, Vol 64, 103-113.

Alwash,M., Breyse,D., Sbartai,Z.M. 2015. Non-destructive strength evaluation of concrete: Analysis of some key factors using synthetic simulations. *Construction and Building Materials*, Vol 99, 235-245.

Balakrishna,M.N.,Jayaramappa,N. 2011. Evaluation of concrete strength by non-destructive methods. *Journal of Structural Engineering (Madras)*, Vol 37 (6), 395-402.

Beutel,R., Reinhardt,H.-., Grosse,C.U., Glaubitt,A., Krause,M., Maierhofer,C., et al. 2008. Comparative performance tests and validation of NDT methods for concrete testing. *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol 27 (1-3), 59-65.

De Brito,J., Pereira,A.S., Correia,J.R. 2005. Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates. *Cement and Concrete Composites*, Vol 27 (4), 429-433.

Cachim,P.B. 2009. Mechanical properties of brick aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, Vol 23 (3), 1292-1297.

Carro-López,D., González-Fonteboá,B., De Brito,J., Martínez-Abella,F., González-Taboada,I., Silva,P. 2015. Study of the rheology of self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, Vol 96, 491-501.

Chávez-García,H.L., Alonso-Guzmán,E.M., Martínez-Molina,W., Graff,M., Arteaga-Arcos,J.C. 2014. Prediction of the static modulus of elasticity using four non destructive testing. *Revista de la Construcción*, Vol 13 (1), 33-40.

Chen,H.-., Yen,T., Chen,K.-. 2003. Use of building rubbles as recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*, Vol 33 (1), 125-132.

Chung,C.-., Suraneni,P., Popovics,J.S., Struble,L.J., Weiss,W.J. 2013. Application of ultrasonic P-wave reflection to measure development of early-age cement-paste properties. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Vol 46 (6), 987-997.

Cladera,A.,Marí,A.R. 2004. Shear design procedure for reinforced normal and high-strength concrete beams using artificial neural networks. Part I: Beams without stirrups. *Engineering Structures*, Vol 26 (7), 917-926.

Cladera,A.,Marí,A.R. 2004. Shear design procedure for reinforced normal and high-strength concrete beams using artificial neural networks. Part II: Beams with stirrups. *Engineering Structures*, Vol 26 (7), 927-936.

Corinaldesi,V. 2010. Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, Vol 24 (9), 1616-1620.

D'Aloia,L.,Chanvillard,G. 2002. Determining the "apparent" activation energy of concrete: E_a - Numerical simulations of the heat of hydration of cement. *Cement and Concrete Research*, Vol 32 (8), 1277-1289.

- Darquennes,A., Staquet,S., Kamen,A., Delplancke-Ogletree,M.-., Espion,B. 2009. Early age properties development of concrete with different slag contents.American Concrete Institute, ACI Special Publication. (259 SP), 35-57.
- de Juan,M.S.,Gutiérrez,P.A. 2009. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, Vol 23 (2), 872-877.
- Di Maio,A.A., Zega,C.J., Traversa,L.P. 2005. Estimation of compressive strength of recycled concretes with the ultrasonic method. *Journal of ASTM International*, Vol 2 (5), 179-186.
- Domingo,A., Lázaro,C., Gayarre,F.L., Serrano,M.A., López-Colina,C. 2010. Long term deformations by creep and shrinkage in recycled aggregate concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Vol 43 (8), 1147-1160.
- Domingo-Cabo,A., Lázaro,C., López-Gayarre,F., Serrano-López,M.A., Serna,P., Castaño-Tabares,J.O. 2009. Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, Vol 23 (7), 2545-2553.
- Etxeberria,M., Vázquez,E., Marí,A., Barra,M. 2007. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol 37 (5), 735-742.
- Etxeberria,M., Vázquez,E., Marí,A. 2006. Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete. *Magazine of Concrete Research*, Vol 58 (10), 683-690.
- Fernandez,I., Etxeberria,M., Marí,A.R. 2016. Ultimate bond strength assessment of uncorroded and corroded reinforced recycled aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, Vol 111, 543-555.
- Figueiredo,A., Lapa,J., Vicente,R., Cardoso,C. 2016. Mechanical and thermal characterization of concrete with incorporation of microencapsulated PCM for applications in thermally activated slabs. *Construction and Building Materials*, Vol 112, 639-647.
- González-Fonteboa,B., Martínez-Abella,F., Carro-López,D., Seara,S. 2011. Stress-strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, Vol 25 (5), 2335-2342.
- González-Fonteboa,B., Martínez-Abella,F., Eiras-López,J., Seara-Paz,S. 2011. Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Vol 44 (10), 1759-1771.
- González-Fonteboa,B.,Martínez -Abella,F. 2005. Recycled aggregates concrete: Aggregate and mix properties. *Materiales de Construcción*, Vol 55 (279), 53-66.
- Grdic,Z.J., Toplicic-Curcic,G.A., Despotovic,I.M., Ristic,N.S. 2010. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, Vol 24 (7), 1129-1133.
- Haach,V.G., Juliani,L.M., Roz,M.R.D. 2015. Ultrasonic evaluation of mechanical properties of concretes produced with high early strength cement. *Construction and Building Materials*, Vol 96, 1-10.

- Juan Valdés,A., Medina Martínez,C., Guerra Romero,M.I., Llamas García,B., Morán del Pozo,J., Tascón Vegas,A. 2010. Re-use of construction and demolition residues and industrial wastes for the elaboration or recycled eco-efficient concretes. Spanish Journal of Agricultural Research, Vol 8 (1), 25-34.
- Krauß,M.,Hariri,K. 2006. Determination of initial degree of hydration for improvement of early-age properties of concrete using ultrasonic wave propagation. Cement and Concrete Composites, Vol 28 (4), 299-306.
- Li,X., Fu,Z., Luo,Z., Li,S., Tian,B., Niu,K. 2013. Concrete Strength Estimation Using the Maturity Method. Advanced Materials Research, Vol 857, 35-41.
- Liu,S., Zhu,J., Seraj,S., Cano,R., Juenger,M. 2014. Monitoring setting and hardening process of mortar and concrete using ultrasonic shear waves. Construction and Building Materials, Vol 72, 248-255.
- López Gayarre,F. 2008. Influencia de la variación de los parámetros de dosificación y fabricación del hormigón reciclado estructural sobre sus propiedades físicas i mecánicas. Universidad de Oviedo. Tesis doctoral.
- López-Gayarre,F., Serna,P., Domingo-Cabo,A., Serrano-López,M.A., López-Colina,C. 2009. Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. Waste Management, Vol 29 (12), 3022-3028.
- Manso,J.M., Polanco,J.A., Losañez,M., González,J.J. 2006. Durability of concrete made with EAF slag as aggregate. Cement and Concrete Composites, Vol 28 (6), 528-534.
- Manso,J.M., Losañez,M., Polanco,J.A., Gonzalez,J.J. 2005. Ladle furnace slag in construction. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol 17 (5), 513-518.
- Mas,B., Cladera,A., Bestard,J., Muntaner,D., López,C.E., Piña,S., et al. 2012. Concrete with mixed recycled aggregates: Influence of the type of cement. Construction and Building Materials, Vol 34, 430-441.
- Matias,D., De Brito,J., Rosa,A., Pedro,D. 2013. Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates - Influence of the use of superplasticizers. Construction and Building Materials, Vol 44, 101-109.
- Medina,C., Sánchez De Rojas,M.I., Frías,M. 2013. Freeze-thaw durability of recycled concrete containing ceramic aggregate. Journal of Cleaner Production, Vol 40, 151-160.
- Medina,C., Sánchez De Rojas,M.I., Frías,M. 2013. Properties of recycled ceramic aggregate concretes: Water resistance. Cement and Concrete Composites, Vol 40, 21-29.
- Medina,C., Juan,A., Frias,M., Sanchez de Rojas,M.I., Moran,J.M., Guerra,M.I. 2011. Characterization of concrete made with recycled aggregate from ceramic sanitary ware. Materiales de Construcción, Vol 61 (304), 533-546.
- Nobile,L. 2014. Prediction of concrete compressive strength by combined non-destructive methods. Meccanica, Vol 50 (2), 411-417.
- Ortega-López,V., Manso,J.M., Cuesta,I.I., González,J.J. 2014. The long-term accelerated expansion of various ladle-furnace basic slags and their soil-stabilization applications. Construction and Building Materials, Vol 68, 455-464.

- Pacheco-Torgal,F.,Jalali,S. 2010. Reusing ceramic wastes in concrete. *Construction and Building Materials*, Vol 24 (5), 832-838.
- Pérez,J.L., Vieito,I., Rabuñal,J., Martínez-Abella,F. 2013. Genetic programming to improvement FIB model bond and anchorage of reinforcing steel in structural concrete. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, Vol 7902 LNCS (PART 1), 463-470.
- Pérez,J.L., Eiras,J., Martínez-Abella,F., Rabuñal,J.R. 2010. Artificial Intelligence techniques applied to reinforced concrete. *Structures and Architecture - Proceedings of the 1st International Conference on Structures and Architecture, ICSA 2010*. 1739-1746.
- Pérez,J.L., Rabuñal,J.R., Abella,F.M. 2010. Soft computing techniques in civil engineering: Time series prediction. *Soft Computing Methods for Practical Environment Solutions: Techniques and Studies*, 143-159.
- Pérez,J.L., Abella,F.M., Catoira,A., Berrocal,J. 2009. Special time series prediction: Creep of concrete. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, Vol 5517 LNCS (PART 1), 1184-1191.
- Pérez,J.L., Miguélez,M., Rabuñal,J.R., Martínez Abella,F. 2008. Applying genetic programming to civil engineering in the improvement of models, codes and norms. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, Vol 5290 LNAI, 452-460.
- Popovics J.S. 2005. Ultrasonic testing of concrete structures. *Materials Evaluation*, Vol 63 (1), 50-55.
- Popovics,J.S.,Subramaniam,K.V.L. 2015. Review of Ultrasonic Wave Reflection Applied to Early-Age Concrete and Cementitious Materials. *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol 34 (1)
- Rahal,K. 2007. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and Environment*, Vol 42 (1), 407-415.
- Rojas-Henao L., Fernández-Gómez J., López-Agüí J.C. 2012. Rebound hammer, pulse velocity, and core tests in self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal*, Vol 109 (2), 235-243.
- Roziere,E., Cortas,R., Loukili,A. 2015. Tensile behaviour of early age concrete: New methods of investigation. *Cement and Concrete Composites*, Vol 55, 153-161.
- Samarin A.,Meynink P. 1981. USE OF COMBINED ULTRASONIC AND REBOUND HAMMER METHOD FOR DETERMINING STRENGTH OF CONCRETE STRUCTURAL MEMBERS. *Concrete International*, Vol 3 (3), 25-29.
- Senthamarai,R.M.,Devadas Manoharan,P. 2005. Concrete with ceramic waste aggregate. *Cement and Concrete Composites*, Vol 27 (9-10), 910-913.
- Song,X., Wu,Y., Gu,X., Chen,C. 2015. Bond behaviour of reinforcing steel bars in early age concrete. *Construction and Building Materials*, Vol 94, 209-217.
- Stefan,L., Benboudjema,F., Torrenti,J.-., Bissonnette,B. 2010. Prediction of elastic properties of cement pastes at early ages. *Computational Materials Science*, Vol 47 (3), 775-784.
- Subramaniam,K.V.,Lee,J. 2007. Ultrasonic assessment of early-age changes in the material properties of cementitious materials. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Vol 40 (3), 301-309.

- Tabsh,S.W.,Abdelfatah,A.S. 2009. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction and Building Materials*, Vol 23 (2), 1163-1167.
- Taewan,K.,Rens,K.L. 2008. Concrete maturity method using variable temperature curing for normal and high-strength concrete. I: Experimental study. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol 20 (12), 727-734.
- Trtnik,G., Kavcic,F., Turk,G. 2009. Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks. *Ultrasonics*, Vol 49 (1), 53-60.
- Voigt,T., Malonn,T., Shah,S.P. 2006. Green and early age compressive strength of extruded cement mortar monitored with compression tests and ultrasonic techniques. *Cement and Concrete Research*, Vol 36 (5), 858-867.
- Voigt,T., Grosse,C.U., Sun,Z., Shah,S.P., Reinhardt,H.-. 2005. Comparison of ultrasonic wave transmission and reflection measurements with P- and S-waves on early age mortar and concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Vol 38 (282), 729-738.
- Waller,V., D'Aloia,L., Cussigh,F., Lecrux,S. 2004. Using the maturity method in concrete cracking control at early ages. *Cement and Concrete Composites*, Vol 26 (5), 589-599.
- Yang,J., Du,Q., Bao,Y. 2011. Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. *Construction and Building Materials*, Vol 25 (4), 1935-1945.