



Evaluación y análisis de sus propiedades de su durabilidad y de la aplicación de los morteros reciclados que utilizan materiales secundarios

Francisca Guadalupe Cabrera Covarrubias

ADVERTIMENT La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del repositori institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) i el repositori cooperatiu TDX (<http://www.tdx.cat/>) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual **únicament per a usos privats** emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei UPCommons o TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a UPCommons (*framing*). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del repositorio institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) y el repositorio cooperativo TDR (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=es>) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual **únicamente para usos privados enmarcados** en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio UPCommons. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a UPCommons (*framing*). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the institutional repository UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) and the cooperative repository TDX (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=en>) has been authorized by the titular of the intellectual property rights **only for private uses** placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading nor availability from a site foreign to the UPCommons service. Introducing its content in a window or frame foreign to the UPCommons service is not authorized (*framing*). These rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



Tesis Doctoral

Evaluación y análisis de sus
propiedades de su durabilidad y de la
aplicación de los morteros reciclados
que utilizan materiales secundarios

Candidata a doctora:

Francisca Guadalupe Cabrera Covarrubias

Directores:

Dr. José Manuel Gómez Soberón

Dr. Jorge Luis Almaral Sánchez

TESIS POR COMPENDIO DE PUBLICACIONES



TESIS DOCTORAL

Evaluación y análisis de sus propiedades de su durabilidad y de la aplicación de los morteros reciclados que utilizan materiales secundarios

Por: *Francisca Guadalupe Cabrera Covarrubias*

Directores:

Dr. José Manuel Gómez Soberón

Dr. Jorge Luis Almaral Sánchez

PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS DE
BARCELONA

**TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO DE
DOCTORA POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE
CATALUÑA**

BARCELONA, ESPAÑA, 2017

El futuro pertenece a aquellos que creen en la belleza de sus sueños

-Eleanor Roosevelt-.

Agradecimientos

Al Dr. José Manuel Gómez, por todo, porque sin su apoyo esta investigación no hubiera sido posible. Tengo que decir que trabajé bajo la dirección de un excelente doctor, y una excelente persona, a quien le tengo respeto y admiración, por todas las enseñanzas y conocimientos que me ha brindado, por la paciencia y por todo el tiempo disponible para mí con la tesis y trabajos, así como la oportunidad de ayudar en actividades académicas de las cual siempre había algo que aprender. Por su confianza e invitación para trabajar con él en un principio y por participar en la dicha de haber vivido en esta hermosa ciudad, así como el considerarlo parte de mi familia por todo lo convivido profesional y personalmente en estos últimos años.

Al Dr. Jorge Luis Almaral, por todo el apoyo desde mis estudios de licenciatura, por confiar en mí, y contribuir de forma importante con mi objetivo de realizar el doctorado, estando siempre en contacto antes y durante del mismo. Gracias a su ayuda pude obtener el apoyo económico indispensable para hacer esto posible.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por su programa de becas en el extranjero, y de la que fui beneficiaría.

Al programa de Doctores Jóvenes de la Universidad Autónoma de Sinaloa, por el apoyo económico del que fui otorgado.

Al personal del laboratorio de materiales de la EPSEB, por su todo su apoyo durante la fase experimental.

A toda mi familia, principalmente a mis papás, mis hermanas y mi esposo, quienes me han apoyado en todo momento y en las ocasiones complicadas siempre han tenido las palabras adecuadas para animarme a continuar.

A Ramón y Paola, por todo el apoyo académico, pero sobre todo personal; ustedes contribuyeron en ese punto de inflexión en mi vida, para venir a estudiar aquí.

A toda la familia Cabrera y Covarrubias por todo su cariño y apoyo a la distancia; así como las amistades de México.

A todos los amigos con los que conviví en Barcelona y toda la gente maravillosa que conocí durante este tiempo, entre ellos mi familia política. Incontables momentos, y muy buenos y bonitos recuerdos.

GRACIAS...

Dedicatoria

A mis padres José Antonio y Anna María, porque gracias a ellos, a su educación, enseñanzas y amor, han hecho la persona que soy; porque fueron las bases que me dieron, las que me han permitido llegar hasta el día hoy. A ellos que son mi más grande bendición.

A mis hermanas Rocío y Alejandra, mis mejores amigas, las que han estado, están y estarán siempre en mi corazón, como parte de mí.

A mi esposo Sergi, el que hace que mi vida sea completa en todos los sentidos, el que con su amor y su apoyo, hace que me sienta la mujer más afortunada del mundo. El que me alienta y confía en mí en todo lo que hago.

Para el amado pequeñito de la familia, mi hermoso Saíd; para que cuando sea grande no tenga duda de que los sueños y propósitos se pueden lograr.

A mis abuelos: mamá Coyo, mi nana Esther y mi tata Boni; por su cariño y apoyo a lo largo de mi vida.

A Dios, por tantas bendiciones en mi vida, por todo.

Resumen

En los últimos años el aumento de residuos generados por diversos sectores ha ocasionado problemas de gestión de residuos que en su mayoría tienen como destino final los vertederos; sin embargo, esta opción es inaceptable por los problemas económicos y medioambientales que estos conllevan. Por otra parte, el sector de la construcción desempeña un importante rol en el desarrollo económico de un país; no obstante que éste genera un gran impacto ambiental debido a la extracción de materiales vírgenes. Debido a que los recursos naturales necesarios en la construcción son limitados, es adecuado y necesario la búsqueda de alternativas que cumplan con funciones equiparables a los áridos usuales, y así mismo reduzcan el consumo de los recursos no renovables. Por tanto, materiales reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición u otros residuos sólidos, pueden ser aprovechados utilizándoseles (mediante un proceso adecuado) como árido reciclado en hormigones y morteros. Puesto que la normativa actual no permite el uso de áridos en su fracción fina en hormigones, y su uso en morteros aún no se ha normado; en esta investigación se aborda el estudio de morteros que incorporan áridos finos reciclados procedentes de hormigón, vidrio y materiales cerámicos en sustitución de diferentes porcentajes del árido usual (10, 15, 20, 30, 50, 60 y 100%). La investigación se centra en el estudio científico particular de los aspectos y características de cada mortero reciclado y del propio residuo que es utilizado; los cuales, antes de la fabricación de los morteros se les requirió de su caracterización (como también del árido usual) para su comparación y adecuación equiparable para su usarse en morteros. Fabricar los morteros, se efectuaron ensayos característicos de su estado en fresco (consistencia, densidad y contenido del aire) y endurecido (densidad, absorción, compresión, flexión y módulo de elasticidad), así como de durabilidad (retracción básica, total y por secado) a diferentes edades de estudio. En cuanto a las propiedades en estado fresco, la investigación presentó como variable adicional el efecto de la relación cemento:arena (1:3.25, 1:4 y 1:4.75). Puesto que esta tesis satisface con la modalidad de compendio de publicaciones se presentan tres artículos, de los cuales dos hacen referencia a las propiedades de los morteros, y uno a hormigones reciclados. El primer artículo acomete el estudio de las propiedades en estado fresco de morteros con diferentes porcentajes de árido cerámico y para las diferentes relación cemento:arena; con los resultados experimentales obtenidos se obtuvo un diagrama de interacción que relaciona de una forma fácil, las propiedades de los mismos con referente al porcentaje de sustitución. El segundo artículo presenta los resultados obtenidos en el estudio de las propiedades en estado endurecido (con énfasis en el módulo de elasticidad) de los morteros, en el que por medio de análisis específico de la curva tensión-deformación característica de los mismos se obtienen las propiedades de su tenacidad y su resiliencia; así como la extrapolación numérica de sus ecuaciones que permiten su predicción. La tercera publicación presenta el estudio de hormigones fabricados con árido grueso reciclado proveniente de residuos de hormigón como sustituto del árido usual; en estos, se utilizaron además diferentes porcentajes de un aditivo con origen en PET. Dicho aditivo fue obtenido por medio de un proceso químico e incorporado como mejora de la microestructura de los hormigones, la cual se traduce en una disminución de la alta porosidad ocasionada del uso de los áridos reciclados. Como anexo de esta tesis, se proporcionan otros artículos que complementan parte del estudio realizado con el tema de investigación, los cuales versan de diversas propiedades de morteros con áridos reciclados de vidrio y de hormigón.

Abstract

In recent years the increase in waste generated by various sectors has caused problems of waste management that mostly have as final destination the landfills; however, this option it is unacceptable for the economic and environmental problems that these entail. On the other hand, the construction sector plays an important role in the economic development of a country; nevertheless, it generates a great environmental impact due to the extraction of virgin materials. Since the natural resources in the construction are limited, is appropriate and necessary the search for alternatives that comply with comparable functions to the usual aggregates, and reduce the consumption of non-renewable resources. Therefore, recycled materials proceeding from residues of construction and demolition or other solid residues, can be harnessed by using them (through a suitable process) as recycled aggregates in concrete and mortars. Since the current regulations do not allow the use of aggregates in their fine fraction in concrete, and their use in mortars has not yet been regulated; This study addresses the study of mortars that incorporate recycled fine aggregates from concrete, glass and ceramic materials to replace different percentages of the usual aggregate (10, 15, 20, 30, 50, 60 and 100%). The research focuses on the particular scientific study of the aspects and characteristics of each recycled mortar and of the own waste that is used; which, prior to the manufacture of mortars was them required his characterization (as also of the aggregate usual one) for its comparison and comparable adequacy for its use in mortars. Manufacture of mortars; tests were carried out corresponding to its fresh state (consistency, density and air content) and hardened (density, absorption, compression, flexure and modulus of elasticity), as well as durability (basic, total and drying shrinkage) at different ages of study. As regards the properties in fresh condition, the research presented as additional variable the effect of the cement:sand ratio (1:3.25, 1:4 and 1:4.75). Since this thesis satisfies the publication compendium modality, three articles are presented, of which two refer to the properties of the mortars, and one to recycled concrete. The first article undertakes the study of the properties in fresh state of mortars with different percentages of ceramic aggregate and for the different cement:sand ratio; with the experimental results obtained, an interaction diagram was obtained which easily relates the properties of the same with reference to the percentage of substitution. The second article presents the results obtained in the study of the properties in hardened state (with emphasis on the modulus of elasticity) of the mortars, in which by means of specific analysis of the stress-strain curve characteristic of the same, obtained the properties of tenacity and resilience; As well as the numerical extrapolation of its equations that allow its prediction. The third publication presents the study of concrete manufactured with coarse recycled aggregate from wastes of concrete as a substitute for the usual aggregate; in these, different percentages of an additive with origin in PET were also used. This additive was obtained through a chemical process and incorporated as improvement of microstructure of concrete, which translates into a decrease of high porosity caused by the use of the recycled aggregates. As an annex to this thesis, other articles complementing the study carried out with the research theme are provided, which deal with different mortar properties with recycled aggregates of glass and concrete.

Índice

Índice	i
Índice de figuras	iii
Índice de tablas	v
Abreviaturas	vii
Capítulo 1	1
Objetivos y estructura de la tesis	3
OBJETIVO GENERAL	3
ESTRUCTURA DE LA TESIS	3
Capítulo 2	7
Introducción sobre los morteros con áridos de residuos de construcción y demolición	9
ASPECTOS GENERALES	9
USOS DE ÁRIDOS RECICLADOS	10
TIPOLOGÍAS DE ÁRIDOS RECICLADOS	10
APLICACIONES DE USOS DE ÁRIDOS RECICLADOS FINOS	10
CONSIDERACIONES ESPECÍFICAS DEL USO DE ÁRIDO RECICLADO	11
USOS DE ADICIONES EN MORTEROS CON ÁRIDOS RECICLADOS	11
PROPIEDADES DE LOS MORTEROS QUE CONTIENEN ÁRIDO DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN	12
ESTADO FRESCO	12
ESTADO ENDURECIDO	13
DURABILIDAD	20
Introducción sobre los morteros con áridos de vidrio reciclado	23
ASPECTOS GENERALES	23
USOS DEL VIDRIO RECICLADO	23
TIPOLOGÍAS DE VIDRIOS RECICLADOS	24
APLICACIONES DEL VIDRIO RECICLADO FINO	24
CONSIDERACIONES ESPECÍFICAS DEL USO DEL VIDRIO RECICLADO	25
USO DEL VIDRIO RECICLADO EN COMBINACIÓN CON OTROS MATERIALES CEMENTANTES Y ADITIVOS	25
PROPIEDADES DE LOS MORTEROS QUE CONTIENEN VIDRIO RECICLADO	26
ESTADO FRESCO	26
ESTADO ENDURECIDO	28
DURABILIDAD	33
Introducción de morteros con áridos de material cerámico reciclado	35
ASPECTOS GENERALES	35
USOS DE RESIDUOS CERÁMICOS	36
TIPOLOGÍAS DE ÁRIDOS RECICLADOS CERÁMICOS	36
APLICACIONES DE USOS DE ÁRIDOS FINOS CERÁMICOS	37

CONSIDERACIONES ESPECÍFICAS DEL USO DE ÁRIDO RECICLADO CERÁMICO	37
PROPIEDADES DE LOS MORTEROS QUE CONTIENEN CERÁMICOS RECICLADOS	37
ESTADO FRESCO	37
ESTADO ENDURECIDO	39
DURABILIDAD	43
Referencias	45
Capítulo 3	51
Capítulo 4	59
Capítulo 5	87
Discusión global de los resultados y conclusiones	109
Perspectivas a futuro	113
ARTÍCULOS EN PROCESO	113
DATOS EN PROCESO DE ANÁLISIS	113
INVESTIGACIONES FUTURAS	113
ANEXOS	115
<i>ANEXO 1</i>	117
<i>ANEXO 2</i>	125
<i>ANEXO 3</i>	141

Índice de figuras

Figure 3-1. Equations of linear regression and theirs reliability, with experimental values of CeRM	56
Figure 3-2. Diagram of triple interaction of properties in fresh of CeRM	57
Figure 4-1. σ - ε curve diagram	64
Figure 4-2. XRD diffractogram for the CA and UA studied	66
Figure 4-3. (a) General configuration of the experimental arrangement; (b) detail of LSC; and (c) idealized scheme from set	68
Figure 4-4. Curve σ - ε resulting from a test	68
Figure 4-5. Compressive strength of the RCM at 90 days of age	70
Figure 4-6. (a) UM (0% of CA); and (b) RCM10 (10% of CA)	71
Figure 4-7. SEM of: (a) RCM50 (50% of CA); and (b) RCM100 (100% of CA)	71
Figure 4-8. Microanalysis of components by mapping in SEM of the majority compounds: (a) RCM50; and (b) RCM100	72
Figure 4-9. σ - ε curves of the RCM	72
Figure 4-10. Graphs of the different properties of the RCM vs. RF: (a) RF vs. fm and 0.4 fm; and (b) RF vs. E and E0; (c) RF vs. T and Ur; (d) RF vs. ε_{max} . and $\varepsilon_{elastic}$	75
Figure 4-11. E prediction equation for RCM confronted with real experimental data, and reported in other investigations	78
Figure 4-12. Curve σ - ε simulated for the RCM: (a) up to $\sigma_{elastic}$; and (b) up to σ_{max}	80
Figure 5-1. a) Granulometry of natural aggregate fine (NAfine); (b) Granulometry of coarse aggregates (recycled [RAcoarse] and natural [NAcoarse])	92
Figure 5-2. FTIR spectra for ages of 3, 7, 14 and 28 days of hydration: (a) Anhydride cement and the cement pastes; (b) Anhydride cement and cement pastes with 9% of RR; a.u.: absorbance units	96
Figure 5-3. Distribution of pores obtained in the gas adsorption test (intrusion phase) for the samples studied	97
Figure 5-4. Idealized graphic diagram of microstructural behavior for the proposed new stage of additive overdosage (Stage 4RR _{exceeded})	98
Figure 5-5. X-ray diffraction (XRD) for the different concrete modified with polymer and recycled aggregate (RPC). 1: calcium hydroxide (CH); 2: hydrated calcium silicates (CSH)	98
Figure 5-6. Specific surface determined by means of the Brunauer-Emmett-Teller (BET) method of the mixtures tested	99
Figure 5-7. Correlation between the Maximum radius and the Pore volume (to water) of the different concretes modified with polymer and recycled aggregate (RPC)	100
Figure 5-8. Correlation between the Maximum radius and, the Modulus of elasticity and Compressive strength, of the different concretes modified with polymer and recycled aggregate (RPC)	100
Figure 5-9. Correlation between the Medium radius and the Pore volume of the different concretes modified with polymer and recycled aggregate (RPC)	101
Figure 5-10. Correlation between the Medium radius and the Modulus of elasticity of the different concretes modified with polymer and recycled aggregate (RPC)	101
Figure 5-11. Correlation between the Critical radius of saturation and the Pore volume of the different concretes modified with polymer and recycled aggregate (RPC)	102
Figure 5-12. Correlation between the Pore volume (N ₂) and the Pore volume (to water) of the different concretes modified with polymer and recycled aggregate (RPC)	102
Figure 5-13. Correlation between the Pore volume and the Density of the different concretes modified with polymer and recycled aggregate (RPC)	103

Índice de tablas

Table 3-1. Physical properties of aggregates	54
Table 3-2. Dosings of the CeRM (for 1 dm ³)	55
Table 3-3 Results of tests of the CeRM	56
Table 4-1. Physical properties of aggregates	66
Table 4-2. Characteristic and proportions of the mixtures	67
Table 4-3. Density in hardened state of the RCM	70
Table 4-4. Properties of σ - ϵ of the RCM	74
Table 4-5. CC values for application in PEr equations of the RCM	78
Table 4-6. Values of the experimental properties and those determined through simulation	78
Table 4-7. Values of the constants for each of the curves	79
Table 4-8. Values CC for the different percentages of CA	79
Table 5-1. Properties of the original concrete (OC) used as recycled aggregates	91
Table 5-2. Properties of recycled aggregates (RAcoarse) and natural (NAcoarse and NAFine) used in the experiment	92
Table 5-3. Experimental techniques	93
Table 5-4. Quantities of materials used in the dosage of experimental mixtures	93
Table 5-5. Physical properties of concrete modified with polymer and recycled aggregate (RPC)	94
Table 5-6. Dynamic modulus of elasticity (Ed)	95
Table 5-7. Distribution of the pore size ranges obtained from the adsorbed gas test	99

Abreviaturas

a/c agua/cemento

ACR Árido cerámico reciclado

AHR Árido de hormigón reciclado

AN Árido natural

AVR Árido de vidrio reciclado

c:a cemento:arena

CRT Tubos de Rayos Catódicos Descartados

DRX Difracción de Rayos X

FTIR Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier

MCR Mortero de cerámico reciclada

MHR Mortero de hormigón reciclado

MN Mortero natural

MVR Mortero de vidrio reciclado

PET Polietileno tereftalato

ZTI Zona de Transición Interfacial

CAPÍTULO 1

Objetivos y estructura de la tesis

Objetivo general

El objetivo general de la presente tesis, es la evaluación y análisis de las propiedades que presentan morteros fabricados con diferentes porcentajes de áridos reciclados de distinta procedencia (de hormigón reciclado, vidrio y material cerámico) en sustitución del árido natural, y comparar su comportamiento respecto a los morteros usuales con árido natural; con el fin de contribuir en la gestión y reciclaje de residuos, que conlleva a un menor impacto ambiental y la reducción de la extracción de materiales vírgenes.

Como objetivos específicos se mencionan los siguientes:

- Caracterización de los tres materiales utilizados como áridos reciclados, con el fin de verificar su uso posible en morteros al compararlos con el árido natural.
- Estudio del efecto de la incorporación de cada uno de los áridos reciclados, en las propiedades en estado fresco y endurecido; así como de su durabilidad. Como parámetro principal, se estudiará el efecto que producen los diferentes porcentajes de sustitución del árido natural.
- Estudio del efecto de la relación agua/cemento en las propiedades en estado fresco (consistencia, densidad y contenido de aire) de los morteros reciclados.
- Contribuir con información a las investigaciones actuales, puesto que aun cuando se han realizado una gran cantidad de investigaciones y sus respectivas publicaciones, los resultados reportados presentan inconsistencias en su comportamiento o tendencias explicativas; por lo que esta tesis podría contribuir en la realización de una normativa específica para los diferentes áridos reciclados y que pueda ser aplicada para los morteros en general.

Objetivos específicos de los artículos que conforman el compendio de publicaciones:

- Realización de diagramas para predecir las propiedades en estado fresco de los morteros con áridos reciclados cerámicos, verificar su relación entre ellas y con respecto al porcentaje de sustitución.
- Determinar ecuaciones de predicción de las propiedades elásticas de los morteros con áridos cerámicos, tomando como datos los obtenidos en el comportamiento de la curva tensión-deformación.
- Estudio de hormigones que contienen áridos reciclados de hormigón como reemplazo de la fracción gruesa de los áridos naturales, así como diferentes porcentajes de un aditivo a base de polietileno tereftalato (PET), para la mejora de las propiedades de porosidad de los hormigones.

Estructura de la tesis

Esta tesis doctoral se presenta en la modalidad de compendio de publicaciones. La información proporcionada se divide en 5 capítulos; en el capítulo 2 se presenta la introducción al tema de investigación realizado y el estado del arte, el cual está dividido en tres apartados que corresponden a cada uno de los materiales utilizados en este estudio. Los capítulos 3, 4 y 5 presentan a los artículos que conforman el compendio de publicaciones, y que se encuentran publicados en revistas indexadas localizadas en el primer y segundo cuartil (de JCR/Scopus), cumpliendo con el requisito de la modalidad de esta tesis.

Los artículos que forman parte del compendio de publicaciones son los siguientes:

- F. G. Cabrera-Covarrubias, J. M. Gómez-Soberón, J. L. Almaral-Sánchez, R. Corral-Higuera, and M. C. Gómez-Soberón, “**Implementation of Interaction Diagram of the Properties in Fresh for Mortars with Ceramic Aggregates,**” *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 2016, pp. 1–6, 2016. doi:10.3311/PPci.9651

FI = 0.79 (Scopus)

- F. G. Cabrera-Covarrubias, J. M. Gómez-Soberón, J. L. Almaral-Sánchez, S. P. Arredondo-Rea, M. C. Gómez-Soberón, and R. Corral-Higuera, “**An Experimental Study of Mortars with Recycled Ceramic Aggregates: Deduction and Prediction of Stress-Strain,**” *Materials (Basel)*., vol. 9, no. 12, p. 24, 2016. doi:10.3390/ma9121029

FI = 2.728 (JCR)

- J. M. Mendivil-Escalante, J. M. Gómez-Soberón, J. L. Almaral-Sánchez, and F. G. Cabrera-Covarrubias, “**Metamorphosis in the Porosity of Recycled Concretes Through the Use of a Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) Additive. Correlations between the Porous Network and Concrete Properties,**” *Materials (Basel)*., vol. 10, no. 2, p. 19, 2017. doi:1996-1944/10/2/176

FI = 2.728 (JCR)

Como se expone de forma más extensa a lo largo del documento, el tema de tesis incluyó el uso de tres diferentes materiales reciclados (de hormigón, vidrio y cerámicos) para sustituir diferentes porciones del árido natural en los morteros, por tal motivo se proporciona la introducción y estado del arte correspondiente a cada tipo de mortero. A partir de esta investigación se han realizado diversos artículos, los cuales abordan la temática de los morteros reciclados, haciendo referencia a cada árido por separado. Sin embargo, los artículos que cumplen con la modalidad de esta tesis corresponden a solo uno de los materiales reciclados utilizados (áridos cerámicos). Por esta razón, en la sección de “anexos”, se incluyen otros artículos que han sido publicados y que complementan parte de toda la investigación realizada (experimental total realizada, pero parcialmente publicada actualmente o en proceso).

Como resumen de los artículos que conforman el compendio y que se presentan en los capítulos 3, 4 y 5 se exponen las siguientes argumentaciones:

Capítulo 3. Implementation of Interaction Diagram of the Properties in Fresh for Mortars with Ceramic Aggregates. En este artículo se presenta el estudio de las propiedades en estado fresco (consistencia, densidad y contenido de aire) de los morteros que contienen 10, 20, 30, 50 y 100% de áridos cerámicos como reemplazo de la arena natural. Con los datos experimentales obtenidos, se realizó un análisis estadístico mediante coeficientes de regresión, para lograr realizar un gráfico de entrada triple que permite relacionar de forma simple y directa –no experimental–, las propiedades de los morteros y simplificar la predicción de las relaciones que presentarán desde la fase de diseño de la mezcla.

Capítulo 4. An Experimental Study of Mortars with Recycled Ceramic Aggregates: Deduction and Prediction of Stress-Strain. En este segundo artículo, se presentan los resultados experimentales de densidad, resistencia a compresión y curvas de tensión-deformación (σ - ϵ), obtenidos de morteros con diferentes porcentajes de áridos reciclados cerámicos (10, 20, 30, 50 y 100%) en reemplazo del árido natural. Por medio del análisis de los resultados se obtuvieron otros valores, tales como: σ (rango elástico y máximo de falla), ϵ (rango elástico y máximo de falla), su Resiliencia y su Tenacidad. A partir de estos últimos datos y por medio de simulación de análisis numérico, se realizaron ecuaciones de predicción de comportamiento, relacionadas con el contenido de reemplazo del árido cerámico.

Capítulo 5. Metamorphosis in the Porosity of Recycled Concretes Through the Use of a Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) Additive. Correlations between the Porous Network and Concrete Properties. En este artículo se expone la evaluación de las propiedades físicas, mecánicas y micro

estructurales de hormigones preparados con 100% de áridos gruesos reciclados de hormigón. Como característica de este estudio, es la inclusión de un aditivo basado en polietileno tereftalato (PET) producido por síntesis y glicolisis de botellas de PET recicladas, como alternativa para reducir su alta porosidad. Para evaluar el efecto del aditivo sobre las propiedades físicas, mecánicas y micro estructurales de estos hormigones, se utilizaron técnicas experimentales que determinaron la porosidad mediante adsorción de gas, la porosidad del agua, la detección de compuesto mediante Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) y la Difracción de Rayos X (DRX). Además, se explica la red porosa de estos hormigones y su correlación con sus propiedades físicas y mecánicas.

En el caso particular del tercer artículo, mencionar que el trabajo realizado por la ponente fue como colaboradora del mismo, ya que este estudio se enfoca en el estudio de hormigones. Sin embargo, es tema de interés y con relación al tema de tesis presente, debido al uso de áridos reciclados con procedencia en hormigones (uno de los materiales utilizados en los morteros de esta tesis). Además, la importancia se enfoca en las propiedades de porosidad que es afectada por los áridos reciclados (similar tanto en morteros y hormigones); en particular a la microestructura y Zona de Transición Interfacial (ZTI) entre el árido reciclado y la pasta de cemento. No obstante que en la presente tesis no se proporcionan datos sobre el estudio de la porosidad, sí es un objetivo de trabajo a futuro por medio de la técnica de adsorción de gases (campaña experimental realizada sin publicación). Esta técnica ha sido utilizada en el tema de tesis, sin embargo, nos encontramos en la fase de análisis y escritura de un artículo para su publicación.

A continuación, se proporcionan los datos más importantes de los artículos que también han sido publicados durante los estudios de doctorado y que complementan la presente tesis; estos se han seleccionado para su presentación por pertenecer a revistas indexadas en JCR, así como Index Copernicus. La versión completa se puede consultar en la sección de “anexos”. Estos artículos permitirán ofrecer una visión más amplia del tema investigado:

- F. G. Cabrera-Covarrubias, J. M. Gómez-Soberón, J. L. Almaral-Sánchez, S. P. Arredondo-rea, and R. Corral-Higuera, “**Mechanical properties of mortars containing recycled ceramic as a fine aggregate replacement**,” Rev. la Construcción, vol. 14, no. 3, pp. 22–29, 2015.

FI = 0.185 (JCR)

- F. G. Cabrera-Covarrubias, J. M. Gómez-Soberon, J. L. Almaral-Sánchez, S. P. Arredondo-Rea, and J. M. Mendivil-Escalante, “**Mechanical and Basic Deformation Properties of Mortar with Recycled Glass as a Fine Aggregate Replacement**,” Int. J. Civ. Eng., pp. 1–15, 2016.

FI = 0.372 (JCR)

- F. G. Cabrera-covarrubias, J. M. Gómez-soberón, J. L. Almaral-sánchez, S. P. Arredondo-rea, M. C. Gómez-soberón, and J. M. Mendivil-escalante, “**Propiedades en estado fresco de morteros con árido reciclado de hormigón y efecto de la relación c/a - Properties in fresh state of mortars with recycled aggregate concrete and effect of c/a relation**,” Ing. y Desarro., vol. 35, no. 1, 2017.

Index Copernicus

CAPÍTULO 2

Introducción sobre los morteros con áridos de residuos de construcción y demolición

Aspectos generales

El sector de la construcción desempeña un papel importante en el desarrollo económico de cada país, sin embargo presenta consecuencias negativas para el medio ambiente debido al aumento exponencial en el consumo de recursos naturales y energía. Sus actividades consumen —directa o indirectamente— alrededor del 42% de los materiales naturales extraídos [1], por tanto es necesario intervenir para fomentar prácticas más sostenibles sin reducir la actividad de la construcción, o en su caso reducir algunas de ellas [2][3]. Por otra parte, en los últimos años la construcción ha contribuido en la importante generación de residuos causados por el incremento de la industrialización, el avance de nuevas tecnologías, el crecimiento de la población y la emigración interna a los centros urbanos; causado esto que los residuos se conviertan en un problema urbano costoso y complicado de gestionar [4].

Los residuos derivados del sector de la construcción, se les conoce conceptualmente como residuos de construcción y demolición (RCD), y se le denomina así a cualquier sustancia u objeto que, cumpliendo la definición de “residuo” incluida en el artículo 3.a) de la Ley 10/1998, de 21 de abril, se genera en una obra de construcción y demolición [5]. Éstos proceden en su mayoría de la construcción de infraestructuras y edificaciones de nueva planta, así como de la demolición de inmuebles antiguos, sin olvidar los derivados de pequeñas obras de reforma de viviendas y locales [6].

Debido al gran volumen de RCD y a su creciente producción, la eliminación de residuos se ha convertido en un grave problema social y ambiental [7]; la falta de infraestructura tecnológica adecuada que brinde el servicio de recolección, transporte, aprovechamiento y disposición final de los mismos, así como la eliminación no reglamentada por la deficiencia de las políticas con respecto a su gestión, ocasiona que la mayor parte de ellos terminen en vertederos, perjudicando al medio ambiente urbano y contribuyendo a efectos negativos tales como inundaciones y proliferación de vectores dañinos para la salud pública, lo cual que se ve reflejado en aumentos en gastos de recursos públicos [8][9][4][10].

Cambios legislativos en materia medioambiental acontecidos en España, ofrece un marco legislativo en el que empieza a considerarse que no reutilizar dichos residuos no es viable ni ventajoso económicamente para la sociedad, estando en algunos casos obligado a hacerse por ley; esto conlleva a la necesidad de dar respuesta al problema de la gestión de los residuos ocasionados por las demoliciones de edificios y estructuras, así como por su construcción [11][12].

Lo descrito anterior, ha conducido a la realización de diferentes estudios sobre las posibilidades de reinserción de los RCD en el ciclo productivo. Algunos objetivos, por lo cual se lleva a cabo el estudio de estos son los siguientes [13][14][7][15][3][16]:

- Modificación de las propiedades mecánicas y físicas de los materiales de construcción, interesándose en propiedades tecnológicas de los nuevos materiales y sus posibilidades de aplicación.
- Diseño de aplicaciones arquitectónicas y de ingeniería para los nuevos materiales de construcción, teniendo en cuenta la producción y los aspectos de fabricación.
- El interés de productores y fabricantes de materiales de construcción, que están interesados en específico en soluciones de valorización del árido, reduciendo costes de gestión de residuos y la eficiencia económica.

- La contribución del uso de RCD en la reducción del impacto ambiental, al reducir la extracción y consumo de los áridos naturales.
- El impacto social deberá considerarse cuando se fabrican productos nuevos. Estos materiales implicados tienen que garantizar la salud y la integridad de las personas, así como el medio ambiente en contacto con ellos.
- En los últimos tiempos, la deficiencia de árido natural con buena calidad, conduce a la utilización alternativa de árido reciclado.

Usos de áridos reciclados

En algunos países de Europa, como es el caso de Italia, los áridos reciclados procedentes de los RCD, son actualmente utilizados principalmente en la construcción de secciones de carreteras, para rellenos en excavaciones, capas de balasto o en base de cimentaciones. Para estas aplicaciones, se hace uso del material sin ser tratado previamente, pero que si éste se selecciona adecuadamente, se muele, se limpia y se tamiza en adecuadas instalaciones industriales de trituración, los escombros de la demolición de edificios podrían ser útiles para aplicaciones con los estándares de desempeño más altos como lo es para el hormigón estructural [17][18][19][20][21][22][10]. Así mismo, el considerar a los áridos como la materia prima de gran importancia en el sector de la construcción y el desarrollo económico de un país, su uso también ha sido propuesto para la producción de morteros como sustituto del árido fino, para la creación de diferentes elementos constructivos [13][17][23][20][2][4][15][10].

Tipologías de áridos reciclados

Existen diferentes tipos de áridos reciclados para ser utilizados, de los cuales se debe de conocer su origen y su composición para poder determinar las aplicaciones en las que estos se pueden destinar. Con base a esto, los áridos reciclados pueden ser clasificados de acuerdo a su fracción granulométrica como: zahorras, arenas y gravas, las cuales son utilizadas en bases y sub-bases, pero que en la actualidad, algunos de éstos también se están usando como materia prima en la fabricación de hormigones estructurales y no estructurales, así como también en morteros [24].

De acuerdo a su procedencia, los áridos reciclados se clasifican como: áridos de hormigón, áridos de asfalto, áridos de cerámico y materiales inertes; de estos, los reciclados procedentes de hormigón, son los que presentan un mayor número de aplicaciones, por lo que son los más estudiados. El origen de los áridos reciclados puede ser estructuras de edificios, cimentaciones, bases de firmes rígidas, prefabricados, etc. [24][25][21][26]. Así mismo, existen plantas de tratamiento de áridos reciclados, las cuales se enfocan en diferentes materiales por separados, tales como el reciclado de cerámica y el más común, de hormigón [10], haciendo posible la obtención de diferentes tamaños de partículas. De acuerdo a su tamaño de gradación, los áridos reciclados se clasifican en áridos gruesos reciclados de hormigón (> a 4.75 - 5 mm), el cual es utilizado como material de base de carretera, y de forma reciente en la fabricación de nuevos hormigones; y el árido fino de hormigón reciclado (< de 4.75 - 5 mm) para su uso en morteros [19][16].

Por lo que respecta a los RCD su composición se caracteriza por ser muy heterogénea, incluyendo materiales tales como: ladrillos, azulejos, cerámicos, hormigón, piedra, arena, grava; y en menor cantidad: papel, plástico, madera, metales, vidrio [18][27][2]. Las impurezas de madera, plástico y papel afectan seriamente las propiedades mecánicas, sin embargo su efecto es menor después del tratamiento de reciclado [18]. Cuando los RCD se componen por un solo elemento mayoritario (> 95% en peso), con un porcentaje mínimo de impurezas (< 5%) se clasifican como “limpios” (o “sucios”, en caso contrario)[24].

Aplicaciones de usos de áridos reciclados finos

En España, la nueva Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) regula la utilización de este tipo de material granular, permitiendo única y exclusivamente la utilización de la fracción gruesa (tamaño superior a 4 mm), sustituyendo un 20% en peso sobre el contenido total del árido grueso natural [28][22][10]. En Italia, las normas UNI EN 12620 y UNI 8520 permiten el uso de la fracción reciclada gruesa proveniente

de la demolición de edificios sólo para hormigones de baja resistencia (clase de resistencia de 25 MPa), y el uso de la fracción reciclada gruesa procedente de hormigón demolido, para hormigones con clase de resistencia de hasta 35 MPa. Como consecuencia de esto, una gran cantidad de materiales finos reciclados no pueden ser reutilizados en hormigones o en aplicaciones donde un mayor tamaño de partícula se es solicitado [21].

En el proceso de producción y mejora en las cualidades del árido grueso reciclado para su uso en hormigón, se producen una gran cantidad de partículas de menos de 5 mm de diámetro, la cuales son consideradas de baja calidad para ser utilizadas en el hormigón [29]; se ha demostrado en varios estudios, que la fracción fina del árido reciclado es perjudicial tanto para las prestaciones mecánicas como para la durabilidad [30]. A partir de esto, el uso de la fracción fina de los áridos reciclados en la fabricación de morteros, ha sido considerada una alternativa constructiva para el reciclaje de los RCD en el sector de la construcción [17][23][20][2][15][10]. Teniendo en cuenta los requisitos de las diferentes aplicaciones de los morteros (albañilería, revoco, revestimiento) y el medio ambiente al que se somete, la incorporación de finos es una potencial aplicación para el aprovechamiento de la fracción fina de hormigón reciclado, añadiendo que su uso puede ofrecer beneficios en términos de rendimiento [4]. Sin embargo a diferencia del hormigón estructural, la fabricación de morteros con áridos reciclado no está sujeta a normativa estructural, lo que comporta un mayor número de medidas conservadoras en cuanto a diseño y utilización de materiales [22].

El uso de áridos reciclados finos cumple con el concepto de desarrollo sostenible implementado en el siglo XXI, el cual comprende el reciclaje y la reutilización de escombros de construcción, desempeñando un papel clave en la culminación del ciclo de vida del edificio [23][20][26].

Consideraciones específicas del uso de árido reciclado

Algunas de las razones principales que afectan a la calidad de los áridos reciclados, y por consiguiente la fabricación de hormigones y morteros que contienen a estos, es la gran cantidad de mortero de cemento que permanece en la superficie del árido original, así como la heterogeneidad de materiales distintos del hormigón en el árido reciclado, como son el caso de ladrillos y tejas trituradas [31][18][32]. La presencia de estas partículas provoca mayor porosidad del árido reciclado, caracterizándose por una alta absorción de agua y menor densidad con respecto al árido natural [24][19][33]. Impurezas tales como el yeso, ladrillo y asfalto, presentes en hormigón estructural demolido, también pueden ser responsables de disminuciones de las propiedades de resistencia de los morteros [26]. El tamaño y distribución de las partículas del árido reciclado, es uno de los aspectos que interviene en la variabilidad de los RCD [34] ocasionado en algunos casos por el proceso de triturado, el cual puede proporcionar áridos con mayor cantidad de cemento adherida al mismo o áridos muy finos, que si bien en algunos aspectos puede parecer benéfico, se debe tomar en cuenta el impacto ambiental que ocasiona por requerir más energía para producirse [16].

Con base en lo anterior, es evidente la necesidad de un mercado atractivo para los áridos reciclados y de un organismo normalizador que regule su utilización dentro del sector de la construcción y que favorezca su utilización de forma generalizada [24].

Usos de adiciones en morteros con áridos reciclados

En la literatura reportan el uso de diferentes materiales que ayudan a mejorar una o varias de las propiedades tanto físicas, como mecánicas y químicas de los morteros que contienen árido reciclado fino. Fibras de polipropileno y fibras de acero han sido añadidas para reducir la retracción y mejorar la resistencia a la flexión respectivamente [31][17]. Como sustituto parcial del cemento se han utilizado ceniza volante y polvo de ladrillo en morteros con 100% de árido reciclado; los usos de estas adiciones han sido estudiadas en términos de actividad puzolánica, debido a que la ceniza volante es un subproducto industrial, la cual su reutilización está en línea con el desarrollo sostenible. El sustituir total o parcial al cemento y a la arena natural, tiene como finalidad el obtener un beneficio medioambiental sin perjudicar el rendimiento del mortero [23].

Propiedades de los morteros que contienen árido de residuos de construcción y demolición

El siguiente apartado es una síntesis del estado del conocimiento de los morteros que utilizan áridos de RCD (que a partir de aquí se identificará como árido de hormigón reciclado (AHR) –debido a que el árido estudiado en esta tesis está compuesto en su mayoría por residuos de hormigón–), extraída en su totalidad de trabajos previos reportados, haciendo mención y comparación del comportamiento en estado fresco y endurecido de los morteros fabricados con estos áridos (morteros de hormigón reciclado –MHR–), tomando como referencia el mortero usual (mortero natural –MN–). Con base a lo explicado en este apartado, se demuestra la variabilidad de los estudios realizados por otros autores y la inconsistencia en las tendencias presentadas, y que por tanto, es evidente la necesidad de más estudios, con el fin de establecer normativas que permitan su uso. La necesidad de uso y aprovechamiento de este material es favorable puesto que presentan resultados positivos en algunas de sus propiedades, además de beneficios en cuanto al aspecto económico y ambiental en la sociedad.

Estado fresco

En este apartado se reporta el comportamiento de los MHR en estado fresco; siendo este estado incipiente de los mismos, el preámbulo que garantizará un adecuado y deseado desempeño en su estado endurecido posterior.

Consistencia

Diferentes estudios que realizaron el ensayo de consistencia en los MHR, siguieron el procedimiento señalado por la norma EN 1015-3, así como la Norma Brasileña NBR 13276, con el objetivo de determinar la cantidad de agua necesaria para que las mezclas alcanzaran una consistencia específica. En todos ellos han señalado, que cuando se añade AHR en los MHR, es necesaria una dosificación más alta de agua con respecto a la necesitada por el MN [3][20][21]; cuando conjuntamente se les incorporan otras adicciones, tales como polvo de vidrio (como reemplazo parcial del cemento); o en otros casos, fibras de polipropileno, se ha reportado demanda adicional de agua para lograr la misma consistencia [23][17]. El comportamiento de mayor demanda de agua, se atribuye a que el AHR presenta mayor absorción con respecto al AN y que por tanto es requerida mayor cantidad de agua para compensar dicha absorción [2]; sin embargo, se recomienda que el contenido en las mezclas no sea muy alto, ya que esto ocasionaría mayor retracción por secado, la cual puede provocar la aparición de fisuras [22]. Además, se ha puntualizado que la relación a/c afecta también la propiedades de resistencia de los MHR, ya que al comparar mezclas con a/c diferentes, las que contienen mayor cantidad de agua ocasionan pérdidas de resistencia, mientras que con cantidades bajas se alcanzan resistencias superiores [18]. Como alternativa para disminuir la cantidad de agua en las mezclas, Saiz-Martínez et al., 2015 [10] incorporaron aditivos con el objetivo de obtener MHR operables con resistencia fluida, sin modificar las proporciones. Con los aumentos del porcentaje de sustitución (en este estudio de hasta el 45% de AHR), fue necesario mayor cantidad de aditivos (entre 2% y 4% en peso de cemento) para obtener la consistencia de entre 165 mm y 185 mm según la norma UNE-EN 1015-3.

En estudio presentado por Fan et al., 2015 [16], realizaron la prueba de flujo en MHR con diferentes porcentajes de sustitución de AN por AHR (25, 50 y 100%), y para dos diferente relación a/c = 0.35 y 0.55, siguiendo lo especificado en la norma ASTM C1437-13; además como variable de estudio adicional, el uso de dos diferentes tipos de AHR (con el mismo origen) que difieren en su proceso de trituración. Los resultados obtenidos indicaron que todas las mezclas con relación a/c = 0.55 e independiente al porcentaje de sustitución, presentaron valores de flujo superiores (154% en este estudio); sin embargo con relación a/c = 0.35 presentaron valores de flujo más bajos que lo especificado por la normativa, incluso para la mezcla de MN (de control). Además, los valores de flujo disminuyeron con el aumento en el contenido de AHR, con comportamiento similar con el uso de los dos diferentes tipos; sin embargo el AHR caracterizado por presentar tamaño de partículas “gruesas”, presentó valores de flujo más bajos que los presentados por el AHR con partículas “finas”, cuando se sustituyeron las mismas cantidades. Este comportamiento lo atribuyeron a las características de las partículas gruesas, que tenían una textura de la superficie más rugosa y con mayor angulosidad, que ocasionan mayor fricción entre las mismas. En este estudio se hace énfasis en la importancia del porcentaje de sustitución de los AHR, ya que influye en las propiedades físicas y

mecánicas de los MHR resultantes; así mismo se demuestra la importancia del proceso de trituración utilizado en la producción del AHR.

Por otra parte, comportamiento contrario a los anteriores reportaron Braga et al., 2012 [4], que reemplazaron el 5, 10 y 15% de AN por AHR con tamaño de partícula < 0.150 mm. Los resultados obtenidos mostraron que a medida que aumentaba el porcentaje de sustitución, menor cantidad de agua fue necesaria para lograr la consistencia deseada; tal conducta fue atribuida al tamaño de las partículas del AHR, que al ser muy finas ocuparon los huecos que previamente estaban llenos de agua. En este estudio se indicó que el tamaño, forma y textura de las partículas, justifican la disminución de la relación a/c, y por tanto son de relevancia en las propiedades en estado fresco de los MHR. Comportamiento similar se reporta en estudio realizado por Leonardo F. R. Miranda & Selmo, 2006 [34] al reemplazar diferentes cantidades de AN por AHR con tamaño de partícula < 75 μm ; la relación a/c disminuyó, con el aumento de contenido de finos de AHR en los MHR. Se explicó como causa posible, el área específica de los granos de AHR, y el contenido de huecos en los MHR que podría ser menor para aquellos con distribución de tamaño de grano continuo. De acuerdo a los resultados obtenidos, se concluyó que la distribución del tamaño de AHR fino, puede controlar mejor el requerimiento de agua de los MHR.

Densidad

En lo que respecta a la densidad en estado fresco, estudios realizados por Vegas et al., 2009 [22] y Neno et al., 2014 [3] reportaron que la densidad disminuye a medida que se incrementa el porcentaje de sustitución de AN por AHR. Este comportamiento fue atribuido a la menor densidad del propia AHR comparada con la del AN; concluyendo que cuando mayor sea la diferencia de la densidad de los áridos, así como el porcentaje de sustitución de AN con AHR, mayor será la diferencia de densidad en los MHR. Por otra parte, Braga et al., 2012 [4] observaron comportamiento contrario a los anteriores, obteniendo que la densidad del MHR en estado fresco aumentó con la incorporación de AHR; aun cuando el AHR presentaba menor densidad que el AN. La incorporación del 5, 10 y 15% de AHR en las mezclas, ocasionaron un efecto de “relleno” de los huecos no ocupados por AN, al componerse (las primeras) por partículas de menor tamaño (< 0.149 mm).

Contenido de aire

Sobre el contenido de aire de los MHR poco se ha informado; Vegas et al., 2009 [22] reportaron que el contenido de aire de MHR con 25% de AHR como reemplazo del AN, se incrementó (en valores en porcentaje) de 12.1 a 12.5%. En este estudio se utilizaron diferentes reemplazos de AN por AHR (10, 20, 25, 50, 75 y 100%), y se determinó que los MHR con el uso de hasta un 25% de AHR no presentaron pérdidas significativas de prestaciones mecánicas, trabajabilidad y retracción; por tal razón se eligió tal porcentaje de sustitución para llevar a cabo más ensayos en los MHR, entre ellos el de la obtención de contenido de aire. Echevarría Caballero et al., 2005 [11] mencionan que la determinación de aire ocluido en los morteros, es uno de los ensayos correspondientes para afirmar que el uso de AHR en la fabricación de MHR, debido a su disposición y reactividad en la masa de mortero, presentan mecanismos de reacción y capilaridad capaces de atenuar e incluso eliminar los efectos perjudiciales que la alta absorción del AHR puede provocar en las resistencias finales alcanzadas por los MHR. En su estudio se compararon tres tipos de familias de MHR; en dos de ellas reemplazaron el 50, 80, 90 y 100% de AN por dos diferentes tipos de AHR (procedentes de diferente circuito de molienda), y en la tercera se realizaron dos mezclas compuestas por la combinación del AHR utilizado en las dos primeras familias. Los resultados obtenidos mostraron que todos los MHR de la primera familia (con AHR con origen en residuos de construcción y demolición) presentaron menor porcentaje de aire ocluido (entre 4.1 y 5.5%) que el MN (5.5%), mientras que para la segunda familia (con AHR formado mayoritariamente por clinker de cemento, restos de hormigones y asfaltos); y para la tercera familia, los resultados fueron superiores (entre 6.4 y 7%). Debido a los resultados obtenidos por los demás ensayos realizados, concluyeron afirmando que el AHR obtenido del tratamiento de residuos de construcción y demolición demuestra viabilidad técnica de uso.

Estado endurecido

En el presente apartado se reportan los diversos resultados obtenidos en el estudio de las propiedades de éstos en su estado llamado de endurecimiento. El siguiente listado abarca propiedades de las llamadas físicas, mecánicas estáticas, de deformación y de estructura de la matriz del material que permiten tener una visión global del mismo. El compendio presentado es el resumen de estas propiedades, y de su comprensión y correlación entre ellas.

Densidad

De acuerdo a estudios previos, los MHR presentan menor densidad en estado endurecido cuando el porcentaje de sustitución de AN por AHR aumenta, con tendencia similar al comportamiento de la densidad en estado fresco. La baja densidad de los MHR es ocasionada por la baja densidad del AHR que lo componen [22]. En estudio realizado por Fan et al., 2015 [16], obtuvieron la misma conducta cuando utilizaron dos tipos de AHR, así como para dos diferentes relación a/c; cuando mayor fue el porcentaje de sustitución, menor fue la densidad observada por los MHR con respecto al MN en todos los casos (entre 4 y 8%, con reemplazo total). El tipo de AHR caracterizado por presentar más partículas “gruesas”, ocasionó menor densidad en los MHR que los que contenían AHR de partículas “finas”, cuando ambos se compararon para el mismo porcentaje de sustitución, cuando se utilizó el 100% de AHR, las reducciones fueron del 3% para ambas relación a/c; esto ocasionado por la propia densidad diferente entre ambos tipos de AHR. Se concluye que el porcentaje de sustitución de AN por AHR [7], así como el proceso de trituración utilizado en la producción de AHR, son factores importantes que influyen en las propiedades tanto físicas como mecánicas de los MHR.

En estudio realizado por Dapena et al., 2011 [26], sustituyeron el 5, 10, 15, 20 y 50% de AN por AHR para tres diferentes series de mezclas; de acuerdo a los resultados obtenidos, se observó que con el uso máximo del 20% de AHR todas las mezclas de MHR se compactaron adecuadamente, presentando un densidad similar al MN (diferencia del 1%). Sin embargo, la sustitución del 50% la densidad se redujo 33 y 35% para dos de las series que contenían diferente tipo de cemento; en el caso específico de la serie 3, las densidades alcanzadas fueron mayores y comparables con el MN, debido al uso de superplastificante, el cual permitió disminuir la consistencia de la mezcla y facilitar la compactación de los MHR con los diferentes porcentajes de sustitución. Por otra parte, los resultados de Neno et al., 2014 [3], mostraron que la densidad de los MHR disminuye con una tendencia lineal, con reemplazos del AN por AHR mayor al 20%. El incremento inicial de densidad lo asociaron a la posible reducción de vacíos por el posible efecto de relleno causado por la mayor cantidad de partículas que pasan el tamiz de 0.063 mm (10.49%), que causaron un aumento en la masa para el mismo volumen. Para el caso de los MHR con sustituciones mayores al 20% el efecto de relleno se ve minimizado por la mayor cantidad de AHR, y que debido a su menor densidad, logra que este comportamiento predomine en la mezcla.

Comportamiento contrario a los anteriores fue presentado por Braga et al., 2012 [4], quienes obtuvieron aumento en la densidad endurecida de los MHR (2, 4 y 5%) a medida que se incrementa el porcentaje de sustitución de AHR (5, 10 y 15%); al igual que en el mortero fresco. La explicación que se dio, fue que los huecos (poros) de los MHR que no estaban ocupados por las partículas de AN, fueron ocupados por las partículas de AHR por ser más finas, y que, al incrementar su porcentaje, también llenaron los huecos que inicialmente estaban ocupados por agua; logrando con este comportamiento una mayor compacidad en los MHR.

Absorción de agua

Se ha mencionado que la absorción de agua de los morteros se ve afectada directamente por las características de absorción de los áridos que los componen; estudios previos han reportado que la absorción de los MHR es superior a la del MN, debido a la incorporación del AHR que presenta mayor absorción que el AN, provocada por el mortero adherido que lo conforman [7][10]. Este comportamiento también ha sido demostrado en MHR con diferentes relación c:a y a/c; Lopes Lima & Batista Leite, 2012 [2] reportaron que con el uso del 50% de AHR como reemplazo del AN, la absorción de los MHR aumentó el 47 y 31% con relación c:a = 1:4 y 1:8 respectivamente, atribuyendo tal conducta a la mayor porosidad del AHR, el cual estaba compuesto de materiales porosos tales como azulejo, ladrillo y mortero (viejo). Por su parte Fan et al., 2015 [16], realizaron mezclas de MHR para dos diferentes relación a/c (0.35 y 0.55) y sustituyendo

diferentes porcentajes de AN por AHR (25, 50, 75 y 100%), utilizando dos tipos de AHR los cuales tenían la misma procedencia pero obtenidos por diferente proceso de trituración. Los resultados de este estudio mostraron que los MHR presentaron mayor absorción con respecto al MN en todos los casos, notándose incrementos cuando mayor era el uso de AHR y mayor la relación a/c. Además, hacen mención de la importancia del proceso de triturado, ya que de este dependerán las características de los AHR que regirán las propiedades de los MHR; siendo una de ellas la absorción.

La mayor absorción de los AHR es una característica que tiene influencia negativa en los MHR, debido a la posible formación de cavidades dentro de los MHR una vez que el agua contenida en ellos se haya evaporado. Así mismo, la alta absorción de los AHR afecta la dosificación de agua de los MHR, por lo que es necesario el uso de aditivos cuando los reemplazos de AN por AHR son superiores al 10% [10]. Otros estudios también han reportado comportamiento similar de aumento de absorción en los MHR cuando se incrementa el contenido de AHR, haciendo énfasis en la importancia de la misma en los MHR para su uso en exteriores [22]. Además una mayor absorción del AHR influye en el aumento de contenido de aire, pérdidas de resistencia a la compresión y aumento en la retracción por secado de los MHR [29].

Absorción por capilaridad

En cuanto a la absorción por capilaridad, pocos estudios reportan datos sobre la misma; uno de ellos es el realizado por Cabrera Álvarez et al., 1997 [13] que reemplazaron el 100% de AN por AHR y para cuatro diferentes relación c:a (1:4, 1:5, 1:6 y 1:8). Los resultados obtenidos en dicho estudio, mostraron valores parecidos al MHR de referencia (c:a = 1:4); sin embargo no fue explicado tal comportamiento. Por otro lado, Vegas et al., 2009 [22] indicaron que el 25% de AHR ocasiona un aumento de 26% en la absorción por capilaridad de los MHR con respecto al MN. En este estudio la misma variable de MHR presenta menor densidad que el MN, por lo que es posible que la microestructura del mismo sea más porosa, permitiendo mayor flujo de agua capilar.

Comportamiento contrario se reporta en otros estudios, en los cuales el uso de AHR ocasionó disminución en la absorción por la capilaridad en los MHR. Braga et al., 2012 [4] reportaron que la sustitución del 5, 10 y 15% de AN por AHR mejora significativamente esta propiedad, reduciendo la absorción por capilaridad de los MHR en un 29, 40 y 44% respectivamente. Tal conducta fue atribuida a las partículas finas de AHR (< 0.150 mm) las cuales llenaron los huecos de la matriz del mortero, reduciendo la porosidad e impidiendo la circulación de agua a través de la misma. Además, estos resultados concuerdan con los obtenidos en resistencia a la compresión, donde se reportó que los MHR por lo general más compactos, presentaron mayor resistencia que el MN de referencia. En estudio realizado por Neno et al., 2014 [3], se sustituyó el 20, 50 y 100% de AN por AHR, reportando en todos los MHR, menor absorción por capilaridad con respecto al MN. Con reemplazos de hasta el 50%, se mostraron valores constantes y similares al MN; sin embargo con el reemplazo total, la absorción bajó significativamente (24%). El comportamiento de los MHR con 100% de AHR fue atribuido a que el diámetro medio de los poros era posiblemente más bajo, debido a la mejor interface entre el AHR y la matriz; así mismo otro factor relevante fue el hecho de que en dicho mortero se utilizó menor cantidad de agua en su dosificación (de los que solo contienen AHR), ocasionando reducción en el agua libre de la mezcla y el volumen de vacíos, adquiriendo una mejor cohesión entre las partículas, y por consiguiente, una disminución en la absorción por capilaridad.

Permeabilidad al vapor de agua

Se ha mencionado que la permeabilidad al vapor de agua favorece en el secado de los muros y detiene la condensación del agua en su superficie. En estudio realizado por Braga et al., 2012 [4], se reportó que el MHR con 15% de AHR ocasionó una reducción en la permeabilidad al vapor, con una diferencia del 18% respecto al MN; sin embargo, tal reducción fue considerada como mínima para un funcionamiento adecuado. Por otro lado, estudios realizados por Vegas et al., 2009 [22] y Neno et al., 2014 [3], reportan que el uso de hasta el 25 y 20% de AHR, aumentan ligeramente la permeabilidad al vapor en los MHR (14 y 5% respectivamente). Este comportamiento se atribuye al efecto de las partículas de AHR más porosas y con mayor absorción, que permiten mayor permeabilidad; pero que la diferencia es baja, debido a que la

porosidad de las partículas ha sido compensada parcialmente por un efecto de relleno que impide la libre circulación del vapor de agua.

Esto está vinculado a que las partículas de residuos de hormigón son más porosas y tienen una mayor absorción de agua, permitiendo así una permeabilidad libre para que el vapor de agua circule. Sin embargo, la diferencia es pequeña porque la influencia de la porosidad de las partículas fue parcialmente compensada por un efecto de relleno que obstaculiza la circulación del vapor de agua.

Resistencia a la compresión simple

Diferentes estudios previos reportan que la resistencia a compresión de los MHR es inferior a la presentada por el MN de referencia; tal comportamiento atribuido principalmente al uso de AHR utilizado como sustituto del AN, así como por otros factores. En lo que respecta al porcentaje de sustitución, se ha mencionado que la resistencia a compresión disminuye cuando el contenido de AHR aumenta; estudios realizados por Lee et al., 2008 [14] y Lee, 2009 [7], reemplazaron el 25, 50, 75 y 100% de AN por AHR (con origen de dos fuentes industriales diferentes) obteniendo reducciones del 27 y 32% con respecto al MN para la máxima sustitución. Así mismo Vegas et al., 2009 [22] y Dapena et al., 2011 [26] presentaron similar comportamiento de pérdidas de resistencia, siendo significativas con reemplazos mayores. En el primer estudio se seleccionó la sustitución máxima del 25% de AHR (que ocasionó pérdidas del 34% menos), ya que a partir de ese porcentaje se necesitaría una sobredosificación de cemento para compensar las pérdidas de resistencia ocasionadas en los MHR y lograr obtener las mínimas exigidas por normativa; sin embargo esta solución no sería sostenible, ya que una mayor cantidad de cemento encarecería considerablemente el precio del producto final. Similares reducciones presentaron en el segundo estudio con sustituciones de hasta el 20% de AHR, obteniendo MHR con pérdidas del 31% respecto al MN. En estudio realizado por Saiz-Martínez et al., 2015 [10] se obtuvieron similares valores de reducción de resistencia cuando se reemplazó el 25% de AHR con origen de dos diferentes plantas de tratamiento (29 y 20% con respecto al MN); los reemplazos máximos realizados en este estudio fueron de 45%, ocasionando pérdidas del 33 y 24%. Sin embargo, se mencionó que los resultados de resistencia a la compresión obtenidos, cumplían con las normas EN, y por tanto se podían utilizar para aplicaciones en la construcción, tales como mortero de albañilería, de revestimiento, de enlucido, etc.

Otros estudios que han reemplazado el 100% del AN, también han reportado pérdidas de resistencia a la compresión (36% respecto al MN) debido al uso de AHR [23]; sin embargo en otro estudio los resultados muestran que a pesar de sus propiedades mecánicas pobres (46% menos que el MN), el uso de AHR mejora la resistencia de unión con los ladrillos, debido a la posible mayor calidad de la zona interfacial [20]. Estudio realizado por Cabrera Álvarez et al., 1997 [13], también utilizaron sustituciones del 100% de AHR, pero con diferentes relación c:a (1:4, 1:5, 1:6 y 1:8); los resultados obtenidos mostraron pérdidas de resistencia del 17, 40 y 61% respectivamente, siendo más evidente cuando la relación c:a aumenta. En este último estudio, los valores obtenidos se encontraban dentro de los límites establecidos por la norma NC52-79:93, por lo que pudieron ser clasificados dentro de los tipos I, II y III.

La relación a/c utilizada en las dosificaciones de los MHR es otro de los factores que influyen en la resistencia a la compresión. En estudio realizado por Chen et al., 2003 [18], se utilizaron dos diferentes reemplazos de AHR (de aproximadamente el 30 y 60% respectivamente) en los MHR y para diferentes relación a/c. Los resultados obtenidos muestran que para las tres series estudiadas (incluida el MN de referencia), la relación de resistencia a la compresión vs proporción a/c presentan tendencia similar, mostrando que bajo las mismas proporciones de a/c, el MN siempre presenta la mayor resistencia con respecto a los MHR. Sin embargo es la cantidad AHR en las mezclas la que regula la pérdida de resistencia; cuando la relación a/c = 0.38, los MHR (con 30 y 60% de AHR) presentan una resistencia inferior que el MN de 23 y 36% respectivamente. Tales reducciones de resistencia fueron más evidentes cuando aumenta la relación a/c, con la relación a/c = 0.8 las pérdidas de los mismos fueron de entre 59 y 62% respecto a las presentadas con a/c = 0.38; por tanto un mayor contenido de AHR y una mayor relación a/c, ocasionan pérdidas de resistencia a la compresión en los MHR. Similar comportamiento fue presentado en otro estudio, en el cual las mezclas de MHR se realizaron con relación a/c = 0.35 y 0.55; dando como resultado, resistencias más bajas cuando se utilizó la relación a/c mayor [16].

Según Corinaldesi & Moriconi, 2009 [21], otros factores que afectan en la resistencia a la compresión de los MHR es la menor gravedad específica de los AHR con respecto al AN, así como la mayor absorción de agua de los mismos [29]. En su estudio reemplazaron el 100% del AN utilizando AHR con origen en hormigón prefabricado, así como de desechos de demolición; obteniendo en ambos MHR, resistencias a la compresión más bajas que el MN (36 y 24% respectivamente). La menor diferencia de resistencia fue presentada por el MHR con áridos provenientes de hormigón prefabricado, ya que las formas de las partículas actuaron de forma positiva en la mejora de la resistencia de unión en la interface entre el AHR y la pasta de cemento. En estudio realizado antes por los mismos autores, señalan que la adición de fibras de acero inoxidable en los MHR mejora la resistencias mecánicas de los mismos; cuando se reemplazó el 100% de AHR por AN y se adicionó 18% de fibras, la pérdida de resistencia a la compresión fue del 10% respecto al MN [17].

La pasta de cemento adherida en los áridos, es otro de los factores que disminuyen la resistencia a la compresión de los MHR que los contienen [8]; Fan et al., 2015 [16] fabricaron MHR con diferentes sustituciones de AHR por AN (25, 50 y 100%), en los cuales el AHR fue obtenido por dos diferentes procesos de trituración. Los resultados obtenidos en este estudio mostraron que el uso de AHR ocasionó reducciones en la resistencia a compresión de los MHR cuando se compararon con el MN de control; esto debido a que el AHR utilizado contenía pasta de cemento, presentaba mayor porosidad, así como menor resistencia a la compresión. Al comparar los MHR, se mostró que la resistencia disminuye cuando el contenido de reemplazo aumenta (con ambos tipos de AHR), lo que demuestra que el factor de reemplazo es un factor importante que influye en las propiedades físicas y mecánicas del mortero resultante. El proceso de trituración llevado a cabo para los diferentes AHR es de interés en este estudio, ya que los obtenidos por un proceso de trituración de solo una etapa, ocasionaron MHR con resistencias más bajas debido a la mayor proporción de pasta de cemento que contenían; mientras que el obtenido por medio de un proceso de trituración de múltiples etapas, dio como resultado un AHR con mayor cantidad de partículas finas, con menor porosidad, mayor densidad y menor absorción de agua. En otros estudios, se ha reportado que composiciones mixtas de AHR provenientes de diferentes procesos o circuitos de triturado pueden ser factible de su utilización, ya que logran disminuir las diferencias de resistencia respecto al MN, permitiendo la reintegración de todas las fracciones de AHR [11][12].

En cuanto a la relación c:a, estudio realizado por Lopes Lima & Batista Leite, 2012 [2] sustituyeron el 50% de AN por AHR en mezclas con relación c:a = 1:4 y 1:8, obteniendo resultados con tendencia contraria al compararlas; en el caso del MHR con la relación c:a = 1:4, la resistencia a la compresión con respecto al MN disminuyó un 8%, mientras que con c:a = 1:8 la resistencia aumentó un 15%. Los comportamientos presentados en este estudio fueron atribuidos a la influencia del AHR como consecuencia del contenido de cemento y la relación a/c de los MHR; para una baja relación c:a la pasta gana resistencia mientras que el árido es el elemento frágil, esto debido a que una mayor cantidad de cemento en la mezcla equivale a menor cantidad de áridos (comparando c:a = 1:4 y 1:8) y por ende menor cantidad de agua es necesaria en la mezcla. En el caso de una alta relación a/c, ocasionada por la mayor demanda de agua de los AHR en la mezcla de c:a = 1:8, las partículas del AHR tiene una influencia menor en la resistencia de los MHR, por lo que el aumento de resistencia pudo haber sido posible por la mejor resistencia de unión entre el AHR y la pasta de cemento.

Otros estudios que han obtenido mayor resistencia a la compresión en los MHR que la presentada por el MN, también se han reportado; Leonardo F. R. Miranda & Selmo, 2006a,b [34][35] realizaron diferentes reemplazos de AN por AHR, conformado por partículas de tamaño $< 75 \mu\text{m}$. Los resultados obtenidos en este trabajo, mostraron que el aumento de la cantidad de reemplazo de 18 a 32% de AHR, redujo la relación a/c de 2.34 a 1.89, e incrementó la resistencia a la compresión un 68%; estos resultados corresponden para el MHR compuesto por residuos de mortero/hormigón. Por otra parte, Braga et al., 2012 [4], presentaron resultados de MHR con mejoras significativas de la resistencia a la compresión, con tendencia casi lineal cuando se incrementa el porcentaje incorporación de finos ($< 0.150 \text{ mm}$) de AHR. Con reemplazos de AN por el 5, 10 y 15% de AHR, las resistencias a la compresión fueron de 38, 96 y 121% mayor que el MN. Este comportamiento fue justificado por la menor relación a/c comparada con la del MN, así como la presencia de las partículas finas, las cuales ocasionaron un efecto de relleno en la mezcla. También se

atribuyó a la posibilidad de que el cemento adherido en los AHR, una vez introducido como parte de los áridos siguiera hidratándose contribuyendo al aumento de la resistencia; así mismo por la existencia de cenizas volantes en el AHR que al producir reacciones lentas, pudieron seguir reaccionando con el cemento (nuevo) utilizado para el mortero. Comportamiento similar se presentó en otro estudio [3], en el cual realizaron sustituciones de hasta el 100% de AN por AHR, obteniendo MHR con resistencias a la compresión superiores a la presentada por el MN. En este estudio tal comportamiento fue atribuido a las partículas de AHR, que al presentar una mayor superficie específica, caracterizarse por tener una forma más afilada y ser más porosas que el AN, produjeron un mejor enlace con la pasta de cemento. Además, reacciones hidráulicas producidas por el cemento no hidratado (adherido en las partículas de AHR) en contacto con el agua, dieron como resultado una mayor cohesión entre las partículas y por tanto mayor resistencia en los MHR. Sin embargo, en este estudio se ha recomendado utilizar hasta el 20% de AHR en volumen, cuando los morteros sean destinados a la producción de muros; ya que los mismos tienden a ser susceptibles al agrietamiento.

Resistencia a la flexión

Con respecto a los resultados de resistencia a la flexión obtenidos en estudios previos, se ha encontrado que los MHR reportan resistencias más bajas que la presentada por el MN, coincidiendo con el comportamiento presentado en los ensayos de resistencia a la compresión; sin embargo en algunos casos han obtenido lo contrario [10]. Los ensayos de flexión, se han realizado a MHR con diferentes porcentajes de sustitución del AN por el AHR, observando mayor pérdida de resistencia cuando aumenta el contenido de AHR, siendo más evidente en los que se realiza reemplazo total; como se ha presentado en estudios realizados por Dapena et al., 2011 [26] y Vegas et al., 2009 [22]. En el primero de ellos, se mostró que reemplazos del 5 a 20% de AHR presentan incrementos en la reducción de la resistencia con pérdidas máximas a los 28 días del 31 y 32% (variables con diferente tipo de cemento utilizado), mientras que con reemplazos mayores (50%) la resistencia disminuye un 96% con respecto al MN para ambas variables, cuando el AN es arena silíceo redondeada. Sin embargo en otra de las variables de este mismo estudio, las pérdidas obtenidas con el reemplazo del 50% fueron similares a las presentadas por las otras variables con reemplazos del 20%; esta mejora se debió al uso de AN de piedra caliza, así como de superplastificante, el cual facilitó la compactación, dando como resultado un aumento en la densidad de los MHR, incluso con contenidos de 50% de AHR. En el segundo estudio antes mencionado, se presentó el mismo comportamiento cuando realizaron reemplazos del 10, 20, 25, 50, 75 y 100%; para el reemplazo total la resistencia disminuyó un 82% con respecto al MN. A partir de los resultados obtenidos en este estudio, proponen el uso de 25% de AHR como máximo reemplazo en los morteros, ya que para compensar las pérdidas ocasionadas por porcentajes altos de sustitución, sería necesario una mayor cantidad de cemento, lo cual encarecería el precio final de los MHR.

Otros estudios que solo han evaluado el reemplazo de 100% de AHR en los MHR, también han obtenido pérdidas de resistencia con respecto al MN. Estudio realizado por Moriconi et al., 2003 [23] reportaron pérdidas con diferencia del 34% respecto al MN; las causas de tal comportamiento no fueron explicadas, sin embargo la adición de ceniza volante o polvo de ladrillo como reemplazo del 30% de cemento en tales morteros muestran mejoras en la resistencia a flexión, en el caso del polvo de ladrillo la disminución es del 20%, mientras que la menor reducción se presentó con la inclusión de cenizas volantes con valores cercanos al presentado por el MN (menos 4%). Corinaldesi, 2009 [20] comparó dos tipos de MHR los cuales contenían 100% de AHR y como aglutinantes usó cemento y cal hidráulica. Los fabricados con cemento presentaron pérdidas del 34% con respecto al MN, mientras que con cal hidráulica la reducción comparado con los de cemento fue del 75%; ambos con AHR. Sin embargo, estos tipos de morteros (en particular el de cemento) presentaron una mayor calidad de la zona interfacial, ya que obtuvieron mejor resistencia de unión con el ladrillo. Por otra parte, se ha documentado que una mayor relación c:a ocasiona mayor pérdida de resistencia; Cabrera Álvarez et al., 1997 [13] mostraron que MHR con 100% de AHR y con diferentes relación c:a = 1:5, 1:6 y 1:8, presentaron resistencias inferiores a la obtenida por un MHR con relación más baja (1:4), con diferencias del 2, 30 y 40% respectivamente; con tendencia a disminuir con el aumento de la cantidad de árido.

Algunas características que definen a los diferentes tipos de AHR, tales como su composición, origen y tamaño, pueden ser variables suficientes para influir visiblemente en la resistencia a la flexión (cuando se

utilicen en los MHR bajo las mismas condiciones y parámetros). Corinaldesi & Moriconi, 2009 [21] realizaron tres diferentes mezclas con contenidos del 100% de AHR (procedentes de restos de hormigón prefabricado, residuos de demolición y ladrillos rojos nuevos) utilizando la misma dosificación (relación c:a y a/c inicial) bajo las mismas condiciones de estudio. Los resultados obtenidos, mostraron que MHR con AHR de residuos de hormigón y de ladrillos, presentaron menor resistencia que la presentada por el MN (22 y 28% respectivamente); sin embargo, los MHR con hormigón prefabricado presentaron la mayor resistencia incluso que la del MN (6% más). Las pérdidas de resistencia en este estudio fueron atribuidas a la menor gravedad y mayor absorción de los AHR en comparación con el AN de arena de cuarzo; en cuanto al MHR con mayor resistencia, a la mayor resistencia de unión entre el AHR y la pasta de cemento, producida por la forma de las partículas de hormigón con borde afilado.

Por otra parte, otros estudios han reportado aumento en la resistencia a flexión de los MHR, incluso cuando la resistencia a compresión reporta resultados negativos. Saiz-Martínez et al., 2015 [10] realizaron MHR con 45% de AHR de tres tipos diferentes, obteniendo en todos mayor resistencia que el MN (9 y 10%), siendo más evidente para el AHR con origen en hormigón reciclado (30%). En este estudio no se explica el posible efecto de este comportamiento, sin embargo, hacen mención de la inexistencia de normativa que defina los valores mínimos aceptables para esta propiedad en los morteros. Otros estudios que también han obtenido resistencias a la flexión superiores a la del MN y con comportamiento similar al presentado para resistencia a la compresión, muestran que el tamaño y la forma de las partículas, así como la relación a/c de la mezcla, son factores predominantes. Leonardo F. R. Miranda & Selmo, 2006a,b [34][35] utilizaron tres tipos de AHR con partículas de tamaño $< 75 \mu\text{m}$, para reemplazar al AN. Los resultados obtenidos mostraron que los MHR presentaron mayor resistencia a la flexión que el MN; sin embargo, la microestructura de cada uno de ellos, afectada por el tipo de AHR y la relación a/c requerida, ocasionó variaciones en los mismos. Debido a esto, dos de las mezclas (compuestas por residuos de cerámica/mortero y mortero/hormigón) alcanzaron incrementos del 48% cuando el uso de AHR aumentó de 18 a 32% en reemplazo de AN, mientras que la mezcla compuesta por 100% de residuos de mortero presentó el incremento más bajo (5%), debido a la mayor relación a/c efectiva. Comportamiento similar al estudio anterior reportaron Braga et al., 2012 [4], quienes observaron que una menor relación a/c, en MHR que incluyen diferentes porcentajes de partículas finas de AHR ($< 0.150 \text{ mm}$), dan como resultado mejoras significativas, con una tendencia casi lineal en la resistencia a la flexión cuando aumenta el porcentaje de sustitución; con reemplazos del 5, 10 y 15%, los incrementos de resistencia de los MHR con respecto al MN fueron del 23, 56 y 99%. Este comportamiento fue atribuido a la menor relación a/c, y al efecto de relleno ocasionado por las partículas finas de AHR; así como por las razones explicadas para la resistencia a compresión. Neno et al., 2014 [3] también reportaron incrementos en la resistencia de los MHR estudiados, al sustituir porcentajes mayores de AN por AHR (20, 50 y 100%); MHR con reemplazo total, obtuvo una resistencia del 58% mayor que el MN. Estos resultados positivos fueron atribuidos a las propiedades y características de los AHR, que al presentar mayor superficie específica y porosidad que el AN, aunado a la forma de sus partículas con bordes afilados, provocaron mejoras en la interfaz con la pasta de cemento.

Como alternativa de mejorar la resistencia a la flexión de los MHR, Corinaldesi et al., 2002 [17] añadieron el 4% (del peso del cemento) de fibras de acero inoxidable a la mezcla, logrando aumentar la resistencia en un 4% con respecto al MN. En este mismo estudio, fibras de polipropileno fueron añadidas para reducir la retracción de los MHR (1% del peso del cemento); sin embargo su uso no afectó la resistencia a la flexión, ya que obtuvieron valores iguales. Los resultados de este último estudio, corresponden a los obtenidos a la edad de 90 días; para todos los anteriores son a los 28 días.

Módulo de elasticidad

Estudios realizados por Vegas et al., 2009 [22], Braga et al., 2012 [4] y Neno et al., 2014 [3], reportaron mayor módulo de elasticidad en los MHR con respecto al MN, con incrementos del 2, 49 y 17% cuando los MHR contenían el 25, 15 y 20% de AHR respectivamente. Sin embargo, se ha indicado que una mayor elasticidad puede tener efectos negativos en determinadas circunstancias, ya que una mayor rigidez representa mayores tensiones internas, menos deformación y mayor riesgo de agrietamiento o ruptura. En dos de estos estudios, el módulo de elasticidad se obtuvo por medio del método de la frecuencia de

resonancia, el cual expresa la rigidez del mortero endurecido debido a la hidratación del cemento, la disposición de las partículas añadidas dada su forma y rugosidad, y el contenido de material en polvo. La resistencia a la compresión y flexión también influyen en esta propiedad, y se ve corroborada con estos estudios los cuales presentaron la misma tendencia, excepto en el caso de Vegas et al., 2009 que mostró tendencia contraria, no obstante con un bajo incremento. En cuanto a la razón de uso de tales porcentajes de AHR, mencionar que estas investigaciones se llevaron a cabo por medio de etapas; en la primera se reemplazaron diferentes porcentajes de AN por AHR con el objetivo de determinar el óptimo de sustitución, tomando como base los resultados obtenidos de consistencia, densidad y resistencia a la compresión y flexión. Una vez elegido el MHR, con el porcentaje adecuado de AHR por proporcionar las mejores propiedades, en la segunda etapa se realizan otros ensayos más específicos (entre ellos el módulo de elasticidad), para ser comparados con el MN.

Módulo de elasticidad con tendencia contraria presentaron los estudios realizados por Moriconi et al., 2003 [23] y Corinaldesi, 2009 [20] al obtener reducciones del 43, 63 y 47% (en este último utilizando cal hidráulica como aglutinante) en MHR con 100% de AHR, con respecto al MN. Estos resultados concuerdan con las tendencias antes mencionadas en cuanto a la rigidez y la influencia de las resistencias mecánicas. En el primero de los casos, los MHR presentaron menor rigidez teniendo coherencia con la menor resistencia a la compresión que mostraron, en cuanto a los resultados del segundo estudio, el uso de ambos aglutinantes ocasionó reducciones debido a la presencia de una fracción inerte menos rígida. El módulo de elasticidad se midió a partir de la curva tensión–deformación tomando como punto de interés el localizado aproximadamente a la mitad del valor de resistencia a la compresión obtenido, así como con el uso de medidores de deformación pegados en muestras cilíndricas.

Durabilidad

A continuación se describen algunos de los resultados reportados por diversos investigadores, los cuales han enfocado sus estudios a propiedades que influyen o afectan el comportamiento de la durabilidad de los morteros que contienen AHR.

Retracción por secado

Con respecto a la retracción por secado estudios previos reportan incrementos cuando aumenta el contenido de AHR en los MHR; factores como la relación a/c, c:a, tipo de AHR y la edad de ensayo, también pueden influir en tal comportamiento. En cuanto al aumento en el porcentaje de sustitución, Fan et al., 2015 [16] reportaron que a los 28 días los MHR con 100% de AHR de dos diferentes tipos (con proceso diferente de triturado) y relación a/c = 0.35 obtuvieron las mayores diferencias, ya que la retracción aumentó de 996×10^{-6} del MN, a 1337×10^{-6} y 1120×10^{-6} de los MHR con ambos AHR; con las mismas variables pero con relación a/c = 0.55, los incrementos respecto a los valores anteriores fueron de 20, 26 y 39% respectivamente. Vegas et al., 2009 [22] obtuvieron comportamiento similar de incrementos en la retracción con el aumento de AHR; reportando valores de retracción de 0.22 mm/m del MN, y 0.7 mm/m del MHR con el porcentaje máximo de AHR (100%) a los 52 días. Saiz-Martínez et al., 2015 [10] utilizaron tres tipos de áridos (dos de AHR) y los sustituyeron por el AN en tres porcentajes diferentes mostrando que la retracción por secado aumenta con respecto al MN; los MHR con reemplazo máximo de estudio (45%) de AHR reportaron valores de 0.021 mm/m, comparado con 0.013 mm/m del MN. Sin embargo, en este estudio se utilizaron aditivos con porcentaje ascendente con el aumento de AHR, lo cual pudo haber influido en las propiedades de los mismos evitando una mayor retracción sin su uso. Con sustituciones del 15 y 20% del AN por AHR, en otros estudios se reportaron incrementos del 44 y 45% de la retracción por secado respectivamente; en ambas investigaciones, los porcentajes de AHR utilizados en los MHR fueron elegidos por presentar las mejores prestaciones en una primera etapa previa [4][3]. Con porcentajes de sustitución superiores, MHR con 50% de AHR como sustituto del AN, reporta incrementos más evidente de la retracción, que de forma independiente a la relación c:a; de acuerdo a resultados obtenidos, la retracción del MN fue de 700 μ s, mientras que para el MHR de 2000 μ s [2]. Como alternativa para reducir la mayor retracción por secado que presentan los MHR con respecto al MN, fibras de polipropileno y fibras metálicas se han utilizado para reducir la retracción; sin embargo se mostró que a los 600 días solo las fibras metálicas lograron reducir aproximadamente el 15%, mientras que con las fibras de polipropileno se observaron pequeños cambios [31].

Los investigadores de estos estudios concuerdan al explicar que el aumento en la retracción de los MHR se debe a la mayor porosidad y absorción que presentan las partículas de AHR en comparación con el AN [31][10]. La porosidad ocasiona que se almacene más agua en los MHR [2] y así mismo sea la causante que se evapore rápidamente [16]. Como consecuencia de la mayor porosidad de los AHR, es necesario mayor cantidad de agua para lograr consistencias similares al MN [22]; sin embargo no es aconsejable, por el hecho a que una mayor retracción por secado, incrementa la posible aparición de grietas y fisuras [3].

Introducción sobre los morteros con áridos de vidrio reciclado

Aspectos generales

El vidrio es un producto muy común utilizado en la vida cotidiana y que se puede encontrar en diferentes formas: ventanas, parabrisas, bombillas y tubos de rayos catódicos; así mismo, como producto contenedor de otros productos (en forma de botellas y frascos) [36][37]. Puesto que el vidrio cuenta con una vida limitada en el tiempo de su uso, y que en muchos casos su re-uso, almacenamiento o depósito en vertederos pos-uso no son factibles, se hace necesario estudios de aplicaciones alternativas que aporten soluciones medioambientales [38].

El vidrio de botellas de bebidas post-consumo representa uno de los principales componentes de residuos sólidos debido a su eliminación diaria a nivel mundial; no obstante, solo una pequeña proporción es reutilizada por medio de lavado o por proceso de fundición para vidrio nuevo. Esto conlleva a incrementos de residuos de vidrios causado por el uso cada vez mayor de este material, convirtiéndose en una carga sustancial en los rellenos sanitarios [39][40]. Por ejemplo en Hong Kong, solo se recicla entre 1 – 2% de los residuos de vidrio, esto imputable a la falta de una industria de fabricación de vidrio que dé solución viable a este problema [41]. En algunos países la mayor parte del vidrio se deposita en vertederos, pero al ser éste un material no biodegradable, no presenta una solución ecológica y por tanto los hace menos amigables con el medio ambiente (principalmente los de color mixto); como consecuencia, los costes de procesamiento para uso específico se incrementan considerablemente [39][42].

Este problema también ocurre con los residuos de vidrio de tubos de rayos catódicos (CRT) que provienen de monitores y televisores viejos desechados; en particular se ha dado importancia significativa a este tipo de vidrio, debido a que su composición contiene materiales peligrosos (plomo) que dificultan sus aplicaciones como reciclado. Los rápidos avances en la industria electrónica condujeron a una eliminación acelerada de dispositivos electrónicos antiguos, ocasionado un problema medioambiental mundial. Con pocas opciones de manipulación, se requieren alternativas que excluyan a los vertederos, para proporcionar una mejor solución de gestión para tratar estos residuos [43][44][45][46].

A partir de lo anterior, y teniendo en cuenta que no todo el vidrio puede ser reutilizado y reciclado en vidrio nuevo, otras alternativas de reciclaje (el cual es cada vez es más imprescindible), son necesarias para los residuos de vidrio [47]; no solo por contribuir con la disminución de la contaminación ambiental mediante la reducción del volumen de residuos, sino por la estricta legislación europea que define los niveles de reciclado de los materiales de embalaje, incluido el vidrio [48].

Debido a que la industria de la construcción necesita grandes cantidad de materiales, con bajos requerimientos generales de calidad y a que su puesta en producción puede ser realizada en cualquier sitio [49], el vidrio, como residuo sólido, se ha venido estudiando de forma común utilizándolo como un sustituto de los áridos gruesos y finos e incluso como sustituto del cemento [50]. Al ser un material relativamente fácil de separar de los residuos sólidos generales, y debido a sus características físicas y químicas, el vidrio puede ser considerado para su uso de hormigones y morteros, en especial en lugares donde carezcan de recursos naturales y sea necesario la eliminación de residuos [50].

Usos del vidrio reciclado

Al ser común que los residuos estén compuestos por una mezcla de vidrio de colores, se han desarrollado usos secundarios para el vidrio reciclado tales como abrasivos, lana de vidrio o medio de filtración de agua [38]. También otras aplicaciones, las cuales lo incluyen como sustituto parcial de los áridos es en pavimentos asfálticos, en capas de bases sin consolidar para formación de terraplenes, en lechos de apoyo para tuberías, como complementos en sistemas de ventilación de gas en rellenos sanitarios y como sustituto de las gravas en rellenos para drenes [49].

Por otra parte, como alternativa sostenible en la reutilización y reciclaje de los residuos de vidrio, diferentes estudios los han utilizado en la fabricación de hormigones, puesto que proporcionan una importante potencial de mercado para el reciclaje de los mismos [40]; además, su uso contribuye en la reducción de costes de eliminación de los residuos, reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la conservación de las materias primas naturales, la mejora de las estrictas normas medioambientales y la mejora de las propiedades de los hormigones [50].

El uso de vidrio reciclado en forma de árido como sustituto del cemento o de los áridos en hormigón, puede también presentar ventajas ambientales y económicas al dar valor agregado a grandes cantidades de materiales de desecho, al ofrecer recursos materiales locales y reducir en determinadas ocasiones la necesidad del transporte [51]. En algunos casos se ha puesto énfasis en su uso en hormigones para aplicaciones decorativas o arquitectónicas; éstas se pueden lograr debido a las propiedades estéticas (como el color) del vidrio reciclado [41][52].

Tipologías de vidrios reciclados

Dos tipos de vidrios reciclados son los más comunes encontrar debido a la mayor cantidad de residuos generados por productos elaborados con los mismos. El vidrio sódico-cálcico es el más utilizado en la fabricación de contenedores, vidrio flotado y vidrio laminar, por lo que la mayoría de los residuos de vidrio pertenecen a este tipo. Si los residuos de vidrio se dividen por colores, los porcentajes de cada uno de ellos son los siguientes: 63% transparentes (incolores), 25% son ámbar, 10% son verdes y 2% son azules u otros colores, de los cuales su composición es la misma, excepto por pequeñas cantidades de aditivos para lograr los diferentes colores [49]. Los vidrios de este tipo que han sido estudiados, en su mayoría provienen de botellas de bebidas post-consumo, o de la demolición de edificios [53]; se han evaluado con base a su color (verde, marrón, ámbar, flint (vidrio para uso óptico), transparente, azul y mixto) [39][48][38][41][54] y para diferentes tamaños de partículas, dependiendo de la aplicación en la que se utiliza.

Por otra parte, el vidrio de CRT puede ser considerado un residuo peligroso debido a su alto contenido de plomo (hasta el 20%), el cual se puede determinar usando un procedimiento característico para determinar la toxicidad de la lixiviación de desechos [55]. Estos residuos pueden ser utilizados si se realiza un proceso de tratamiento previo con el objetivo de reducir la posible lixiviación de plomo y poder ser reutilizado en la industria de la construcción. El proceso de tratamiento consiste en triturar el vidrio de CRT, lavar con ácido (por inmersión en una solución al 5% de ácido nítrico durante 3 h para eliminar el plomo en la superficie del vidrio) y enjuagar con agua (para eliminar el ácido restante) [46].

Aplicaciones del vidrio reciclado fino

El uso de vidrio reciclado como reemplazo del árido en morteros y hormigones, es tema de estudio en los últimos años; sin embargo, se ha reportado que el uso de áridos como sustituto de la fracción gruesa del hormigón presenta problemas asociados con la fragilidad y geometría de los áridos de vidrio que conducen a fisuras que afectan la adherencia entre los áridos y la pasta de cemento. No obstante, el mayor obstáculo técnico para su uso es la expansión debido a la reacción álcali-sílice (ASR) entre el álcali del cemento y la sílice reactiva en el vidrio, la cual se ve influida por el tamaño de partícula de los áridos, ya que la velocidad de reacción depende principalmente de las superficies del árido reactivo de sílice [56] [39][57][51]. A partir de lo anterior, las investigaciones se han centrado en el estudio de la fracción fina del vidrio reciclado, para utilizarse en morteros en forma de arena como sustituto del árido (con partículas de diferentes tamaños, y colores por separados y mixtos) o polvo como sustituto del cemento, con el objetivo de contribuir en la sostenibilidad en la construcción [53][40][41][58][54].

En particular el vidrio de CRT, se estudia su uso como sustituto del árido fino en la fabricación de morteros de cemento para aplicaciones de blindaje de radiación de rayos X, por presentar mejoras en las propiedades de protección contra la radiación [44]. También se han utilizado dos tipos de árido de vidrio CRT triturado como reemplazo de la arena natural en morteros: sin fundición de plomo y con fundición; este último obtenido mediante un proceso de tratamiento con ácido con el objetivo de reducir la posible lixiviación de plomo de vidrio reciclado para su reutilización en la industria de la construcción; en los estudios que lo han utilizado, se comparan con morteros que incorporan vidrio de botella de bebidas como árido [59].

También se están realizando estudios enfocados a utilizar el árido de vidrio en forma de polvo como material puzolánico para sustituir al cemento en morteros y hormigones; al ser un material amorfo, con alto contenido de sílice y tener una gran superficie, cumple con los requisitos primarios de un material puzolánico. En este aspecto, el comportamiento como material puzolánico depende del tamaño (finura) de las partículas y su composición [56][42][60].

Consideraciones específicas del uso del vidrio reciclado

Es importante tomar en cuenta, que el vidrio utilizado en materiales basados en cemento, puede dar lugar a dos tipos de comportamiento que tienen efectos opuestos:

- Reacción álcali-sílice: con sus efectos negativos en los morteros
- Actividad puzolánica: con efectos de incremento en su resistencia

El primer comportamiento ocurre cuando la sílice amorfa del vidrio reacciona activamente con los álcalis del cemento ocasionando la formación de gel de ASR. Este gel puede llegar a absorber agua y expandirse dentro de la microestructura del mortero dando como resultado la tensión interna; una vez que la tensión interna excede la resistencia del mortero, pueden producirse fisuras, y como consecuencia ser perjudicial en la durabilidad del mortero [46][51]. Investigaciones afirman que la cantidad de expansión está directamente relacionada con el tamaño de partícula del árido de vidrio, que al ser estas más grandes (entre 150 μm , hasta más de 1mm), la expansión será mayor; con partículas de menor tamaño la expansión disminuye [38][61][50].

Por lo que respecta al segundo efecto (actividad puzolánica), ésta es relacionada con las partículas finas compuestas de sílice amorfa; cuanto más fino es el polvo de vidrio, mayor es su actividad [62]. La actividad puzolánica de vidrio puede llegar a depender de factores varios tales como: su uso como sustituto de arena o cemento, el color del propio vidrio, finura de las partículas, etc. [61]. Por lo general, las puzolanas aportan mayor resistencia a los morteros cuando se utiliza vidrio molido muy fino; sin embargo necesitan de más tiempo para desarrollar dicha resistencia, debido a que utilizan hidróxido de calcio que es producto de hidratación del cemento Portland [37].

Uso del vidrio reciclado en combinación con otros materiales cementantes y aditivos

El uso de materiales cementantes suplementarios en conjunto con el árido de vidrio reciclado, se realiza como alternativa para la mejora de las propiedades mecánicas y de reactividad relacionadas con la durabilidad de los morteros. Materiales como el metacaolín, ceniza volante, escoria de alto horno, humo de sílice, y aditivos tales como fibras de acero y compuestos de litio, son utilizados con el fin de mitigar la expansión ocasionada por ASR. Sin embargo, además de su contribución de reducción de ASR, estas adiciones reducen la permeabilidad, mejoran la microestructura porosa en la ITZ debido a la reacción puzolánica, y reducen la porosidad de los morteros, lo cual da como resultado aumentos en la resistencia [40][41][50][36]. En términos generales, el uso de estos materiales cementantes y aditivos aportan mejoras ambientales puesto que su utilización en algunas aplicaciones permite que estos materiales secundarios se integren y dejen de ser considerados como desechos sólidos; en el caso de los materiales cementantes como reemplazo del cemento, su uso contribuye en la disminución de emisiones de carbono masivas que se producen en la elaboración del cemento [37].

Al comparar los diferentes materiales que reemplazan porcentajes del cemento en los morteros, y que son usados como métodos de supresión de ASR, se reporta que por lo general la ceniza volante muestra el efecto más alto, seguido de la escoria de alto horno. En cuanto al metacaolín, este puede mitigar eficazmente la expansión ASR independientemente del tamaño de la partícula de vidrio, mostrando eficacia similar a la ceniza volante [63], en el caso del humo de sílice, este presenta mejores resultados en el mortero con árido de vidrio transparente comparado con los de otros colores; por otra parte, la adición de fibras de acero o compuestos de litio resultan menos eficaz. Sin embargo lo anterior, se deben tener en cuenta los efectos

negativos de estas adiciones, tales como: aumento en los costes de producción que ocasionaría el uso del litio, reducción de resistencia a edades tempranas ocasionadas por la ceniza volante y la escoria de alto horno, o la disminución significativa de la trabajabilidad de los morteros como consecuencia de la utilización de fibras de acero o de humo de sílice [50].

Propiedades de los morteros que contienen vidrio reciclado

El siguiente apartado es una síntesis del estado del conocimiento de los morteros que utilizan árido de vidrio reciclado (AVR), extraída en su totalidad de trabajos previos reportados, haciendo mención y comparación del comportamiento en estado fresco y endurecido de los morteros fabricados con estos áridos (morteros de vidrio reciclado –MVR–), tomando como referencia el mortero usual (mortero natural –MN–). Con base a lo explicado en este apartado, se demuestra la variabilidad de los estudios realizados por otros autores y la inconsistencia en las tendencias presentadas, y por tanto, es evidente la necesidad de más estudios con el fin de establecer normativas que permitan su uso. La necesidad de uso y aprovechamiento de este material es favorable puesto que presentan resultados positivos en algunas de sus propiedades, además de beneficios en cuanto al aspecto económico y ambiental en la sociedad.

Estado fresco

En este apartado se reporta el comportamiento de los MVR en estado fresco; siendo este estado incipiente de los mismos, el preámbulo que garantizará un adecuado y deseado desempeño en su estado endurecido posterior.

Consistencia

Por lo que respecta a la consistencia de MVR, y en comparación con los MN de referencia, se ha establecido que el uso de AVR y porcentajes mayores de sustitución conllevarán a incrementos de la consistencia, lo cual se ha evidenciado por el incremento en el diámetro que se reporta en el ensayo de la tabla de flujo; los diámetros obtenidos pueden ser influenciados por diversos factores tales como el porcentaje de sustitución, tipo de AVR, tamaño de partículas e incluso la adición de ceniza volante o escoria de alto horno. Ling & Poon, 2011b [43] en su estudio reemplazaron el 25, 50, 75 y 100% de AN por AVR, lo que provocó incrementos graduales en los diámetros de las mezclas, obteniendo para el menor reemplazo un diámetro de 143 mm, mientras que para reemplazo total fue de 191 mm; ambos superiores a 120 mm que presentó el MN. Este comportamiento fue atribuido a la inclusión de AVR, que al ser impermeable y con superficie lisa, aumentó significativamente los valores de flujo. Similares conclusiones se obtuvieron por Ling & Poon, 2012a [45] respecto a los MVR en los que el AVR provenía de diferentes tipos de vidrio (botella para bebidas y CRT); sin embargo, los segundos logran obtener mezclas con valores mayores de flujo provocados por un incremento en el tamaño de sus partículas (mayor módulo de finura y por tanto menor superficie específica) que conllevará a una menor necesidad de agua para cobertura de las partículas.

Por otra parte, el uso de ceniza volante o escoria de alto horno hasta en un 25% reemplazando al cemento, más diferentes contenidos de AVR se ha experimentado también, evidenciándose que la composición mineral de los materiales de sustitución del cemento y el porcentaje utilizado de AVR pueden provocar variaciones en la consistencia de los MVR [59]. En estudio realizado por Hui et al., 2013 [64], los resultados de diámetro de flujo llegaron incluso a invertir el comportamiento antes descrito (uso exclusivo de AVR en MVR) cuando se utilizó un 75% de AVR y un 25% de escoria de alto horno. Como una implicación directa de lo anterior, en estudio realizado por Corinaldesi et al., 2016 [51], la realización del ensayo de flujo tuvo como objetivo el lograr que fuera similar para todas las mezclas, permitiendo fijar la dosificación de agua para cada tipo de mortero y asegurando el mismo nivel de trabajabilidad para todos los morteros probados. Los resultados obtenidos muestran que las mezclas de MVR que incluían 50 y 100% de AVR de diferente color (transparente, verde y ámbar), demandaron menor cantidad de agua con respecto al MN, con reducciones de entre 17 y 25% para reemplazos de 100%. Este procedimiento (lograr el mismo flujo) permite prescribir así una menor relación a/c posible, sin llegar a provocar una afectación a posterior.

Siguiendo con lo anterior, en estudios realizados por Ling et al., 2011 [40] y Poon & Ling, 2010 [47] lograron la estabilización del flujo de los MVR con diferentes contenidos de AVR mediante el uso de aditivos superfluidificantes; contenidos de entre el 0.5 y 1.5% en peso de cemento, logran establecer como

constante la cantidad de agua necesaria para flujos de consistencia similares (entre 243 y 259 mm) con hasta 75% de AVR. En estudio similar (uso de superfluidificantes y AVR) [41], en el que además se realizó cambios en los tamaños de las partículas, el anterior comportamiento se mantiene vigente, con la excepción de que el incremento en el tamaño de partículas de AVR permite reducir los contenidos de aditivo a utilizar; esto es, que el incremento de las partículas de AVR promueve el incremento de fluidez debido a que los AVR presentan una superficie más lisa y un coeficiente de absorción cercano a cero. En cuanto al tamaño de partícula como variante, otro caso similar ha sido presentado, MVR con reemplazo total tanto de AVR de botella de bebida, como de CRT (tamaño de partículas de < 5 mm) han reportado un aumento en la fluidez, debido a la superficie más lisa del vidrio y una menor capacidad de absorción de agua; sin embargo, cuando se utilizaron partículas de menor tamaño ocasionaron una disminución de la fluidez de los MVR, siendo más notable en la mezcla con las partículas más finas (< 600 μm), atribuyendo tal comportamiento a la finura del AVR con mayor superficie total por unidad de volumen [46].

Casos contrarios al aumento del flujo en los MVR se han reportado; Tan & Du 2013 [54] en su estudio, indicaron que el uso de AVR (independientemente de su color) reduce la capacidad de flujo, presentando reducciones a la inversa del incremento de los contenidos de reemplazo. En este estudio, los MVR contenían reemplazos del 25, 50, 75 y 100%, siendo más evidente para el reemplazo total, con disminuciones de entre 22 y 50% (para los cuatro colores de AVR utilizados); lo anterior debido a la forma irregular y a la menor densidad de sus partículas [54]. Así mismo, Corinaldesi et al., 2005 [53] presentaron similar comportamiento en su estudio, debido a que el aumento de la sustitución del AVR por AN, requirió dosis más altas de agua para alcanzar el mismo valor por medio de la tabla de flujo. Por otra parte, en otro estudio no se presentaron diferencias significativas de requerimiento de agua entre los MVR y el MN referencia; dicho comportamiento (comparado con otros estudios), fue atribuido a los diferentes tipos de vidrio utilizados y a la absorción de agua, la cual está en función del tamaño del árido [65].

Densidad

En cuanto a la densidad en estado fresco, estudios previos reportan que los MVR presentan menor densidad que el MN, reportando disminución a medida que el uso de AVR aumenta como reemplazo del AN. Estudios realizados por Penacho et al., 2014 [65] y Tan & Du, 2013 [54] atribuyen que las reducciones de densidad se deben a la forma irregular de las partículas, y a la menor densidad del AVR comparado con el AN, por lo que se justifica la misma tendencia presentada por los MVR en estado fresco. En el primero de los estudios, los resultados mostraron que la densidad aparente de los MVR disminuye de una forma lineal (2, 6 y 8%) cuando aumenta la cantidad de reemplazo de AVR (20, 50 y 100%); en este trabajo se menciona que los AVR se caracterizaron por presentar forma más angular que el AN, lo que da como resultado un mayor volumen de vacíos. En el segundo estudio, reportaron que la densidad no se vio afectada por el color del AVR utilizado (marrón, verde, transparente y mixto), en especial con contenidos inferiores al 75%; para reemplazos del 100%, los MVR presentaron disminuciones del 3, 4, 5 y 3% con respecto al MN.

Comportamiento contrario a lo anterior se reportaron en otros dos estudios previos, la densidad de los MVR es mayor que la del MN, presentando incrementos cuando aumenta el contenido de AVR. Hui et al., 2013 [64] reemplazaron el 25, 50 y 75% de AN por AVR, para dos tipos de mezclas (reemplazo de cemento por ceniza volante y escoria del alto horno) obteniendo densidades superiores para cada una de ellas con diferencias del 5, 8 y 11%, y 4, 7 y 9% con respecto al MN. Los incrementos de densidad fueron atribuidos al hecho de que el AVR con origen de CRT presenta densidad superior al AN; en cuanto a las diferencias por efecto de los reemplazos del cemento, la causa se atribuyó a que la escoria de alto horno presenta mayor peso específico que la ceniza volante. Similar explicación se da para estudio realizado por los mismos autores [59], donde realizaron MVR con reemplazos del 100% de AN por AVR, simultáneamente con reemplazo del cemento por ceniza volante y escoria de alto horno, y obteniendo como resultado mayor densidad que el MN.

Contenido de aire

Sobre el contenido de aire de los MVR poco se ha reportado; no obstante, de los datos encontrados, no se observan tendencias similares entre ellos. En el estudio realizado por Tan & Du, 2013 [54], reportaron que

al utilizar AVR-(marrón, verde, transparente y mixto) para reemplazar al AN, se producen MVR con contenidos de aire de entre 3 y 3.5%, llegando a presentar sensibles incrementos cuando se realizan sustituciones de hasta el 75%, y acentuándose de forma más notoria para reemplazos del 100%. Tal comportamiento fue atribuido a la forma de las partículas, las cuales se conforman por bordes más afilados y al mayor coeficiente de aspecto de AVR con respecto al AN, que permiten que más aire pueda ser retenido en la superficie de las partículas del mismo (atracción molecular de partículas). El caso reportado extremo, fue el del AVR-transparente, el cual presentó el mayor contenido de aire (5.9%) para un reemplazo del 100%; éste comportamiento lo atribuyeron a micro fisuras observadas en las partículas trituradas, las cuales podrían haber afectado el empaquetamiento de los áridos, siendo más evidente en altos contenidos de reemplazo. Por otra parte, en el estudio de Penacho et al., 2014 [65], los MVR presentaron mayor contenido de aire que el MN, e incrementaron con la sustitución de AVR con un comportamiento casi lineal; para el MVR con 100% de AVR llegaron a alcanzar una diferencia máxima del 54% con respecto al MN, justificando esta tendencia al cambio de estructura interna debido al uso de AVR. En el mismo estudio se comentó, que un aumento en el contenido de aire incorporado, sería un valor añadido para acomodar el gel asociado con la ASR a medida que se forma; sin embargo, esto tiene como inconveniente la disminución de la densidad aparente, tanto en estado fresco como endurecido de los MVR. En otros estudios también se ha obtenido este último comportamiento, señalando que el uso de AVR fino (con partícula de entre 2.36 – 5 mm) da como resultado un mayor contenido de aire en la mezcla, debido a la forma irregular de la partícula que ocasiona una mayor superficie relativa, dando lugar a áreas más grandes que retendrían más huecos de aire [41].

Estado endurecido

En el presente apartado se reportan los diversos resultados obtenidos en el estudio de las propiedades de los MVR en su estado endurecido. El siguiente listado abarca las propiedades físicas, mecánicas estáticas, de deformación y de estructura de la matriz del material que permiten tener una visión global del mismo. El compendio presentado es el resumen actualizado de estas propiedades, y de su comprensión y correlación entre ellas.

Densidad

Sobre esta propiedad, resultados de investigaciones previas, reportan que la densidad endurecida de los MVR aumenta cuando se hace uso de AVR, y así mismo incrementa cuando mayor es su contenido. Ling & Poon, 2011b [43], señalaron que la densidad de los MVR aumentó aproximadamente un 3% para cada reemplazo de 25% de AVR-CRT por AN; siendo el reemplazo del 100% el que mayor densidad obtuvo respecto al MN (12%). Ling et al., 2012 [44] y Ling & Poon, 2012a [45] también demostraron que la densidad endurecida de los MVR aumentó con el incremento del contenido de AVR-CRT (tratado y sin tratar), alcanzando diferencias superiores con respecto al MN del 15 y 11%. En el mismo estudio también utilizaron AVR-botellas, ocasionando que la densidad de los MVR disminuyera ligeramente con respecto a la del MN, siendo más evidente cuando aumentaba la cantidad de reemplazo (2% para el reemplazo del 100%). Ling & Poon, 2012b [46] obtuvieron el mismo comportamiento de aumento de densidad cuando utilizaron AVR-CRT, sin embargo el aumento fue menor cuando el tamaño de la partícula se redujo, ya que el proceso de molienda de los trozos de mayor tamaño para obtener tamaños más finos, ocasionó el aumento de la superficie total, con la posible eliminación de mayores cantidades de plomo de la superficie de los AVR-CRT; dando como resultado la obtención de partículas más finas con menor gravedad específica.

La mayor densidad endurecida de los MVR se atribuyó al uso del AVR-CRT (tratado y sin tratar) que tiene una gravedad específica más alta (debido a la presencia de plomo) que la del AN; por lo que la densidad aumentó con el incremento en su uso. Comparando los dos tipos de AVR-CRT, el que contenía tratamiento previo, presentó ligera disminución de la densidad comparado con el que no fue tratado; la razón se debió, a que los trozos del AVR-CRT tratado eran ligeramente menos densos debido a la eliminación de plomo a través del proceso de tratamiento con ácido. En cuanto el uso de AVR-botellas, no presentaron influencia significativa en la densidad de los MVR, debido a que la gravedad específica era menor a la del AN.

Absorción al agua

Con base a lo reportado por diferentes estudios, los MVR presentan menor capacidad de absorción de agua en comparación con el MN, y así mismo disminuye con el aumento del contenido de AVR [43][45]; tal comportamiento se debió a la naturaleza del AVR, el cual es un material impermeable (capacidad de absorción de agua casi cero) [45][46]. Ling & Poon, 2011b [43] explicaron que el AVR-CRT si se compara con el AN en estado húmedo, presenta una capa de agua relativamente más delgada que cubre su superficie, ocasionando que una vez endurecido el mortero, el MN que no contiene AVR-CRT podría contener mayor cantidad de huecos de aire, permitiendo así la absorción de mayor cantidad de agua [43].

Por otra parte, el tamaño de partícula del AVR también repercute en la absorción de agua de los MVR. Ling & Poon, 2012b [46] y Ling & Poon, 2011a [41] reportaron que cuando se utilizan AVR-CRT y AVR-botellas, los MVR presentan menor absorción que el MN (como antes se ha mencionado), sin embargo en el caso específico del uso de AVR-CRT, los valores aumentan cuando su finura disminuye. En el primero de los estudios, reportaron que la absorción de agua aumentó en 7, 11 y 16% cuando el tamaño de partícula se redujo de 5 mm, 2.36 mm, 1.18 mm y 600 μm , respectivamente. En el segundo estudio, la sustitución del 25, 50, 75 y 100% de partículas de AVR de entre 2.36 a 5 mm por unas de tamaño mayor de entre 5 a 10 mm, ocasionó reducción de la absorción (entre 7 y 16%) de los MVR a la vez que aumenta la cantidad de reemplazo. La explicación que se dio a este comportamiento, es que las partículas de AVR más finas, presentan mayor área superficial, por lo que es posible atrapar más aire en la matriz de los MVR. En los MVR que contienen metacaolín para sustituir una parte del cemento, mencionan que su uso provoca un aumento de porosidad debido a su conocido proceso de hidratación lento, y por ende tales MVR tienden a presentar mayor absorción al agua [40].

Dependiendo del tamaño de las partículas de vidrio utilizadas en el hormigón, se observan dos comportamientos antagónicos: la ASR, que implica efectos negativos, y la reacción puzolánica, mejorando las propiedades del hormigón [38].

Resistencia a la Compresión

En relación a esta propiedad, la mayoría de los resultados proporcionados por investigaciones previas, reportan que cuanto se utiliza el AVR como sustituto parcial del AN, se producen MVR con resistencias inferiores a las del MN; y que el comportamiento puede ser influenciado por otros factores, tales como el porcentaje de sustitución, el color, tipo y el tamaño de partícula del vidrio. En lo que respecta al porcentaje de AVR en las mezclas, MVR con diferentes sustituciones presentan reducción de la resistencia a medida que el porcentaje de AVR aumenta. En uno de los estudios que evaluaron reemplazos del 10, 20, 30, 50 y 100% a los 28 días, las resistencias disminuyeron gradualmente de entre el 2 y 49%, siendo más notable a partir del uso del 20% de AVR; este comportamiento fue atribuido a fisuras creadas por la presión de expansión provocada por la ASR y con origen en la composición química del mismo, así como por la pérdida de resistencia adhesiva entre la superficie del AVR y la pasta de cemento [39]. En otro estudio que utilizaron reemplazos similares (25, 50, 75 y 100%), las disminuciones a los 28 días fueron de entre 5 y 17%, explicando que tal comportamiento fue causado por la unión más débil entre la superficie del AVR y la pasta de cemento [40].

En lo que respecta al comportamiento causado por el color del AVR, Tan & Du, 2013 [54] utilizaron cuatro diferentes, los cuales reemplazaron el AN por los mismos porcentajes del estudio antes mencionado. El comportamiento común observado en los MVR, fue el de reducción de la resistencia debido al aumento de uso del AVR, pero fue la variable "color", la que influyó en las diferentes resistencias: el MVR con AVR-verde mostró el mejor comportamiento, presentando reducciones inferiores para cada uno de los contenidos, seguido de los que contenían AVR-marrón y AVR-mixto, los cuales mostraron resistencia comparable, y por último el que contenía AVR-transparente, el cual manifestó las mayores pérdidas (13, 22, 24 y 37% respectivamente, con referencia al MN); las bajas resistencias de éste último, fueron atribuidas a micro fisuras formadas durante el proceso de trituración. En cuanto al comportamiento general presentado por tal investigación, las pérdidas de resistencia fueron atribuidas a la debilitada Zona de Transición Interfacial (ITZ) (siendo esta usualmente, la que domina las propiedades mecánicas y de durabilidad), causada por los AVR caracterizados por presentar superficie lisa y bordes afilados que impiden una buena adherencia; sin embargo, para contenidos por debajo del 25%, la resistencia a compresión no se vio afectada. En estudio

realizado por Corinaldesi et al., 2016 [51] quien utilizó AVR-transparente, AVR-verde y AVR-ámbar, presentó similares comportamientos de resistencia al estudio anterior, cuando sustituyeron el 100% de AN por AVR (en específico con AVR-transparente y AVR-verde); en el caso de uso del MVR-transparente, mayor diferencia negativa presentó respecto al MN (44%), mientras que el MVR-verde la menor (11%). El MVR-ámbar, no presentó diferencias significativas cuando se reemplazó el 50 y 100% de AVR (4%), así mismo presentó los valores de resistencia más cercanos a los del MN, con una disminución del 9% para el reemplazo del 100%, mientras que el MVR-transparente y MVR-verde las reducciones fueron de 22 y 50% respectivamente; todos a la edad de 28 días. A la edad de 180 días, el MVR con 50% de AVR-transparente fue la única mezcla con rendimiento mecánico comparable al MN, mientras que con reemplazo del 100% fue la que presentó el menor valor; tal comportamiento fue atribuido a la presencia generalizada de fisuras presentes en los especímenes, y de fácil detección visual.

El vidrio con origen de CRT descartados, también se ha estudiado en forma de árido para su uso en los MVR, requiriendo de forma previa un proceso de triturado y tratamiento con ácido para eliminar el óxido de plomo que contiene; también, con el fin de comparar, se ha utilizado sin previo tratamiento con ácido. En trabajos presentados por Ling & Poon, 2011b [43], Ling et al., 2012 [44] y Ling & Poon, 2012a [45], reemplazaron el 25, 50, 75 y 100% del AN por AVR-CRT tratado y sin tratar, reportando que los resultados muestran un comportamiento de reducción gradual en la resistencia con el aumento de AVR, como consecuencia de la débil unión entre la superficie lisa del AVR y la pasta de cemento. En el primero de los estudios mencionados (con AVR-CRT tratado), las reducciones más evidentes se dieron a los 7 y 28 días, siendo para esta última edad los valores del 1, 6, 7 y 22%, respecto al MN. A la edad de curado de 90 días, la reducción se vio disminuida con una máxima del 5% (MVR con reemplazo total, respecto al MN); estas mejoras en la resistencia a largo plazo, fueron atribuidas a la posible reacción puzolánica del AVR en la pasta de cemento hidratado. En el segundo y tercer estudio reportaron el mismo comportamiento en los MVR que en el primero, cuando se utilizó AVR-CRT tratado y sin tratar, así como AVR con origen en recipientes de bebidas (de post-consumo trituradas) –para fines comparativos–. Para los diferentes porcentajes de reemplazo utilizados de los MVR, los que contenían AVR-CRT tratado con ácido presentaron mayores resistencias que los que contenían vidrio de AVR-CRT sin tratar; en el caso de AVR-botellas, a los 90 días presentaron la mayor resistencia de los MVR, con una diferencia negativa del 13% respecto al MN [44]. En este último estudio, se explicó que los valores de resistencia obtenidos, cumplían dentro de los límites reglados (Reglamento de Construcciones - Capítulo 123 Hong Kong) y ASTM C 270, y que por tanto son factibles para utilizarlos en la mayoría de aplicaciones de construcción.

El tamaño de las partículas del AVR también repercute en la resistencia a la flexión, estudio previo de los autores mencionados anteriormente [46], también reportaron similar comportamiento en MVR con 100% de AVR-CRT –reducción de resistencia por efecto del AVR–; sin embargo los valores mejoraron cuando se utilizaron AVR con mayor tamaño de partícula. Cuando el tamaño se incrementó de 600 μm a 1.18, 2.36 y 5 mm, la resistencia de los MVR aumentó el 2.5, 10.8 y 30.8 % respectivamente, a la edad de 28 días. Este comportamiento fue atribuido al hecho de que partículas de mayor tamaño logran una distribución de partícula continua, alcanzando un mayor empaquetamiento de las mismas, y por ende resulta más favorecedor en la adherencia de la matriz para resistir el esfuerzo a compresión. En cuanto al aumento de resistencia debido al tamaño de partícula, en otra investigación se observó comportamiento inverso, ya que el aumento de uso del AVR de mayor tamaño (5 a 10 mm) reemplazando partículas de entre 2.36 y 5 mm en porcentajes de 25, 50, 75 y 100%, ocasionó reducciones en la resistencia en particular a los 28 y 90 días (23 y 21% respectivamente, para el reemplazo del 100%); mientras que los MVR sin partículas mayores, las pérdidas fueron del 10 y 14% a los 28 y 90 días. Tal comportamiento fue atribuido a la superficie lisa de las partículas de AVR, la cual presentaba fisuras que posiblemente afectaron la resistencia de unión con la pasta de cemento, así como al contenido de metacaolín que fue usado como reemplazo del 10% del cemento [41].

Comportamiento contrario a lo mencionado previamente ha sido reportado por Corinaldesi et al., 2005 [53], quienes reportaron incrementos en la resistencia de los MVR que contenían 30 y 70% de tres tipos de AVR (con procedencia posible de edificios demolidos), y caracterizados por presentar diferente distribución de tamaños de partículas (hasta 36 μm , de 36 a 50 μm , y de 50 a 100 μm). El MVR con 70% de AVR con rango de partículas entre 36 a 50 μm , presentó las mejores prestaciones, ya que mostró el valor más alto de

resistencia, y menor cantidad de Macroporos y Mesopores (poros con un tamaño mayor de 100 nm); este beneficio se atribuye al considerar que en general, los MVR se caracterizan por presentar una mayor porosidad abierta que los MN. En estudio realizado por Hui & Sun, 2011 [59], utilizaron AVR-CRT (con proceso de tratado con ácido y sin tratar) para sustituir el 100% de AN (arena de río), además de la adición del 25% de ceniza volante y escoria de alto horno (por separado) sustituyendo el 25% del cemento. Los resultados muestran que para las edades de 3, 7, 28 y 90 días, y con los dos tipos de adiciones, la resistencia a la compresión de los MVR se ve incrementada, siendo el que contiene AVR-CRT sin tratar el que presenta las resistencias más altas que el MN (41 y 55% con respecto al MN, a los 28 días). Tal comportamiento fue atribuido a que el AVR-CRT era más fino que el AN, por lo que mejoró el embalaje de las partículas, dando como resultado mayor compacidad y mayor resistencia a la compresión.

Resistencia a la Flexión

En lo que respecta a la resistencia a la flexión, diversos estudios han presentado resultados con tendencia similar a los obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión, afirmando que el uso de AVR como sustituto parcial del AN, producen MVR con resistencias inferiores a las del MN, y que factores tales como el porcentaje de sustitución, el color, tipo y tamaño de la partícula de vidrio, repercuten en su comportamiento. En lo que respecta al porcentaje de AVR en las mezclas, MVR con diferentes sustituciones presentan reducción de la resistencia a medida que el porcentaje de AVR aumenta. En un estudio previo se evaluaron reemplazos del 10, 20, 30, 50 y 100% a los 28 días, observando que la resistencia disminuye gradualmente entre el 3 y 51% cuando se incrementa el contenido de AVR; tal efecto fue más evidente para porcentajes superiores al 20%. El comportamiento de pérdida de resistencia de los MVR fue atribuido a fisuras formadas por consecuencia de la presión de expansión causada por el ASR (generada a partir de la sílice que contiene el AVR), además de la disminución de la resistencia adhesiva entre la superficie del AVR y la pasta de cemento [39]. Otros dos estudios presentaron similar comportamiento para reemplazos del 25, 50, 75 y 100% de AVR por AN, en los cuales la resistencia disminuyó gradualmente en todas las edades de ensayo; a los 28 días, las reducciones fueron del 8.5, 16.5, 27.5 y 37.6% [47], mientras que a los 90 días fueron del 8.2, 19.1, 22.5 y 34.5% [40] respectivamente, para cada uno de los reemplazos comparados con el MN. Con referencia a las pérdidas observadas en estos estudios, se explica que fueron causadas por la presencia de AVR (que debilita su unión con la pasta de cemento), además de la presencia de metacaolín que reemplaza parte del cemento.

En cuanto a comportamiento ocasionado por el color del vidrio, también se han reportado pérdidas graduales cuando aumenta el contenido del AVR con reemplazos del 25, 50, 75 y 100% por AN. Tan & Du, 2013 [54], obtuvieron resistencias del 24, 10, 30 y 24% más bajas que el MN, para los MVR con 100% de AVR-marrón, AVR-verde, AVR-transparente y AVR-mixto respectivamente; en el caso específico del MVR-transparente, la reducción fue más evidente con reemplazos superiores al 25%, mientras que para los otros tres colores la resistencia fue menor que el 10% a los 28 días, cuando el reemplazo era inferior al 75%. Las pérdidas de resistencia fueron ocasionadas por la ITZ más débil, que se vio afectada por la disminución de la resistencia adhesiva entre las partículas del AVR y la pasta de cemento; además de las micro-fisuras formadas durante el proceso de trituración de los AVR, las cuales influyeron en la resistencia de los MVR, siendo más manifiesto en los que contenían AVR-transparente. Corinaldesi et al., 2016 [51] también estudio MVR con AVR-transparente, AVR-verde y AVR-ámbar, sustituyendo el 50 y 100% del AN, y obtuvo comportamiento similar al anterior (de pérdidas de resistencia); MVR con 100% de AVR independientemente del color, presentaron menor resistencia que los MVR con solo el 50%. Tal comportamiento se explicó, por la mala distribución de las partículas del AVR, la cual si es combinada con el 50% de AN, logra mejoras en la resistencia.

Ensayos de resistencia a la flexión también se han realizado a los MVR-CRT (con y sin tratamiento previo para eliminar el óxido de plomo que contienen), los cuales son comparados tanto con MVR que contiene AVR-botellas, como con el MN con 100% de AN. En los estudios realizados por Ling & Poon, 2011b [43], Ling et al., 2012 [44] y Ling & Poon, 2012a [45], se utilizaron el 25, 50, 75 y 100% de AVR para sustituir el AN, y obtuvieron pérdidas de resistencia gradual con el aumento del AVR, con similar comportamiento a los obtenidos con el uso de AVR más utilizados (vidrio de bebidas o de demolición de construcción). En el primer estudio mencionado, se reporta que la reducción de resistencia por efecto del AVR-CRT fue más

evidente a la edad de 7 y 28 días (del 8 al 42% a los 28 días), pero que a la edad de 90 días las disminuciones respecto al MN fueron del 2 al 14% (para el 25 y 100% de reemplazo respectivamente). En el segundo estudio, los MVR con los diferentes porcentajes de sustitución del AVR, presentaron menor resistencia que el MN a los 28 días; sin embargo, para reemplazos a partir del 50%, el MVR con AVR-botella presentó la menor reducción de resistencia comparado con el MN (18%). En el tercer estudio mencionado, MVR con reemplazos del 100% de AVR presentaron mayores pérdidas que los que contenían solo el 50%; sin embargo, MVR que contenían tanto AVR-CRT tratado como AVR-botella, presentaron las menores reducciones de resistencia con respecto al MN a los 90 días, de aproximadamente del 13%, mientras que el que contenía AVR-CRT sin tratar fue mayor (25%), explicado por el posible efecto de retraso de hidratación del cemento a causa del plomo que contiene dicho AVR. En todos los estudios, las reducciones generales que se presentaron en todos los MVR, fueron atribuidas a la pérdida de resistencia de unión entre el AVR (con superficie lisa) y la pasta de cemento; en cuanto a las mejoras a largo plazo, a la posible reacción puzolánica de la fracción fina de los AVR en la pasta de cemento hidratado. Sin embargo para el segundo estudio, se explicó que los valores de resistencia obtenidos son factibles para utilizarlos en la mayoría de aplicaciones de construcción, ya que cumplen con los límites reglados (Reglamento de Construcciones - Capítulo 123 Hong Kong) y ASTM C 270.

El tamaño de las partículas de AVR también repercute en la resistencia de los MVR, las pérdidas presentan similar comportamiento a los mencionados previamente; sin embargo el uso de tamaños de partículas más finas, proporcionan ligeros aumentos de resistencia. En estudio realizado por Ling & Poon, 2011a [41] se realizaron MVR con 100% de AVR, en los cuales el 60% estaba compuesto por partículas menores a 2.36 mm, y el 40% restante por partículas de entre 2.36 y 5 mm las cuales fueron reemplazadas en cantidades del 25, 50, 75 y 100% por partículas de tamaño de entre 5 y 10 mm. Los resultados obtenidos indican que los MVR sin partículas de mayor tamaño presentaron pérdidas de 37 y 34% menos que el MN (a los 28 y 90 días respectivamente), mientras que con el 100% de ellas las pérdidas aumentaron a 39 y 36%. Este comportamiento fue atribuido a la posible afectación de la resistencia de unión entre las partículas de AVR y la pasta del cemento, causadas por las partículas lisas y con presencia de fisuras del AVR; también por la presencia de metacaolín que reemplazó el 10% del cemento. Este comportamiento fue corroborado posteriormente por estudios de los mismos autores [46] quienes realizaron diferentes mezclas de MVR, utilizando cuatro diferentes tamaños de partículas de vidrio CRT, así como AVR-botellas para reemplazar el 100% de AN; además se fabricó un MN sin presencia de AVR para su comparación. Los resultados obtenidos muestran que el MN presentó la mayor resistencia en todas las edades, seguido del MVR con AVR-botellas, los cuales presentaron mayor resistencia que los que contenían AVR-CRT (18 a 25% a los 90 días); esto debido a la posible reacción puzolánica causada por las partículas finas ($< 150 \mu\text{m}$) que contenía (aproximadamente del 5%). En el caso de los que contenían AVR-CRT, se observó que contrario al comportamiento de la compresión, el uso de tamaño de partícula más fina ($< 600 \mu\text{m}$), proporcionó ligero aumento de resistencia comparados con los otros tamaños utilizados, ya que partículas de mayor tamaño de AVR ($< 5 \text{ mm}$ y con superficie lisa) debilitaban significativamente la resistencia de su unión con la pasta de cemento.

Por otra parte, se han reportado estudios que han encontrado tendencias inversas a lo anterior; Corinaldesi et al., 2005 [53] obtuvo resistencias a flexión de los MVR, más altas que el mortero de control cuando sustituyó el 30 y 70% de AVR de tres diferentes tamaños de partículas (< 36 , $36 - 50$ y $50 - 100 \mu\text{m}$); independientemente el tipo de vidrio, los MVR con 70% de AVR presentaron la mayor resistencia, siendo mayor para el que contenía AVR de $50 - 100 \mu\text{m}$, con un 47% mayor que el MN. Estos resultados fueron inesperados para los autores, ya que las mezclas de MVR realizadas, se caracterizaron por presentar mayor relación a/c con respecto a la del MN. En investigación realizada por Hui & Sun, 2011 [59], también obtuvieron resistencias a la flexión superiores a las del MN; en este estudio se utilizó el 100% de AVR-CRT (tratado y sin tratar) en los MVR, arena de río para el MN, y además la adición de ceniza volante y escoria de alto horno sustituyendo el 25% del cemento (por separado las adiciones). A las edades de 3, 7 y 28 días, los MVR que contenían AVR-CRT (tratado y sin tratar) presentaron mejores resistencias que el MN, siendo el que contenía AVR-CRT sin tratar y con adición de ceniza volante, el que alcanzó la mayor resistencia a los 28 días (8%).

Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad en los MVR se ha evaluado por Hui & Sun, 2011 [59], usando AVR-CRT (tratado y sin tratar) para reemplazar el 100% del AN, y comparados con un MN con AN proveniente de río; además ceniza volante y escoria de alto horno se adicionó a las mezclas como reemplazo parcial del cemento (25% en mezclas por separado). Los ensayos para obtener el módulo de elasticidad se realizaron a los 28 y 90 días, obteniendo resultados con valores superiores en todos los MVR comparados con el MN para las mezclas con cualquiera de las dos adiciones; sin embargo con adición de ceniza volante, los aumentos a largo plazo fueron del 10 y 33% para los dos tipos de MVR (el mayor para el que contenía AVR-CRT sin tratar). Por otra parte, en otro estudio se presentó comportamiento contrario, ya que el módulo de elasticidad estático y dinámico de los MVR resultaron inferiores al presentado por el MN. Tan & Du, 2013 [54] reemplazaron el 25, 50, 75 y 100% del AN utilizando AVR-marrón, AVR-verde, AVR-transparente y AVR-mixto, ocasionando reducciones en todos los MVR a los 28 días, en especial para el AVR-transparente; para los otros colores las reducciones fueron menores cuando se reemplazó hasta el 50%. Para mezclas de MVR con 100% de AVR-marrón, AVR-verde, AVR-transparente y AVR-mixto, las reducciones para el módulo estático fueron del 3, 7, 20 y 12%, mientras que para el módulo dinámico fueron de 10, 8, 23 y 11% respectivamente. Este comportamiento fue atribuido al enlace más débil en la ITZ entre las partículas de AVR y la pasta de cemento, lo que condujo a obtener un módulo de elasticidad más bajo; en especial en MVR-transparente, que mostró el menor rendimiento mecánico debido a micro fisuras – resultado del proceso de trituración–. En este estudio, debido al uso de MVR el módulo de elasticidad ha sido el menos afectado, comparado con otras propiedades mecánicas.

Resistencia a la abrasión

Sobre la resistencia a la abrasión, dos estudios han presentado resultados sobre los ensayos realizados a los MVR. Los resultados son reportados en mm, y representan la medida de la ranura en la muestra, causada por una rueda de abrasión giratoria; se especifica que una ranura más pequeña indica una mejor resistencia a la abrasión. De acuerdo a las medidas de ranura obtenida, en ambos estudios la resistencia a la abrasión se redujo cuando se utilizó AVR. En el estudio llevado a cabo por Ling et al., 2011 [40] reportaron pérdidas de resistencia mayores cuando se incrementó la cantidad de reemplazo del AVR por el AN; con un 25% de AVR la resistencia resultó comparable con la del MN, sin embargo para los reemplazos del 50, 75 y 100%, la pérdidas de resistencia fueron de 7, 18 y 24% respectivamente. Por otra parte, Ling & Poon, 2011a [41] utilizaron tres diferentes tamaños de partículas (< 2.36, 2.36 a 5 y 5 a 10 mm), de las cuales el tamaño mediano fue sustituido el 25, 50, 75 y 100% por la de mayor tamaño, ocasionando mezclas de MVR con partículas más grandes; los resultados mostraron que el aumento de partículas de mayor tamaño ocasionó pérdidas de resistencia de entre 0.2 y 1.1% con respecto al MVR con solo partículas pequeñas y medianas. La menor resistencia a la abrasión se atribuye al uso de AVR, así como el metacaolín que contienen las mezclas como reemplazo del 10% de cemento; ya que el metacaolín utilizado en porcentajes mayores (20 y 30%), ocasionó reducciones de resistencia superiores. En general, la resistencia a la abrasión está vinculada con la resistencia a la compresión, por lo que una baja resistencia a la compresión, ocasionará reducción en la resistencia a la abrasión.

Durabilidad

A continuación, se describen algunos de los resultados reportados por diversos investigadores, los cuales han enfocado sus estudios a propiedades que influyen o afectan el comportamiento de la durabilidad de los morteros que contiene AVR.

Retracción por secado

En cuanto a la deformación de los MVR, diversos estudios reportan que el uso de AVR como reemplazo del AN reduce la retracción por secado mejorando su estabilidad dimensional, comparado con el MN que muestra valores superiores; cuando el contenido de reemplazo de AVR es mayor, este comportamiento es más evidente. La mayoría de los estudios que han evaluado esta propiedad, atribuyen tal conducta de reducción de retracción, a la menor capacidad de absorción del AVR, debido a la característica de impermeabilidad que presenta. Otro de los factores que influyen positivamente en el decremento de la retracción por secado es el uso de metacaolín (que reemplaza una parte del cemento), por su posible acción de reducción de la cantidad de agua evaporable, debido a su menor velocidad de hidratación [40]; así

mismo, al alto coeficiente de forma, la irregularidad de las partículas de AVR, y al hecho de que su granulometría sitúa su perfil preferentemente en la zona de partículas finas [54].

Investigaciones se han llevado a cabo con diferente tipo de AVR, los cuales reducen la retracción por secado de los MVR; según Ling et al., 2011 [40] el uso de 100% de AVR-botellas (botellas de bebida post-consumo), disminuyó la retracción un 17% respecto al MN a la edad de 112 días. Poon & Ling, 2010 [47], obtuvo reducciones del 22% respecto al MN a los 56 días, cuando se reemplazó el 100% de AVR (sin origen especificado). Ling & Poon, 2012a [45] utilizaron AVR-CRT para sustituir el 100% del AN, y reportaron que el uso de AVR-CRT sin tratamiento previo obtuvo la mayor reducción de retracción, comparado con la presentada por el MN (54% menos). Este comportamiento fue atribuido al efecto de retardo en la hidratación del cemento, causado por el plomo que contiene ese tipo de vidrio. Por otro lado se ha reportado que el uso de AVR-CRT (tratado) pero con diferente tamaño de partícula reporta menor retracción por secado, comparado con el MN (27%) cuando se utilizan partículas de mayor tamaño (5 mm) [46]; en el mismo estudio, AVR-botellas también se utilizó (con fines comparativos), presentando la menor retracción (38% menos) con respecto al mortero de referencia (MN). En cuanto al tamaño de partícula del AVR, en otro estudio se corrobora el mismo comportamiento, la retracción por secado disminuye cuando mayor cantidad de AVR de mayor tamaño se utiliza [41].

El comportamiento en general, es que hasta los 4 días, los valores de cambio de longitud son aproximadamente comparables, mientras que para el periodo posterior (de 7 a 90 días), se observaron diferencias considerables con un efecto positivo del uso de AVR [41][43][45][46]. Es todas estas investigaciones, los resultados obtenidos a la edad de 56 días mostraron que la retracción por secado de los MVR fue inferior al 0.075% que especifica el estándar Australiano AS 3600 [47][40][54].

Comportamiento contrario a lo antes mencionado se presenta en estudio realizado por Hui & Sun, 2011 [59], quienes reportaron mayor retracción por secado en los MVR que la presentada por el MN. En este estudio se utilizaron AVR-CRT (tratado y sin tratar) y AN (de río) para el mortero de control (MN); con los tres diferentes áridos se fabricaron dos tipos de morteros para cada uno, los cuales incluían ceniza volante y escoria de alto horno en sustitución de una parte del cemento, respectivamente. Los resultados obtenidos a todas las edades, muestran que los MVR presentaron mayor retracción por secado que el MN utilizando ceniza volante o escoria de alto horno; tal comportamiento fue atribuido al hecho de que valores de retracción por secado tienen estrecha relación con la resistencia a la compresión en las mismas edades de curado, por tanto, el uso de AVR mejora la resistencia de compresión y así mismo presentan una mayor retracción por secado en los MVR que los contienen; siendo más evidente en el incluía AVR-CRT sin tratar (63 y 43% más que el MN, a los 56 días). En cuanto al efecto de la adición mineral, los MVR con cenizas volantes presentaron retracción por secado por debajo del límite especificado por el estándar australiano AS 3600 (0.075 %) a los 56 días; mientras que los MVR con escoria de alto horno se encontraban cercanos al mismo.

Introducción de morteros con áridos de material cerámico reciclado

Aspectos generales

La industria cerámica se encarga de la elaboración de los productos tales como los azulejos de pared y suelo, artículos sanitarios, ladrillos y tejas, materiales refractarios, cerámicas técnicas y materiales cerámicos para uso doméstico y ornamental [66]. Estos productos generan una gran cantidad de residuos que pueden producirse en cualquier momento del ciclo de vida de los mismos, y en general pueden ser obtenidos de diferentes formas: dentro de su mismo proceso de elaboración, o al ser separados de los escombros de demolición.

Uno de los orígenes de la obtención de los residuos cerámicos, es de la misma industria en donde se fabrican, y de acuerdo a la Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero [67], es clasificado como un residuo industrial no peligroso y se encuentra en la Lista Europea de Residuos identificados con los siguientes códigos:

- 10 Residuos de procesos térmicos
- 10 12 Residuos de la fabricación de productos cerámicos, ladrillos, tejas y materiales de construcción.
- 10 12 08 Residuos de cerámica, ladrillos, tejas y materiales de construcción (después del proceso de cocción).

El segundo origen de obtención de residuos de cerámica es de las actividades referentes a la construcción y demolición de edificios; los residuos de cerámicos conforman una fracción significativa de los llamados RCD. En este ámbito, los residuos cerámicos se encuentran clasificados en la Lista Europea de Residuos con los siguientes códigos:

- 17 Residuos de la construcción y demolición (incluida la tierra excavada de zonas contaminadas).
- 17 01 Hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos.
- 17 01 02 Ladrillos.
- 17 01 03 Tejas y materiales cerámicos.

Con referencia a los residuos generados por la industria cerámica, se debe tener en cuenta que los diferentes sistemas de producción, crean subproductos y productos de desecho los cuales se pueden producir en la fase inicial de obtención de materias primas, durante la fase de transformación y producción, durante la distribución del producto o cuando el usuario final debe deshacerse de productos que ya no son necesarios. La industria manufacturera de ladrillos, baldosas, suelos y tejas (productos más predominantes), producen un gran número de productos los cuales son rechazados por estar fuera de estándar. Unidades rotas, distorsionadas o quemadas de alguna forma, constituyen los desechos industriales, los cuales en su mayoría no pueden ser reciclados dentro de la planta y por tanto generan un problema de eliminación [68][69][66]. Los residuos de cerámica se caracterizan por ser duraderos, duros y de alta resistencia a las fuerzas biológicas, químicas y físicas de degradación, sin embargo continuamente se siguen acumulando en los vertederos; con motivo de lo anterior, se está haciendo incidencia en las industrias cerámicas para encontrar soluciones desde el punto de vista ecológico y económico de su eliminación [70][71].

Por otra parte, los residuos cerámicos forman parte de los materiales que componen a los RCD, los cuales se caracterizan por tener una composición heterogénea; el 25% están compuestos por impurezas con bajos porcentajes (madera, vidrio, plástico, metales, asfalto, yeso, papel, basura y otros) y el 75% restante se compone de escombros constituidos por ladrillos, azulejos y otros cerámicos (54%), hormigón (12%), piedra (5%) y arena, grava y otros áridos (4%) [72]; por lo que los RCD se componen de forma principal por materiales cerámicos [68][73][74]. Los RCD se producen durante el ciclo de vida de un edificio e

infraestructura, pero su origen se distingue en las fases de rehabilitación y demolición [74]. Debido al gran volumen de RCD y a su creciente producción, la eliminación de residuos se ha convertido en un grave problema social y ambiental [7]; por lo tanto, estos materiales reciclados pueden ser aprovechados al utilizarse de diferentes formas dentro de la industria de la construcción, con el fin de lograr un crecimiento sostenible tanto en la economía como en la sociedad.

Debido a que la industria de la construcción necesita grandes cantidades de materiales con bajos requerimientos generales de calidad, los residuos de cerámica son una alternativa para ser utilizados de forma segura sin necesidad de realizar cambios drásticos en su producción y proceso de aplicación; por lo que su uso como áridos para hormigones y morteros, conlleva a beneficios como el de reducir la cantidad de residuos vertidos, la disminución de recursos no renovables, contribuir en el ahorro de energía y protección del medio ambiente, y conducir a la promoción de la construcción sostenible [75][74].

Usos de residuos cerámicos

En algunos países los materiales reciclados provenientes de residuos de demolición que contienen material cerámico, se utilizan principalmente para el relleno de excavaciones, capas de balasto o capas de firmes de carreteras; dependiendo de la naturaleza o composición mayoritaria de los residuos. No obstante, otros usos se dan o se pretenden dar a estos residuos, por lo que a la fecha estos materiales son un tema investigación, debido a la búsqueda de materiales amigables con el medio ambiente y con características de sostenibilidad.

Los áridos reciclados pueden definirse como el resultado del tratamiento y manejo de residuos, para que cumplan con las especificaciones técnicas para su uso en el sector de la construcción y la ingeniería civil; se menciona que si estos escombros de demolición de edificios se seleccionan de una forma adecuada, se trituren, se limpian y se tamizan en plantas industriales apropiadas de trituración, dichos escombros podrían ser útiles para aplicaciones más ambiciosas como la fabricación de nuevo hormigón o mortero. Se considera como áridos reciclados cerámicos a aquellos que contienen al menos un 65% en peso de ladrillo y ladrillo sílico-calcáreo, mezclados o no con hormigón; como consecuencia de esto, las prestaciones de los compuestos que se fabriquen con ellos (en particular la resistencia mecánica) pueden ser afectadas, puesto que la composición de los residuos tiene una influencia considerable. Una alternativa para disminuir este efecto, es la posibilidad de selección de materiales cerámicos incluidos en los RCD antes de su trituración [76][17][73][32].

Investigadores en todo el mundo han indagado los efectos de la utilización de residuos de cerámica, o piezas de cerámica rota provenientes de bloques, pared de tabiques, ladrillos, tejas, artículos sanitarios o aislantes eléctricos, como áridos o aditivos puzolánicos, así como en reemplazo del cemento en morteros y hormigones; esto con el fin de resolver el problema de los residuos de la industria cerámica, y al mismo tiempo lograr la construcción más sostenible [77][78][23][70][79][80][75][32][81][74]

Tipologías de áridos reciclados cerámicos

Existen diferentes tipos de áridos reciclados cerámicos los cuales se han utilizado como reemplazo de los áridos naturales en morteros y hormigones. Para su uso como áridos en hormigones, los tipos que se han estudiado corresponden a residuos industriales de aisladores eléctricos de cerámica, ladrillos, bloques, tejas, gres de pared, azulejos de piso y mercancías sanitarias [70][75]. Así mismo, estos tipos de materiales también se han utilizado en la fabricación de morteros como reemplazo del árido natural [81]; en particular, ladrillo con origen en la industria cerámica (por ser producto fuera del estándar) y ladrillo nuevo se han utilizado para su estudio [68][21][73]. Por otra parte, bloques de albañilería que contiene ladrillo de cerámica roja y mortero, fueron seleccionados a mano a partir de acopios de escombros, para ser molidos en una trituradora de impacto [74].

El árido reciclado cerámico en forma de polvo se ha estudiado para su uso como reemplazo del cemento en morteros y hormigones, así como su uso en el proceso de fabricación del cemento. Se ha puesto énfasis al estudio de estas partículas como material puzolánico, la cual es influida por el estado amorfo de los productos, que a su vez es ocasionado por la temperatura de calcinación de las arcillas [23][42].

Aplicaciones de usos de áridos finos cerámicos

Como se ha mencionado antes, el uso de los RCD es limitado según lo establecido en la nueva Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08); permitiendo la utilización de la fracción gruesa (tamaño superior a 4 mm), como sustituto del 20% en peso sobre el contenido total del árido grueso natural [28]. Puesto que el árido cerámico representa la mayor parte de los RCD, las mismas limitaciones se establecen para los estos; por esta razón una gran cantidad de materiales finos reciclados no pueden ser utilizados en aplicaciones donde sea requerido mayor tamaño de partícula.

Debido a lo anterior, se ha estudiado el uso de la fracción fina de estos residuos como árido para reemplazar a los naturales en los morteros, permitiendo aumentar las tasas de reciclado de la fracción fina, aumentar el ciclo de vida de los materiales de construcción, reducir la cantidad de residuos vertidos y el consumo de recursos no renovables, y conducir a la promoción de la construcción sostenible [74][82]. Además se ha estudiado el efecto de los áridos obtenidos por medio de dos procesos de triturado (trituradora de mandíbulas o molino de bola giratorio), puesto que producen granulometrías diferentes en los mismos [32]

Los áridos finos cerámicos también se han utilizado en forma de polvo como sustituto del cemento en el estudio de morteros, con el fin de evaluar la potencial actividad puzolánica [23][81][42]. Así también como sustituto parcial de las materias primas para la fabricación de clínker de cemento, utilizando diferentes tamaños de partículas (< 45, 45-90 y > 90 μm) [83].

Consideraciones específicas del uso de árido reciclado cerámico

Algunas consideraciones a tener en cuenta para el uso de áridos reciclados cerámicos es el posible contenido de compuestos químicos que afectan la matriz del mortero en el que se va a utilizar. Depende del origen del árido reciclado (reciclado viejo o de origen incierto), pueden estos presentar problemas de compatibilidad. Uno de los compuestos perjudiciales son las sales de sulfato, las cuales pueden estar presentes en la albañilería que contenga los residuos cerámicos (cuando no sean 100% de residuos cerámicos), ya que estos pueden ocasionar deterioro en los morteros [32].

Por otra parte, cuando se utiliza el árido reciclado en forma de polvo, su finura es un parámetro importante para la posible reactividad puzolánica o expansividad causada por la ASR [68][84][42]

Los áridos reciclados cerámicos se caracterizan por presentar una alta absorción al agua, que puede verse reflejada en una mayor demanda de agua en las mezclas que los contienen; este comportamiento puede ocasionar efectos negativos en la porosidad de los morteros en estado endurecido y por consiguiente en las propiedades de resistencia de los mismos [68][21][32][81].

Propiedades de los morteros que contienen cerámicos reciclados

El siguiente apartado es una síntesis del estado del conocimiento de los morteros que utilizan áridos cerámicos reciclado (ACR), extraída en su totalidad de trabajos previos reportados, haciendo mención y comparación del comportamiento en estado fresco y endurecido de los morteros fabricados con estos áridos (morteros cerámicos reciclados –MCR–), tomando como referencia el mortero usual (mortero natural –MN–). Con base a lo explicado en este apartado, se demuestra la variabilidad de los estudios realizados por otros autores y la inconsistencia en las tendencias presentadas, es evidente la necesidad de más estudios, con el fin de establecer normativas que permitan su uso. La necesidad de uso y aprovechamiento de este material es favorable puesto que presentan resultados positivos en algunas de sus propiedades, además de beneficios en cuanto al aspecto económico y ambiental en la sociedad.

Estado fresco

En este apartado se reporta el comportamiento de los MCR en estado fresco; siendo este estado incipiente de los mismos, el preámbulo que garantizará un adecuado y deseado desempeño en su estado endurecido posterior.

Consistencia

Por lo que respecta a la fluidez de los CRM, investigaciones previas han reportado decrementos cuando se comparan con el MN, teniendo como influencia en tal comportamiento la cantidad de uso de ACR en los mismos. Bektas et al. (2009) [68], estudiaron CRM con contenidos del 10, 20 y 30% de ACR reemplazando el AN; obteniendo que la fluidez (medida de la trabajabilidad del mortero) disminuye con los incrementos del ACR, presentando reducciones del 11, 23 y 32% respectivamente, cuando fueron comparados con el MN. Tal comportamiento fue explicado, por la elevada capacidad de absorción de agua del ACR; no obstante, todas las variables que se estudiaron se consideraron aptas por normativa. Otros estudios han presentado similar comportamiento cuando el contenido de agua se establece como una variable en los CRM con diferentes porcentajes de ACR: Jiménez et al., 2013 [74] reemplazó porcentajes de hasta el 40% de ACR (5, 10, 20 y 40%); J. Silva et al., 2010 [73] utilizó el 20, 50 y 100%; y por último Corinaldesi & Moriconi, 2009 [21] y Corinaldesi, 2012 [32], estudiaron CRM con reemplazo total (100% de ACR). En estos estudios, se estableció lograr la misma consistencia para los diferentes CRM, dando como resultado una mayor demanda de agua a medida que aumenta la cantidad de ACR y especialmente para partículas más finas; esto atribuido a la mayor absorción de agua del ACR con respecto a la AN.

Por otra parte, Silva et al., 2009 [84] obtuvieron resultados con tendencia contraria a las anteriores, ya que la consistencia (en mm) en los MCR con sustituciones bajas (5 y 10%), resultaron mayores respecto a la del MN (1 y 2%, respectivamente). Concluyendo que el agua de amasado necesaria para obtener una trabajabilidad aceptable disminuye al incrementar los ACR finos; siendo el tamaño y el contenido de ACR utilizados los que gobiernan esta propiedad. Similar comportamiento fue presentado en otro estudio [85], en el que se realizaron mezclas de MCR con 10% de ACR (en volumen) para dos diferentes relación cemento:arena (c:a) (1:5 y 1:6), y se compararon con el MN con relación c:a = 1:4 (sin ACR); los resultados obtenidos mostraron que los MCR presentan menor demanda de agua que la mezcla de MN, debido al uso de ACR y el reducido contenido de cemento que los mismos presentan (por efecto de la alta relación c:a).

Densidad

En cuanto a la densidad de estado fresco, se ha reportado que esta disminuye en los MCR respecto al MN, siendo más evidente cuando se incrementa el contenido de ACR; Jiménez et al. (2013) [74] y Kumavat & Sonawane (2013) [86] realizaron estudios con resultados afines, el primero realizó reemplazos de 5, 10, 20, y 40% mientras que el segundo realiza un estudio más exhaustivo (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 y 40% de reemplazo). Los resultados obtenidos indican que contenidos de hasta un 20% de CA, reducirán la densidad del orden de un 3%; y dosificaciones del 40% pueden llegar a reducir la densidad hasta valores cercanos al 5%. Coincidiendo con la tendencia anterior, J Silva et al., 2010 [87] en su estudio reemplazaron el 20, 50, y 100% de ACR, y obtuvieron pérdidas del 5, 9, y 15% respectivamente; en este caso, la densidad del MCR con 20% de ACR, tuvo una reducción de casi el doble a los mencionados previamente. En cuando al tamaño de partículas, Silva et al., 2009 [84], reemplazaron el 5 y 10% de ACR con tamaño de partícula de entre 0.063 - 0.150 mm, y ocasionaron reducciones del 2 y 4% respecto al MN; la baja densidad es más evidente que en los estudios mencionados anteriormente, debido a la finura del ACR. En investigación realizada por Silva et al., 2008 [85] se tomó como variable la relación c:a, llevando a cabo la comparación entre MCR con 10% de ACR y relación c:a = 1:5 y 1:6, con respecto al MN con c:a = 1:4 sin ACR. Los resultados obtenidos a partir de las diferentes relación c:a, fue que las de mayor valor (con contenido de AVR) reportaron reducciones de densidad del 3 y 4% respectivamente, cuando se compararon con el MN con relación c:a más baja. En todos estos estudios mencionados, el comportamiento de reducción de la densidad fue atribuida a la baja densidad propia de los ACR, los cuales influyeron en la densidad de cada una de las mezclas.

Contenido de aire

Sobre la obtención del contenido de aire, solo una referencia de investigaciones previas se ha encontrado; Jiménez et al., 2013 [74], estudió MCR que incluían el 5, 10, 20 y 40% de ACR. Los resultados (en porcentaje) que se obtuvieron fueron similares, con valores entre 14.2 y 14.9%, mientras que el del MN fue de 14.7%; para este estudio, tales valores fueron aceptados como correctos, por estar dentro del rango recomendado por la Norma Británica BS 4721 (entre 7 – 18%). El contenido de aire en la mezclas mejora la resistencia a la congelación-descongelación, ya que se forman un gran número de burbujas

uniformemente dispersas que actúan como cámaras de expansión, que permiten que el agua congelada se expanda sin alterar la matriz de mortero; por otro lado, un contenido excesivo de aire da lugar a la reducción de las propiedades mecánica (resistencia a la compresión y a la flexión).

Estado endurecido

En el presente apartado se reportan los diversos resultados obtenidos en el estudio de las propiedades de los MCR en su estado endurecido. El siguiente listado abarca las propiedades físicas, mecánicas estáticas, de deformación y de estructura de la matriz del material que permiten tener una visión global del mismo. El compendio presentado es el resumen de estas propiedades, y de su comprensión y correlación entre ellas.

Densidad

La densidad de los MCR en estado endurecido presenta el mismo comportamiento que presentan en estado fresco; según estudios que se han realizado, la densidad de los MCR es inferior a la del MN, observándose una tendencia a disminuir, cuando mayor es el porcentaje de sustitución de ACR por AN. Jiménez et al., 2013 [74] y Kumavat & Sonawane, 2013 [86] han reportado que contenidos del 10% de ACR, ocasionan MCR menos densos, en los cuales la densidad es aún más baja cuando se sustituyen cantidades superiores; J. Silva et al., 2010 [73] por su parte, reportó reducciones de hasta el 17% cuando utilizaron 100% de ACR. El comportamiento de reducción en la densidad obtenida en los estudios mencionados, fue atribuido a la propia baja densidad de los ACR comparada con la del AN, y que influye en la matriz de los MCR. En estudio realizado por Silva et al., 2008 [85], realizaron MCR con diferente relación c:a (1:5 y 1:6) y contenidos del 10% de ACR, para ser comparados con el MN con c:a más bajo (1:4) (sin ACR), obteniendo que ambos MCR con mayor relación c:a, presentaron menor densidad que el MN con diferencias del 3 y 4% respectivamente; dicho comportamiento fue atribuido a la mayor cantidad de áridos (tanto AN como ACR) que contienen las mezclas con relación c:a mayores, que dan como resultado un mortero de menor calidad (menor cantidad de cemento), y por ende menor densidad ocasionada en el caso de uso de ACR. Caso contrario a lo anterior reportan Silva et al., 2009 [84] y Jiménez et al., 2013 [74], demostrando que con sustituciones del 5%, e incluso el 10%, se pueden obtener MCR con igual o menor densidad que el MN; esto ocasionado por la posible reducción de vacíos de aire que contienen los morteros, los cuales fueron ocupados por las partículas finas del ACR.

Absorción por capilaridad

Resultados previos sobre esta propiedad, señalan que la absorción por capilaridad de los MCR disminuye cuando se sustituyen cantidades bajas de ACR (0 a 20%) [85][84][74]; e incluso hasta el 50% [73]. La explicación que se da al respecto, es que la existencia de menos vacíos internos dentro de los MCR ocasionada por la adición de finos de ACR, proporciona vasos capilares más delgados, así como menor flujo de agua dentro del mismo [84]. Estudio realizado por Silva et al., 2008 [85] que tuvo como variable la relación c:a, reportó que MCR con 10% de ACR y relación c:a = 1:5, presentó menor absorción capilar que el MN con relación c:a = 1:4 sin ACR (de referencia). Este comportamiento se logró por la cantidad de finos añadida al mortero con mayor relación c:a, la cual fue superior a la cantidad de cemento eliminada (por efecto de aumento de relación c:a); por tanto, la compacidad del mortero aumentó debido a la disminución de poros capilares, causando menor flujo de agua a través de ellos. Cuando la relación c:a fue mayor (1:6) en un MCR con 10% de ACR, la capacidad de absorción también fue baja con respecto al MN (9%), pero mayor que la obtenida por MCR con relación c:a = 1:5; este comportamiento de aumento se atribuyó a la reducción de cemento causado por la mayor relación c:a, y a que se mantuvo el mismo porcentaje de finos de ACR (10%). Comportamiento contrario se presentó cuando se realizaron reemplazos mayores de ACR; según Jiménez et al., 2013 [74] el aumento de la capilaridad se llevó a cabo en MCR con sustituciones por arriba del 20%, debido a la mayor absorción de los ACR y que la mayoría de las mismas llenaban los huecos de la matriz. Este comportamiento fue explicado en otro estudio, sin embargo teniendo como porcentaje mínimo del 70%; tal efecto concluye que para sustituciones menores, se obtiene un rendimiento más positivo (menor absorción), comparados con el mortero de referencia [73]. Coincidiendo con esta tendencia, Corinaldesi, 2012 [32] que estudió dos tipos de morteros con reemplazo del 100% de ACR (caracterizado por presentar diferente tamaño de partículas: finos y gruesos), reportó que dichos morteros presentaron mayor absorción por capilaridad al compararse con el MN de referencia; siendo más

evidente en el mortero con partículas finas. Lo anterior fue atribuido por la influencia de la mayor porosidad de los MCR, así como el mayor contenido de microporos ($<0.1 \mu\text{m}$) respecto al MN, los que facilitan la capilaridad del agua; en particular el mortero con partículas finas, al contener mayor cantidad de poros pequeños, mayor es el nivel alcanzado por el aumento del agua.

Permeabilidad al vapor de agua

Se ha mencionado que una de las características favorables que debe tener un mortero de alta durabilidad, es la de presentar una alta permeabilidad al vapor, y que al mismo tiempo muestre comportamiento contrario a la permeabilidad al agua y absorción por capilaridad [88]. Resultados de estudio realizado por Silva et al., 2008 [85], muestran que un MCR con reemplazo del 10% de ACR y relación c:a = 1:6, permite una mayor permeabilidad al vapor que el mortero de referencia con relación c:a = 1:4 (sin ACR); esto debido a la reducción de cemento por efecto de la relación c:a y la incorporación de partículas finas de ACR. Dicho comportamiento fue considerado positivo, ya que permite un secado más eficaz del agua que se encuentra en los poros, logrando favorecer la eliminación del vapor de agua que procede del interior de los edificios. Similar comportamiento presentó el mismo autor en otro trabajo, en el cual la permeabilidad al vapor de agua de los MCR con 50% de ACR fue significativamente superior (57%) a la del mortero de referencia [73].

Estudio llevado a cabo por Jiménez et al., 2013 [74], también presentó incremento de permeabilidad al vapor (del 2%) cuando se utilizó el reemplazo de 5% de ACR; sin embargo, para reemplazos superiores (10, 20 y 40%), la permeabilidad disminuyó del 30 a 41% respecto al mortero de referencia. Tal efecto se atribuyó a la posible cantidad superior de finos, los cuales obstruían el flujo de vapor de agua dentro de la matriz del mortero; y que para el caso del MN y el MCR con 5% de ACR, pudieron presentar mayor cantidad y tamaño de poros. En cuanto a los MCR con reemplazos totales, se ha reportado mayor resistencia a la permeabilidad al vapor (menor permeabilidad); Corinaldesi, 2012 [32], quien en su estudio utilizó dos diferentes tamaños de partículas de ACR (finos y gruesos), observó que ambos morteros presentaron mayor resistencia a la permeabilidad al vapor que el MN, siendo el MCR con partículas finas el que presentó el mayor valor (17% respecto al MN). Este comportamiento fue atribuido a la posible acción de las partículas finas, que al ser mayor, dificultan el flujo de vapor a través de la mezcla. Por último Silva et al., 2009 [84] realizaron MCR con 10% de ACR como sustituto del AN, los resultados obtenidos muestran menor permeabilidad al vapor que el MN, haciendo atribución a la incorporación de finos en el mortero; sin embargo, el presentar una diferencia poco significativa (aproximadamente 9%) se consideró con permeabilidad suficiente para determinado tipo de aplicaciones.

Resistencia a la compresión

Los resultados de investigaciones previas, presentan diferentes comportamientos de la resistencia a la compresión de los MCR cuando se comparan respecto al MN, siendo el porcentaje de ACR utilizado en los mismos, un factor determinante más común. MCR con sustituciones entre 5 y 50% de ACR, han alcanzado resistencias similares o superior a la del MN, con incrementos del 2 al 14%, con excepción de Silva et al. 2009 [84] que alcanzó incrementos de hasta el 78% (valores neto entre 8 y 14 MPa); sin embargo, estudios realizados por Jiménez et al., 2013 [74], Silva et al., 2009 [84], Bektas et al., 2009 [68], Kumavat & Sonawane, 2013 [86] y J. Silva et al., 2010 [73], difieren en el porcentaje máximo de sustitución, ya que las máximas resistencias a compresión las alcanzaron con reemplazos del 5%, 10%, 20% y 50%, respectivamente. Las mejoras en la resistencia a compresión de los morteros, han sido atribuidas a la menor relación agua/cemento (a/c) (respecto al MN), y a la posible reactividad puzolánica que pueden presentar los ACR en su fracción fina, ocasionando un efecto de relleno en la matriz [84]; también, factores físicos como la adsorción, forma y rugosidad de los áridos, así como de otras posibles reacciones químicas (permitiendo formar nuevos productos cristalinos), pueden contribuir al aumento de la resistencia [73].

En estudio realizado por Silva et al., 2008 [85] se estudiaron tres diferentes relación c:a (1:4, 1:5 y 1:6), de la cuales la dos mayores corresponden a MCR con 10% de ACR, mientras que la más baja es del MN sin ACR. Los resultados obtenidos mostraron que MCR con relación c:a = 1:5 presentó mayor resistencia a la compresión (6%) que el MN, atribuyendo tal comportamiento a la cantidad de finos del ACR (mayor a la cantidad de cemento que fue reducido) que pudo aumentar la compacidad del mortero; el ACR de este

estudio, contenía mayor cantidad de partículas más finas que las del AN, y con similar densidad al cemento (diferencia del 2%). En los MCR con relación c:a = 1:6, la resistencia se redujo en un 28% comparado con el MN; sin embargo, se consideró aceptable para las aplicaciones requeridas, ya que presentó menor coeficiente de capilaridad, además de beneficios en términos de durabilidad (el uso de áridos reciclados, y al mismo tiempo la reducción de cemento). En estudio realizado por Higashiyama et al., 2013 [89], la variable de estudio fue la relación a/c de los MCR, que consistieron en 0.4, 0.5 y 0.6. Los resultados mostraron que la resistencia a la compresión disminuyó linealmente con la relación a/c, con valores similares tanto para los MCR como para el MN; sin embargo para la mayor relación a/c, el MCR presentó mayor resistencia a la compresión que el MN. El comportamiento de la resistencia a la compresión fue atribuido al posible efecto de la distribución de tamaño de partícula del ACR, por ser caracterizada como gruesa con respecto al AN (módulo de finura de 3.20 en comparación con 2.39); así mismo por la ausencia de reacción puzolánica de la misma.

Por otra parte, diferentes estudios han obtenido pérdidas de resistencia en MCR con 100% de ACR; las disminuciones van desde el 14% [73] hasta valores de 41 y 57% [21][32]. Las altas pérdidas de resistencia fueron atribuidas al menor peso específico y la alta absorción al agua que presentan los ACR utilizados (comparados con el AN), así como la influencia del tipo de sistema de triturado (molino de bolas o trituradora de mandíbulas) que ocasiona diferentes distribuciones de partículas. En el trabajo presentado por Corinaldesi, 2012 [32] se reportan las mayores pérdidas de resistencia (57%), debido a la alta capacidad de absorción y al mayor porcentaje de partículas de ACR que pasan el tamiz de 150 μm (polvo), como resultado del proceso de triturado de molino de bolas; mientras que el uso de trituradora de mandíbulas proporcionó granulometría similar al AN, por lo que las pérdidas del MCR con respecto al MN fueron del 42%. Caso particular contrario a la reducción de la resistencia en MCR con 100% de ACR presentó Higashiyama et al. 2012 [81], quien obtuvo un incremento del 14% respecto al MN; en este último estudio no se esclarece dicho comportamiento, sin embargo la alta relación a/c = 1/2, podría haber intervenido en una mayor densificación de la pasta del mortero.

Otro tipo de MCR que se han estudiado, fueron los elaborados con 100% de ACR como reemplazo del AN, mas la adición de diferentes porcentajes de ACR (10, 20 y 30%) en forma de polvo (tamaño de partícula de 0.075 mm) como reemplazo de cemento. Los resultados obtenidos en este estudio, indicaron que los MCR con 100% de AVR, así como los que contenían la adición de 10 y 20% de polvo, presentaron mayor resistencia que el MN (100% de AN); sin embargo el comportamiento observado debido al uso de polvo de vidrio, fue de reducción de resistencia gradual con el aumento de sustitución, siendo más prominente para contenidos de 30% de polvo, en los cuales la resistencia disminuyó un 37% con respecto al MN. Estos resultados fueron atribuidos a la posible reacción puzolánica del polvo del ACR, en este caso con origen de aisladores eléctricos de cerámica; sin embargo, no fue esclarecido con exactitud las implicaciones en este estudio. En este estudio también se fabricaron morteros con 10, 20 y 30% de ACR fino como adición extra en los MCR con 100% de ACR y 100% de cemento usual; en estos, se observó que las resistencias de los mismos aumentaron (5, 7 y 15% respectivamente), conforme el incremento del porcentaje de ACR en polvo.

Resistencia a la flexión

En cuanto al comportamiento a flexión de los MCR de estudios previos, se encontró que para sustituciones de hasta el 50% de AN por ACR, los MCR reportaron aumentos de resistencia cuando fueron comparados con los MN; en el caso de Jiménez et al. [74], se alcanzó la mayor resistencia a los 28 días (8% más que el MN), cuando se reemplazó el 40% de ACR. Por otra parte Silva et al. [87] obtuvieron similar resultado, pero para reemplazos bajos de ACR (20%) obtuvo la mayor resistencia (13% más que el MN); sin embargo para reemplazo total, obtuvo pérdidas del 6%, coincidiendo con otras dos investigaciones las cuales presentaron pérdidas mayores de entre 17 y 58% [20][32]. Los incrementos de resistencia antes indicados se atribuyeron a la posible reactividad puzolánica de los ACR, así como a efectos físicos tales como el incremento de la porosidad y angulosidad de éstos (conferidos por la trituración), los cuales provocan el llamado “efecto clavado” de la pasta de cemento en ellos; y el cual, contribuyen al aumento de la resistencia. También, en uno de los casos de estudio, los incrementos se presentaron hasta los 28 días y solo de forma ligera a edades mayores, siendo el método de dosificación por volumen el causante de tal efecto [74]. En

cuanto el comportamiento con el uso del 100%, se debe entender por el hecho de que para altos contenidos de ACR el efecto favorecedor puzolánico no predomina en el comportamiento de la matriz cementante, siendo el bajo peso específico, la alta absorción y su porosidad los que terminan estableciéndose como “el eslabón débil” del conjunto [20][32].

Módulo de elasticidad

Sobre el comportamiento del módulo de elasticidad en los MCR poco se ha reportado en investigaciones previas; de las que se encuentran, se reporta que la sustitución de ACR por AN ocasiona pérdidas en los MCR con respecto a los MN. En estudio realizado por Silva et al., 2008 [85], MCR con reemplazos del 10% y con relación c:a = 1:6 presentó menor módulo de elasticidad que el MN con relación c:a = 1:4 sin ACR, indicando como conclusión más relevante que el efecto de la c:a a edades prolongadas (2 y 5 meses), llega a ser similar (18 y 17% de pérdidas respectivamente); lo anterior se atribuyó a la formación de fisuras, explicando que un menor módulo de elasticidad admite tensiones internas más bajas para deformaciones idénticas. Otro trabajo del mismo autor reportó la misma tendencia en MCR con reemplazos del 50% de ACR, con respecto al MN (ambos con relación c:a = 1:4); sin embargo las pérdidas fueron mayores, alcanzando reducciones del 41% (a los 2 y 5 meses). En dicho estudio, sugieren el uso de estos morteros para aplicaciones de enlucido, siendo la reducción del módulo de elasticidad una característica favorable que permite un mejor acomodo de los esfuerzos, reduciendo la tendencia al agrietamiento [87].

Por otra parte, estudio realizado por Higashiyama et al., 2012 [81], sustituyeron el total de los AN, además de diferentes porcentajes del cemento por ACR (10, 20 y 30%) en forma de polvo (0.075 mm). Los resultados muestran que el uso de 100% de ACR ocasiona mayor módulo de elasticidad en los MCR con respecto al MN (14%) y cuando además se incluye polvo de ACR como sustituto de cemento, el módulo aumenta, aunque en porcentajes bajos (2 y 5% para 10 y 20% respectivamente). Para el caso de MCR con 30% de ACR como reemplazo cemento, el módulo se reduce un 6% con respecto al MCR sin polvo de cemento (ACR solo como reemplazo de los áridos); sin embargo es mayor con respecto al MN (7%). En este estudio, los incrementos del módulo de elasticidad se atribuyeron al alto módulo de elasticidad propio del ACR con origen en residuos cerámicos de aisladores eléctricos, que es considerablemente más alto que el del AN en ese estudio; sin embargo el comportamiento presentado por MCR con contenidos de 30% de polvo de ACR, no fue esclarecido por completo.

Resistencia a la adherencia

Estudios que han determinado la resistencia a la adherencia de los MCR, por medio del ensayo que consiste en la extracción del mortero aplicado en la cara de un ladrillo (previamente curado durante 28 días), reportan valores superiores a los presentados por el MN, cuando se sustituye el AN por ACR en porcentajes igual o mayor al 10%; como es el caso de Silva et al., 2009 [84], que reportó incrementos en los MCR del alrededor del 30% respecto al MN. En otro trabajo del mismo autor, donde se obtuvo la resistencia a la adherencia a un MCR con 10% de ACR y relación c:a = 1:6, y se comparó con un MN de referencia sin ACR y relación c:a = 1:4, se reportó que la resistencia fue mayor en el mortero con mayor c:a, concluyendo que aun cuando este contiene menos cemento que el MN, no afecta la buena adherencia que proporciona el comportamiento reológico del ACR en forma de polvo [84]. MCR con contenidos del 50% de ACR, también presentaron mayor adherencia que el mortero de referencia (14%) [73]. Estas mejoras de incremento en la adherencia de los MCR, fueron atribuidas a la posible combinación de efecto puzolánico y efecto de relleno, ocasionados por las partículas finas de ACR. Trabajo de otro autor, presenta similar comportamiento a los previos, explicando que MCR con hasta 40% de ACR en volumen, no afectó los valores de adherencia [74].

Porosidad

La porosidad es una propiedad que influye de forma considerable en las propiedades mecánicas y de durabilidad de los MCR. En estudio llevado a cabo por Corinaldesi, 2012 [32], se estudiaron dos tipos de morteros con 100% de ACR (ACR con diferentes distribución de tamaño de partícula, ocasionada por diferentes procesos de triturado), evaluando su porosidad total abierta, así como su división en microporos (<0.1 μm), mesoporos (0.1-1 μm) y macroporos (> 1 μm). Los resultados obtenidos reportaron que los MCR con partículas más finas, mostró mayor contenido total de poros (38% respecto al MN y 5% más que el CRM con partículas de ACR gruesas). Analizando los resultados por tamaños de poros, se indicó que la

cantidad de macroporos de los MCR con partículas gruesas y finas disminuye respecto al MN (13 y 63%); sin embargo la cantidad de mesoporos y microporos aumentaron (8 y 15%; 72 y 100%, respectivamente), siendo más notable el aumento en los microporos y los presentados por el MCR con partículas finas de ACR en todos los casos, el cual el 36% de material pasó a través del tamiz de 0.150, mientras que del árido grueso fue prácticamente el 0%. Lo anterior fue atribuido a la propia alta porosidad que presentan los ACR, ya que el tipo de árido usado influye en la microestructura del mortero, haciéndola más porosa cuando se muelen finamente. Caso contrario presentaron Higashiyama et al., 2012 [81], que reportaron que los MCR con 100% de ACR proveniente de residuos de cerámicos aislantes eléctricos, presentaron menor volumen de poro que el MN de referencia (30%), según un histograma donde el diámetro de poro varía de 0.05 a 2.0 μm . Este comportamiento fue relacionado con el aumento de la resistencia a compresión obtenida en ese estudio, así como durabilidad superior con base a la penetración de iones cloruro, y a la absorción de agua y permeabilidad del vapor.

Durabilidad

A continuación se describen los resultados reportados por algunos investigadores, los cuales han enfocado sus estudios a propiedades que influyen o afectan el comportamiento de la durabilidad de los morteros que contienen ACR.

Retracción por secado

Estudios previos que han realizado ensayos de retracción en los MCR, en su mayoría han reportado incrementos con respecto al MN. En el estudio de J. Silva et al., 2010 [73] evaluaron sustituciones del 20, 50 y 100% de AN por ACR y obtuvieron que a mayor cantidad de ACR mayor retracción era producida; a los 80 días las diferencias reportadas fueron de 33, 38 y 43% respectivamente respecto al MN. En investigaciones paralelas del mismo autor llevadas a cabo para reemplazos de cantidades bajas, reportaron que para reemplazos del 10%, la retracción aumentó el 14% [84]. En caso similar (MCR con 10% de ACR) pero con relación c:a = 1:6 (estudio previo c:a = 1:4), se encontró que dichos MCR presentan mayor retracción (5%) con respecto a un MN con relación c:a = 1:4 y sin ACR; sin embargo la diferencia de retracción de este último estudio fue considerada como aceptable [85]. El comportamiento de estos casos fue atribuido al posible inconveniente de utilizar polvo de ladrillo de arcilla roja (con mayor cantidad de partículas de 0.063 mm), los cuales se caracterizan por tener mayor porosidad y mayor coeficiente de absorción debida a su proceso de producción [73] que dan como resultado un árido de menor calidad [29].

Similar comportamiento presentaron Bektas et al., 2009 [68] para los MCR con 10% de ACR, que a los 56 días presentaron una mayor redacción que el MN (11%); sin embargo, con sustitución del 20%, la retracción disminuyó un 10% con respecto al MN a la misma edad de medida. La conducta de menor retracción fue atribuida al hecho de que las partículas de ladrillo utilizadas en dicho estudio actúan como agente de autocurado, logrando mantener dentro de sus poros el agua de mezcla absorbida inicialmente, reteniendo por periodos más largos y liberando lentamente a medida que envejece. En otro estudio donde se sustituyó el 5, 10, 20 y 40% de ACR por AN, se reportó que el uso de aditivos en los diferentes morteros permitió mantener los valores medios de retracción incluso para el reemplazo mayor, pero que en general, reemplazos arriba del 10% ocasionaban mayor retracción respecto al MN; para reemplazos del 5%, la retracción disminuyó un 5% [74].

Ataque del ion cloruro

En lo que respecta a la penetración de iones cloruro en los MCR, Higashiyama et al., 2012 [81] reportó que el MCR con 100% de ACR, presentó considerablemente menor profundidad que la observada en el MN; con diferencias de 41 y 59% para las edades de 3 y 6 meses, respectivamente. Por lo anterior se pudo concluir que la resistencia a la penetración de los MCR es mayor, y por tanto presentan una mayor durabilidad en cuanto a la entrada de iones cloruro. Esto se pudo corroborar con el volumen de poros acumulativo inferior que presentaron los ACR, y que intervienen favorablemente en la resistencia a la profundidad de penetración del ion cloruro.

Reacción álcali-sílice (ASR)

Según normativa (ASTM C1260), un árido es potencialmente alcalino si la expansión que presenta supera el 0.20% a los 14 días. El ensayo para conocer la reactividad alcalina potencial de los áridos ha sido realizado por Bektas et al., 2009 [68]. Los resultados de su estudio demostraron que los MCR con 10 y 20% de ACR que fueron estudiados, presentaron una expansión perjudicial con valores del 0.30 y 0.35% respectivamente, lo que produjo agrietamientos visibles en las barras de mortero; mientras que el mortero de referencia no presentó reactividad alguna. La actividad ASR de los MCR no fue sorprendente para los autores, debido a que el ACR utilizado fue ladrillo de arcilla que se produce a partir de tierra silíceo, por lo que fue normal que el producto final fuera silíceo.

Ciclos de congelación-descongelación

Estudio realizado por Bektas et al., 2009 [68] que han llevado a cabo esta prueba en MCR con 10 y 20% de ACR, expusieron las barras de mortero a 180 ciclos de congelación-descongelación, encontrando que los MCR demostraron mejor rendimiento que el MN. El MCR con 20% de ACR mostró una expansión promedio de 0.05%, mientras que el mortero de control fue 0.53%; señalando que una de las barras de control se rompió cuando llevaba alrededor de 120 ciclos, debido a las grietas que se formaron en ella. También, hacen mención a que una estructura de vacíos de aire estrechamente distribuida en una matriz, proporciona espacios para que se lleven a cabo mecanismos expansivos, y dado que el ACR es altamente poroso, esto puede beneficiar en la reducción de la expansión ocasionada por los ciclos de congelación-descongelación. Por otra parte, en otro estudio en el cual se reemplazó el 10, 15 y 20% de ACR por AN, reportó que los resultados obtenidos de resistencia hielo-deshielo de los MCR, no presentaron influencias en la resistencia a compresión hasta 25 ciclos, ya que los morteros estudiados presentaron comportamiento similar; sin embargo la resistencia a flexión fue afectada a medida que aumentó el porcentaje de reemplazo. Aumentos de masa ocasionados por los ciclos de congelación-descongelación que oscilaron entre 0.61 y 0.82% fueron reportados en este estudio [82].

Referencias

- [1] A. Behrens, S. Giljum, J. Kovanda, and S. Niza, "The material basis of the global economy. Worldwide patterns of natural resource extraction and their implications for sustainable resource use policies," *Ecol. Econ.*, vol. 64, no. 2, pp. 444–453, 2007.
- [2] P. R. Lopes Lima and M. Batista Leite, "Influence of CDW Recycled Aggregate on Drying Shrinkage of Mortar," *Open J. Civ. Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 53–57, 2012.
- [3] C. Neno, J. De Brito, and R. Veiga, "Using Fine Recycled Concrete Aggregate for Mortar Production," *Mater. Res.*, vol. 17, no. 1, pp. 168–177, 2014.
- [4] M. Braga, J. De Brito, and R. Veiga, "Incorporation of fine concrete aggregates in mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 36, pp. 960–968, 2012.
- [5] Ministerio de Medio Ambiente, *ANEXO 6. II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2008-2015 (II PNRCD)*. 2007, p. 441.
- [6] Ministerio de la Presidencia, *REAL DECRETO 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición*. España, 2008, pp. 7724–7730.
- [7] S.-T. Lee, "Influence of recycled fine aggregates on the resistance of mortars to magnesium sulfate attack," *Waste Manag.*, vol. 29, no. 8, pp. 2385–2391, 2009.
- [8] Á. M. Hincapié Henao and E. A. Aguja López, "Agregado reciclado para morteros," *Rev. Univ. EAFIT*, vol. 39, no. 132, pp. 76–89, 2003.
- [9] A. Sales and F. Rodrigues de Souza, "Concretes and mortars recycled with water treatment sludge and construction and demolition rubble," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 6, pp. 2362–2370, 2009.
- [10] P. Saiz-Martínez, M. Gonz-Cortina, and F. Fernández-Martínez, "Characterization and influence of fine recycled aggregates on masonry mortars properties," *Mater. Construcción*, vol. 65, no. 319, pp. 1–10, 2015.
- [11] M. Echevarría Caballero, C. M. Sanabria Zapata, and J. L. Parra y Alfaro, "Fabricación de morteros con árido reciclado," *Ingeopres Actual. técnica Ing. civil, minería, Geol. y medio Ambient.*, no. 141, pp. 26–28, 2005.
- [12] J. L. Parra y Alfaro, B. Astudillo Matilla, R. Carretón Moreno, J. Castilla Gómez, C. M. Sanabria Zapata, and E. Antuña Bernardo, "Áridos reciclados para hormigones y morteros," *Boletín Geológico y Min.*, vol. 117, no. 4, pp. 763–772, 2006.
- [13] J. L. Cabrera Álvarez, F. Urrutia, D. Lecusay, and A. Fernández, "Morteros de albañilería con escombros de demolición," *Mater. Construcción*, vol. 47, no. 246, pp. 43–48, 1997.
- [14] S.-T. Lee, R. N. Swamy, S. Kim, and Y. Park, "Durability of Mortars Made with Recycled Fine Aggregates Exposed to Sulfate Solutions," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 20, no. 1, pp. 63–70, 2008.
- [15] I. Martínez, M. Etxebarria, E. Pavón, and N. Díaz, "A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 49, pp. 384–392, 2013.
- [16] C.-C. Fan, R. Huang, H. Hwang, and S.-J. Chao, "The Effects of Different Fine Recycled Concrete Aggregates on the Properties of Mortar," *Materials (Basel)*, vol. 8, no. 5, pp. 2658–2672, 2015.

-
- [17] V. Corinaldesi, M. Giuggiolini, and G. Moriconi, "Use of rubble from building demolition demolition in mortars," *Waste Manag.*, vol. 22, no. 8, pp. 893–899, 2002.
- [18] H. Chen, T. Yen, and K. Chen, "Use of building rubbles as recycled aggregates," *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. May 2002, pp. 125–132, 2003.
- [19] Z. Shui, D. Xuan, H. Wan, and B. Cao, "Rehydration reactivity of recycled mortar from concrete waste experienced to thermal treatment," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 8, pp. 1723–1729, 2008.
- [20] V. Corinaldesi, "Mechanical behavior of masonry assemblages manufactured with recycled-aggregate mortars," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, no. 7, pp. 505–510, Aug. 2009.
- [21] V. Corinaldesi and G. Moriconi, "Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 1, pp. 289–294, 2009.
- [22] I. Vegas, I. Azkarate, A. Jurrero, and M. Frías, "Diseño y prestaciones de morteros de albañilería elaborados con áridos reciclados procedentes de escombros de hormigón," *Mater. Construcción*, vol. 59, no. 295, pp. 5–18, 2009.
- [23] G. Moriconi, V. Corinaldesi, and R. Antonucci, "Environmentally-friendly mortars: a way to improve bond between mortar and brick," *Mater. Struct.*, vol. 36, no. 10, pp. 702–708, 2003.
- [24] J. I. Tertre, "Gestión de residuos de construcción y demoliciones. Áridos reciclados," *Inf. la construcción*, vol. 59, no. 505, pp. 81–87, 2007.
- [25] M. Bustillo Revuelta, "Los recursos minerales y los materiales de construcción," *Enseñanza las Ciencias la Tierra*, vol. 16, no. 3, pp. 248–255, 2008.
- [26] E. Dapena, P. Alaejos, A. Lobet, and D. Pérez, "Effect of Recycled Sand Content on Characteristics of Mortars and Concretes," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 23, no. 4, pp. 414–422, 2011.
- [27] Dirección General De Calidad y Medio Ambiente, "Plan Regional de Residuos de Construcción y Demolición (2006-2016)," *Comunidad de Madrid*, pp. 243–299, 2006.
- [28] Ministerio de la Presidencia, *REAL DECRETO 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE-08)*. Las. España, 2008, pp. 35176–35178.
- [29] T. Fumoto and M. Yamada, "Influence of Quality of Recycled Fine Aggregate on Properties of Mortar," *Mem. Fac. Osaka City Univ.*, vol. 40, pp. 81–84, 1999.
- [30] J. de Brito and N. Saikia, *Recycled Aggregate in Concrete Use of Industrial, Construction and Demolition Waste*. 2013.
- [31] H. A. U. Mesbah, "Efficiency of polypropylene and metallic fibres on control of shrinkage and cracking of recycled aggregate mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 13, pp. 439–447, 1999.
- [32] V. Corinaldesi, "Environmentally-friendly bedding mortars for repair of historical buildings," *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, pp. 778–784, 2012.
- [33] P. Saiz Martínez, M. González Cortina, F. Fernández Martínez, and A. Rodríguez Sánchez, "Comparative study of three types of fine recycled aggregates from construction and demolition waste (cdw), and their use in masonry mortar fabrication," *J. Clean. Prod.*, vol. 118, pp. 162–169, 2016.
- [34] L. F. R. Miranda and S. M. S. Selmo, "CDW recycled aggregate renderings: Part I – Analysis of the effect of materials finer than 75µm on mortar properties," *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, no. 9, pp. 615–624, 2006.

- [35] L. F. R. Miranda and S. M. S. Selmo, "CDW recycled aggregate renderings: Part II – Analysis of the effect of materials finer than 75 μ m under accelerated aging performance," *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, no. 9, pp. 625–633, Nov. 2006.
- [36] I. B. Topçu, A. R. Boğa, and T. Bilir, "Alkali-silica reactions of mortars produced by using waste glass as fine aggregate and admixtures such as fly ash and Li₂CO₃," *Waste Manag.*, vol. 28, no. 5, pp. 878–84, 2008.
- [37] Ö. Özkan and İ. Yüksel, "Studies on mortars containing waste bottle glass and industrial by-products," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 6, pp. 1288–1298, Jun. 2008.
- [38] R. Idir, M. Cyr, and A. Tagnit-Hamou, "Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 7, pp. 1309–1312, 2010.
- [39] S.-B. Park and B.-C. Lee, "Studies on expansion properties in mortar containing waste glass and fibers," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 7, pp. 1145–1152, 2004.
- [40] T.-C. Ling, C.-S. Poon, and S.-C. Kou, "Feasibility of using recycled glass in architectural cement mortars," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 8, pp. 848–854, 2011.
- [41] T.-C. Ling and C.-S. Poon, "Properties of architectural mortar prepared with recycled glass with different particle sizes," *Mater. Des.*, vol. 32, no. 5, pp. 2675–2684, 2011.
- [42] L. A. Pereira-de-Oliveira, J. P. Castro-Gomes, and P. M. S. Santos, "The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components," *Constr. Build. Mater.*, vol. 31, pp. 197–203, 2012.
- [43] T.-C. Ling and C.-S. Poon, "Utilization of recycled glass derived from cathode ray tube glass as fine aggregate in cement mortar," *J. Hazard. Mater.*, vol. 192, no. 2, pp. 451–456, 2011.
- [44] T.-C. Ling, C.-S. Poon, W.-S. Lam, T.-P. Chan, and K. K.-L. Fung, "Utilization of recycled cathode ray tubes glass in cement mortar for X-ray radiation-shielding applications," *J. Hazard. Mater.*, vol. 199–200, pp. 321–327, 2012.
- [45] T.-C. Ling and C.-S. Poon, "A comparative study on the feasible use of recycled beverage and CRT funnel glass as fine aggregate in cement mortar," *J. Clean. Prod.*, vol. 29–30, pp. 46–52, 2012.
- [46] T.-C. Ling and C.-S. Poon, "Effects of particle size of treated CRT funnel glass on properties of cement mortar," *Mater. Struct.*, vol. 46, no. 1, pp. 25–34, 2012.
- [47] C. S. Poon and T. C. B. Ling, "Use of Recycled Glass in Architectural Mortars," *J. Wuhan Univ. Technol.*, vol. 32, no. 17, pp. 231–234, 2010.
- [48] A. Karamberi, E. Chaniotakis, D. Papageorgiou, and A. Moutsatsou, "Influence of glass cullet in cement pastes," *China Particuology*, vol. 4, no. 5, pp. 234–237, Oct. 2006.
- [49] C. Shi and K. Zheng, "A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 52, no. 2, pp. 234–247, 2007.
- [50] H. Du and K. H. Tan, "Use of waste glass as sand in mortar: Part II – Alkali-silica reaction and mitigation methods," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 35, no. 1, pp. 118–126, 2013.
- [51] V. Corinaldesi, A. Nardinocchi, and J. Donnini, "Reuse of recycled glass in mortar manufacturing," *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 8189, no. October, pp. 1–12, 2016.
- [52] A. Karamberi and A. Moutsatsou, "Participation of coloured glass cullet in cementitious materials," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 2, pp. 319–327, 2005.

-
- [53] V. Corinaldesi, G. Gnappi, G. Moriconi, and A. Montenero, "Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars," *Waste Manag.*, vol. 25, no. 2, pp. 197–201, 2005.
- [54] K. H. Tan and H. Du, "Use of waste glass as sand in mortar: Part I - Fresh, mechanical and durability properties," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 35, no. 1, pp. 109–117, 2013.
- [55] C.-H. Lee, C.-T. Chang, K.-S. Fan, and T.-C. Chang, "An overview of recycling and treatment of scrap computers," *J. Hazard. Mater.*, vol. 114, no. 1–3, pp. 93–100, 2004.
- [56] Y. Shao, T. Lefort, S. Moras, and D. Rodriguez, "Studies on concrete containing ground waste glass," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 1, pp. 91–100, 2000.
- [57] İ. B. Topçu and M. Canbaz, "Properties of concrete containing waste glass," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 2, pp. 267–274, 2004.
- [58] A. M. Matos and J. Sousa-Coutinho, "Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 36, pp. 205–215, 2012.
- [59] Z. Hui and W. Sun, "Study of properties of mortar containing cathode ray tubes (CRT) glass as replacement for river sand fine aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 10, pp. 4059–4064, 2011.
- [60] A. Khmiri, M. Chaabouni, and B. Samet, "Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 44, pp. 74–80, 2013.
- [61] R. Idir, M. Cyr, and A. Tagnit-Hamou, "Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 1, pp. 19–29, 2011.
- [62] C. Shi, Y. Wu, C. Riefler, and H. Wang, "Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 5, pp. 987–993, May 2005.
- [63] G. Lee, T.-C. Ling, Y.-L. Wong, and C.-S. Poon, "Effects of crushed glass cullet sizes, casting methods and pozzolanic materials on ASR of concrete blocks," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 5, pp. 2611–2618, May 2011.
- [64] Z. Hui, C. S. Poon, and T. C. Ling, "Properties of mortar prepared with recycled cathode ray tube funnel glass sand at different mineral admixture," *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 951–960, 2013.
- [65] P. Penacho, J. de Brito, and M. R. Veiga, "Physico-mechanical and performance characterization of mortars incorporating fine glass waste aggregate," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 50, pp. 47–59, 2014.
- [66] A. Juan, C. Medina, M. I. Guerra, J. M. Morán, P. J. Aguado, M. Isabel, I. Sánchez de Rojas, M. Frías, and O. Rodríguez, "Re-use of ceramic wastes in construction," in *Ceramic Materials*, W. Wunderlich, Ed. InTech, 2010, pp. 197–215.
- [67] Ministerio de Medio Ambiente, *Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos*. España, 2002, pp. 6494–6515.
- [68] F. Bektas, K. Wang, and H. Ceylan, "Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 5, pp. 1909–1914, 2009.
- [69] A. E. Lavat, M. A. Trezza, and M. Poggi, "Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture," *Waste Manag.*, vol. 29, no. 5, pp. 1666–74, May 2009.
- [70] R. M. Senthamarai and P. Devadas Manoharan, "Concrete with ceramic waste aggregate," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 9–10, pp. 910–913, 2005.

- [71] G. Wang and B. Tian, "Effect of Waste Ceramic Polishing Powder on the Properties of Cement Mortars," in *International Conference on Energy and Environment Technology, 2009. ICEET '09*, 2009, pp. 101–104.
- [72] Secretaría General de Medio Ambiente, *RESOLUCIÓN de 14 de junio 2001, de la Secretaría General de Medio Ambiente, por la que se dispone la publicación del Acuerdo de Consejo de Ministro, de 1 de junio de 2001, por el que se aprueba el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 200*. España, 2001, pp. 25305–25313.
- [73] J. Silva, J. de Brito, and R. Veiga, "Recycled Red-Clay Ceramic Construction and Demolition Waste for Mortars Production," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 22, no. 3, pp. 236–244, 2010.
- [74] J. R. Jiménez, J. Ayuso, M. López, J. M. Fernández, and J. de Brito, "Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing," *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 679–690, 2013.
- [75] F. Pacheco-Torgal and S. Jalali, "Reusing ceramic wastes in concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 5, pp. 832–838, 2010.
- [76] CEDEX, "Residuos de Construcción y Demolición," *FICHA TÉCNICA 4.1*, 2010. [Online]. Available: <http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/0AF8BEF6-2BE2-4456-AE0C-7181B3A2975B/119974/RESIDUOSDECONSTRUCCIONYDEMOLICION1.pdf>. [Accessed: 07-Nov-2015].
- [77] M. O'Farrell, S. Wild, and B. B. Sabir, "Resistance to chemical attack of ground brick \pm PC mortar Part II . Synthetic seawater," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, pp. 757–765, 2000.
- [78] L. V Amorim, H. L. Lira, and H. C. Ferreira, "Use of Residential Construction Waste and Residues from Red Ceramic Industry in Alternative Mortars," no. October, pp. 916–920, 2003.
- [79] R. D. Toledo Filho, J. P. Gonçalves, B. B. Americano, and E. M. R. Fairbairn, "Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil," *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 9, pp. 1357–1365, Sep. 2007.
- [80] J. P. Gonçalves, L. M. Tavares, R. D. Toledo Filho, and E. M. R. Fairbairn, "Performance evaluation of cement mortars modified with metakaolin or ground brick," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 5, pp. 1971–1979, May 2009.
- [81] H. Higashiyama, F. Yagishita, M. Sano, and O. Takahashi, "Compressive strength and resistance to chloride penetration of mortars using ceramic waste as fine aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 26, no. 1, pp. 96–101, Jan. 2012.
- [82] W. Jackiewicz-Rek, K. Załęgowski, A. Garbacz, and B. Bissonnette, "Properties of Cement Mortars Modified with Ceramic Waste Fillers," *Procedia Eng.*, vol. 108, pp. 681–687, 2015.
- [83] F. Puertas, I. García-Díaz, M. Palacios, and S. Martínez-Ramírez, "Empleo de residuos cerámicos como materia prima alternativa para la fabricación de clínker de cemento portland," *Cem. Hormigón*, vol. 907, pp. 20–34, 2007.
- [84] J. Silva, J. de Brito, and R. Veiga, "Incorporation of fine ceramics in mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 1, pp. 556–564, 2009.
- [85] J. Silva, J. Brito, and R. Veiga, "Fine ceramics replacing cement in mortars Partial replacement of cement with fine ceramics in rendering mortars," *Mater. Struct.*, vol. 41, no. 8, pp. 1333–1344, Nov. 2008.
- [86] H. R. Kumavat and Y. N. Sonawane, "Feasibility Study of Partial Replacement of Cement and Sand

-
- in Mortar by Brick Waste Material,” *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.*, vol. 2, no. 4, pp. 17–20, 2013.
- [87] J. Silva, J. De Brito, and R. Veiga, “Recycled Red-Clay Ceramic Construction and Demolition,” *J. Mater. Civ. Eng.*, no. March, pp. 236–244, 2010.
- [88] R. V. Silva, J. De Brito, and R. K. Dhir, “Performance of cementitious renderings and masonry mortars containing recycled aggregates from construction and demolition wastes,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 105, pp. 400–415, 2016.
- [89] H. Higashiyama, K. Yamauchi, M. Sappakittipakorn, M. Sano, and O. Takahashi, “A visual investigation on chloride ingress into ceramic waste aggregate mortars having different water to cement ratios,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 1021–1028, Mar. 2013.

CAPÍTULO 3

Implementation of Interaction Diagram of the Properties in Fresh for Mortars with Ceramic Aggregates

Francisca Guadalupe Cabrera-Covarrubias¹, José Manuel Gómez-Soberón^{2*}, Jorge Luis Almaral-Sánchez³, Ramón Corral-Higuera³, María Consolación Gómez-Soberón⁴

Received 27 June; accepted 09 November 2016

Abstract

As the natural resources needed for the construction sector are limited, new practices are being adopted for the management of waste generated nowadays, including the use of construction and demolition waste as aggregates for concrete and mortar. Considering the different typologies in construction wastes, ceramics are the second most representative material; therefore it is important to validate their feasibility as a total or partial replacement of natural aggregates. This work presents a study of the properties in fresh state (consistency, density and air content) of mortars containing aggregates obtained from recycled ceramics, and their influence on the subsequent properties in the hardened state. A statistical analysis of experimental data was carried out by establishing regression coefficients, and then a triple-entry graph was obtained, allowing the different properties of mortars to be easily linked and simplifying the prediction of the relationships they will present since the mixture design phase.

Keywords

ceramic recycled aggregates, recycled mortars, prediction of properties of mortars, sustainable materials, friendly construction

¹Department of Architectural Constructions II, Barcelona School of Civil Engineering (ETSECCPB), Polytechnic University of Catalonia,

Campus Diagonal Nord, Edifici C2. C. Jordi Girona, 1-3 08034 Barcelona,

²Department of Architectural Constructions II, Barcelona School of Building Construction (EPSEB), Polytechnic University of Catalonia,

Av. Doctor Marañón, 44-50. 08028 Barcelona, Spain

³Faculty of Engineering Mochis (FIM),

Autonomous University of Sinaloa, Fuente de Poseidón y Ángel Flores s/n, Col. Jiquilpan Módulo B2, Los Mochis Sinaloa, Mexico

⁴Department of materials,

Civil Engineering School,

Metropolitan Autonomous University,

Av. San Pablo No. 180. Col. Reynosa Tamaulipas. C.P. 02200. Delegación Azcapotzalco. Distrito Federal. México

* Corresponding author email: josemanuel.gomez@upc.edu

1 Introduction

Since the natural resources necessary for the construction sector, such as water, raw materials and energy, are limited [1] and it is estimated that their use will continue to increase, governments of various countries and industrial sectors are adopting new practices for better management of the different waste generated, even proposing the recovery of these resources [2] with a view to achieving more sustainable growth in both the economy and society [3]. A feasible alternative for achieving this goal is the recycling of waste and by-products [4] which can be reused as aggregate for mortar and concrete. This gives plausible results related to sustainability benefits, such as the conservation of natural resources and the reduction of transport costs, as well as lessening the environmental impact caused by irregular waste disposal methods [5]–[8]. Besides their possible use in different applications in the construction industry, they may also even improve some properties thereof [9].

In southern Europe the recycling of construction and demolition waste is a low-priority activity. In the case of Italy, for example, which generates 20 M tons per year mostly from masonry and reinforced concrete, just 10% is recycled; the remainder is diverted to landfill [10]. Among the different types of construction waste, those classified as ceramic are the second most representative material [11], accounting for 54% of waste from construction and demolition (C & DW) [12] and currently there is no applicable legislation for them. Likewise, recycled ceramic (so-called second generation) may originate in rejected materials from manufacturers of blocks, bricks, tiles, sanitary ware and electrical insulation. Regarding Spain, as a result of the increase in production (tile manufacture is over 600 million m² per year), these solid wastes have led to an increase of more than 50,000 tons per year [13]. Therefore, it is important to validate their use by incorporating as in either total or partial replacement of aggregate, or as cement in mortars or concretes [14] [15].

In order to establish the feasibility of using this waste, it is necessary to evaluate its properties, ensuring its possible application in competition with traditional materials. The physical properties in their fresh state have been selected as a

preliminary study of the application of these recycled ceramic mortars (CeRM), since they relate and guarantee the proper performance of subsequent hardened-state properties (mechanical and durability) [16].

Previous research into the consistency property of the CeRM indicates that this decreases when the percentage of replacement of the ceramic aggregates (CA) by usual aggregates (UA) increases [17], as more water is needed to make a mixture with suitable consistency [15]. This is explained by the high water absorption that the CA can have. With regard to the density, the CeRM presents a decrease of around 5% when replacing up to 40% of the CA by UA [11] [18]; reaching values of 10% when replacing 50%, and up to 17% for replacements of 100% (compared to the reference mortar). These losses of density (in all cases), were justified by the apparent density of the CA, which is lower than that of the UA [15]. Concerning the air content, a single reference to previous investigations was located; it indicates that for percentages of CA of 5, 10, 20 and 40%, similar values (between 14.3 and 15%) were obtained, which were accepted as being within the specified range of the regulations (British Standard BS 4721) [11].

Since in some cases these properties of the CeRM are not established for all possible CA percentages, and there are not enough references for this subject in previous studies, this research has focused on establishing a system of a triple-interaction diagram and regression equations to determine, in a simple manner, the analogies of relations between these properties, simplifying the prediction of the relations that the different CeRM will present from the mixture design phase. The obtained diagrams will reduce the time required for testing before the optimal desired behavior is obtained, as well as that for selecting the optimal dose for the specific characteristics of strength and durability to which the CeRM will be subjected. Thus, the fresh properties for a particular use are guaranteed as well as laying down the minimum principles for obtaining subsequent properties of hardened concrete.

The triple interaction diagram and equations of regression presented are the result of numerical and statistical analysis of the experimental data. Based on the previous, it is possible to establish the real experimental properties of the consistency, density and air content for the ratio of water/cement (w/c) and cement/sand (c/s) used with different replacement factors (RF) in the CeRM.

2 Materials

CA was used with particle size of 0 - 5 mm, composed of residues of ceramic tiles which had proven defective in their shape or size. This material was put through a No 4 sieve (4.75 mm), in order to separate the fine fraction to be used. UA was employed as the reference aggregate, composed of silica sand with a particle size of 0–4 mm.

Granulometric profiles of the two materials were adjusted to meet the limits indicated in the standard ASTM C144 [19]; both were separated by means of a No. 30 sieve (0.59 mm) thus obtaining two ranges of particle sizes; subsequently, different compositions were made among them until the combination that would result in the maximum compactness (for each material separately) was found. The result of the profile adjustment was as follows: CA with 60% of particles bigger than the No. 30 sieve, and 40% of particles smaller than it, and UA with 50% of particles both bigger and smaller than the No. 30 sieve [20].

The physical properties of the used aggregate were tested according to ASTM standards C128 [21], C136 [22] and C117 [23]; the results are shown in Table 1. The notable differences between both materials can be observed in the lower density of CA with regard to UA (differences of 760.7 and 468.2 kg/m³), while for absorption the CA achieved a higher coefficient than the UA (an increase of 16.8%).

Table 1 Physical properties of aggregates

Property	UA	CA
Density oven-dry: D _{od} (Kg/m ³)	2581.6	1820.9
Density saturated-surface-dry: D _{sdd} (Kg/m ³)	2623.6	2155.4
Water absorption (%)	1.6	18.4
Fineness modulus	2.4	2.8
Materials Finer than 75-µm (sieve No. 200) (%)	2.9	8.2

Portland cement, classified as CEMI 42.5 N/SR (UNE EN 197-1: 2011 [24]), was used as a binder because it is a regular product, with the usual properties and components, along with tap water.

3 Methodology

Three series of CeRM mixes were studied, each with different c/a (1:3.25, 1:4 and 1:4.75), and for different replacements of CA by UA (10, 20, 30, 50 and 100%), evaluating their behavior in fresh state (consistency, density and air content).

Samples of reference mortars (UM = usual mortar, 100% of UA and for each c/a of study) have been identified as UM-3.25, UM-4.00 and UM-4.75; and for identifying the CeRM, the following agreement was established: CeRM-1:d.dd-XX. Where: 1:d.dd = c:a (1:3.25, 1:4 and 1:4.75); and XX = % CA replacing UA in CeRM (10, 20, 30, 50 and 100). All mixes were made with a relationship w/c = 0.5 initial. Table 2 presents the dosing employed in each of the mixes of CeRM.

From the high absorption coefficient of the CA, and to prevent the mobility of water needed for the hydration process, the procedure continued by making a prior one-minute saturation with the resultant water of the initial w/c, before incorporating the cement into the mixer (Mod. E93, Matest brand), and then starting the mixing process at medium speed for 60 seconds. After this period, the mixer continued at high speed for 30 seconds more, with a subsequent 90-second repose and finally 60 seconds at high speed.

EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE SUS PROPIEDADES DE SU DURABILIDAD Y DE LA APLICACIÓN DE LOS MORTEROS RECICLADOS QUE UTILIZAN MATERIALES SECUNDARIOS

Table 2 Dosings of the CeRM (for 1 dm³)

Classification	Table 2 Dosings of the CeRM (for 1 dm ³)																		
	UM-3,25	CeRM-3,25-10	CeRM-3,25-20	CeRM-3,25-30	CeRM-3,25-50	CeRM-3,25-100	UM-4,00	CeRM-4,00-10	CeRM-4,00-20	CeRM-4,00-30	CeRM-4,00-50	CeRM-4,00-100	UM-4,75	CeRM-4,75-10	CeRM-4,75-20	CeRM-4,75-30	CeRM-4,75-50	CeRM-4,75-100	
Cement (g)	480	459	452	439	407	321	400	433	381	372	348	323	342	333	333	316	289	336	
AU** (g)	<sieve 30	781	672	588	500	331	0	800	780	610	521	348	0	811	711	633	526	343	0
	>sieve 30	781	672	588	500	331	0	800	780	610	521	348	0	811	711	633	526	343	0
CA** (g)	<sieve 30	0	60	118	171	265	418	0	69	122	179	278	517	0	63	127	180	274	639
	>sieve 30	0	90	176	257	397	627	0	104	183	268	417	775	0	95	190	271	412	959
Water (g)	327	338	361	346	393	353	334	390	355	373	397	476	334	366	378	386	400	586	

** Dry condition.

The consistency test was carried out at the end of the mixing process, by means of the flow table according to the ASTM C230 [25] standard. It was decided that a flow of $110 \pm 5\%$ would be achieved for this study (in accordance with the ASTM C109 [26]), after applying 25 drops to the sample in the flow table in a period of 15 seconds according to ASTM C1437 standard [27]. This flow was determined by the average measurements of two perpendicular diameters when the mix experienced its induced extension. According to the diameter of the initial mold, the proper consistency was established at 210 ± 5 mm; therefore, if the mix does not achieve this requirement, it will be necessary to increase the water content by small amounts, as many times as necessary, in order to achieve the desired flow.

Once the consistency had been determined, the density of the CeRM in its fresh state was calculated by weighing the content of mortar in the cylindrical container (standard, one liter capacity), and substituting the known data (weight and volume) into Eq. (1).

$$\rho = M / V \quad (1)$$

Where:

ρ = Density (g/cm³)

M = Mass (g)

V = Volume (cm³)

To obtain the air content, a normalized measurer was used (Luftgehaltsprüfer TESTING, 1 Liter, brand TESTING), which uses the pressure method (ASTM C231 [28]) with the help of a pre-regulated one liter container. The result of the air content is obtained from the reading on the calibration manometer.

With the above parameters and the studied variables, the statistical analysis computer program SPSS V22 for Windows was applied to the data in order to establish the coefficients of regression, which define the trend equations between the different variables. In this research the linear-type regressions were selected as the most suitable since these presented a better fit in the dispersion diagram of the parameters studied; and with them it is possible to obtain the parameter R^2 higher (establishes the degree of reliability of the trend and the accuracy of

the forecast, $R^2 \leq 1.0$). As a previous requirement for obtaining regressions, the following requirements were validated for determining a linear regression:

1. For each value of the independent variable, the distribution of the dependent variable is of the normal type.
2. The variance of the distribution of the dependent variable should be constant for all values of the independent variable.
3. The relationship between the dependent variable and each independent variable is linear.
4. All observations are independent.

In each pair of variables of the studied CeRM properties, it was always considered that the independent variables were the property of RF (because there is no precedent in the area of study), leaving the density and the w/c relationships as dependent variables, allowing the regression equations to be established by the mathematical formulation that best predicted the dataset of the dependent variable. In the case of the air content property the regression was not performed because of failure to comply with some of the necessary validations indicated above; however, this property is presented in graphs with the average value obtained for every family of study (referred to the w/c ratio, by more uniform behavior).

The trend lines are determined by calculating the points of study (set of independent and dependent variables) by the method of least squares adjustment, and using the following Eq. 2 as the structure of its formula:

$$y = mx + b \quad (2)$$

Where:

x = Value x_i of the independent variable

y = Value y_i of the dependent variable

m = The slope of the straight line

b = The intersection of the straight line with the vertical axis

4 Results and discussion

Below are the obtained results relevant to the tests of consistency (quantity of water required), air content, density and final w/c relationship obtained from the CeRM of study (see Table 3).

Table 3 Results of tests of the CeRM

	Density (g/cm ³)	Air content (%)	w/c final
UM-3.25	2.18	3.7	0.68
CeRM-3.25-10	2.15	4.0	0.74
CeRM-3.25-20	2.12	4.0	0.80
CeRM-3.25-30	2.09	3.5	0.79
CeRM-3.25-50	2.05	3.7	0.96
CeRM-3.25-100	1.96	3.5	1.10
UM-4.00	2.16	3.8	0.84
CeRM-4.00-10	2.13	3.8	0.90
CeRM-4.00-20	2.12	3.9	0.93
CeRM-4.00-30	2.09	4.2	1.00
CeRM-4.00-50	2.05	3.8	1.14
CeRM-4.00-100	1.95	3.7	1.48
UM-4.75	2.15	3.8	0.98
CeRM-4.75-10	2.10	5.1	1.10
CeRM-4.75-20	2.09	4.5	1.13
CeRM-4.75-30	2.06	4.2	1.22
CeRM-4.75-50	2.00	4.3	1.39
CeRM-4.75-100	1.91	5.1	1.74

The coefficients of the regression equations were obtained from these results and a triple-entry diagram was developed with theoretical-experimental correlations for the properties in fresh condition of CeRM studied. Figure 1 shows the results of density and w/c ratio with respect to RF, for each different ratio of c/a. From the diagram it is possible to confirm that the relationship between RF and density is inverse (negative sign in equations), while the RF relationship and the w/c is direct. This indicates that an increase in RF in the CeRM causes a decrease in its density and a growth in its w/c ratio. On the other hand, the term m (slope of the line) in the regressions indicates that the change between RF and density of CeRM is smaller than the change between RF and w/c ratio. This permits the assertion that the RF has more influence on the value of the w/c ratio than on the density of CeRM; as a result the relationship between RF and w/c ratio could be considered more important than the predictive behavior in the interaction diagrams obtained.

Concerning the studied values of c/a (3.25, 4.00 and 4.75), the inter-distance between the obtained regression lines (and also of the straight lines with experimental values) with respect to density indicates that, in this case, the straight lines do not maintain between them a parallel or a radial traced to a common origin (even there are intersections for the case of c/a = 3.25 and 4.00); this could indicate the possible existence of another variable (not established in the study) that causes another 'extra' coefficient in the regression equations, producing an

acceleration in the change of density due to the increase of the c/a ratio (it is possible that this behavior is due to the structure of the cementing matrix of the CeRM, as well as in the hydration process affected by the presence of the CA). On the other hand, for the case of the c/a ratio with respect to the w/c ratio, the straight lines are also not parallel to each other, but display a radial path intersecting at a common point, which shows that this indicator is of normal proportionality between them, providing more solidity as a tool for predicting behavior.

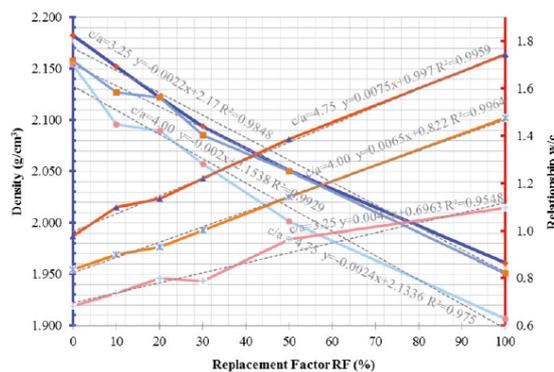


Fig. 1 Equations of linear regression and their reliability, with experimental values of CeRM

Using the regression equations from Figure 1, the Figure 2 (triple interaction diagram) shows the straight lines which mark the limits of correlative behavior between the different variables studied, with the addition of the average percentage value of the air content that predictably each group of CeRM will have. To refer to this last property, the correlation between RF and w/c relation is selected because it is highly reliable, is considered the most significant and possesses an indicator of normal proportionality. Based on the graph and the exposed behavior in previous analysis, some observations can be made:

- The effect of the RF on the density of the CeRM could be explained by the very low density of the CA that form them.
- The relationship between RF and the w/c ratio is affected by the greater amount of water needed by the CA (the higher the c/a ratio, is more significant the need).

The triple interaction diagram, allows its application simply and rapidly to the habitual used typologies in engineering the mixtures:

- Predictive or of mixture design: For example, what should be the range of RF contents which can be used to obtain a CeRM with established density and air content?
- Estimative or of revision: For example, what air content and density does a CeRM with a % of RF and a c/a ratio have?

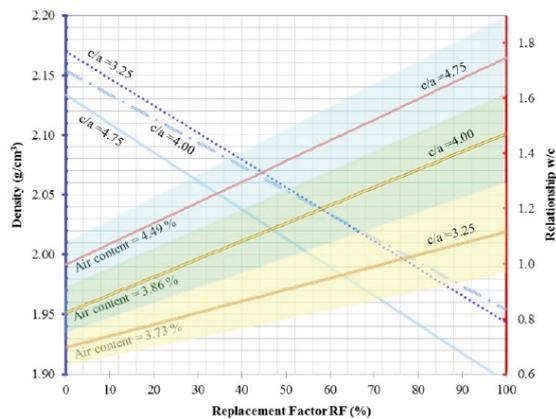


Fig. 2 Diagram of triple interaction of properties in fresh of CeRM

To validate the obtained interaction diagram and check its usefulness, a comparison is made with two other previous studies that have sufficient data to be used in the diagram. In both, the 20, 50 and 100% [29], and 5 and 10% [15] of the UA has been replaced by CA. For the specific case of predicting density by using the interaction diagram, and using the RF and the c/a ratio as input data, the trend of predictive data presents similar behavior to that indicated in the graph of Figure 2; however, they show an average approximation, or accuracy, error of between 7.3 and 5.3% respectively, these differences being greater at high RF values (in the specific case of [15]). These differences could be attributed to variables not included in this research, such as the density of aggregates (45% less in previous researches) compared to those used to validate the interaction diagrams proposed in this research; it is also possible that the w/c ratio should be considered as another factor that allows greater accuracy in predictions.

From this validation, it is possible to assert that the diagram obtained in this research can be used to predict the properties of the CeRM with similar characteristics (CA properties); and as this research progresses –when more experimental data, including more variables, becomes available– a more complete diagram involving more variables could be obtained, improving predictions and making them more widely applicable.

5 Conclusions

The following conclusions were reached in this work:

- Having information about the behavior that the CeRM may present, from the design phase of mixes of its properties in a fresh state, allows the correct adaptation to be anticipated through the specific use of mixture proportions and CA replacement, adapting these needs to the functions desired.
- The information obtained from this diagram of interaction can be used as a reference for other similar diagrams, in which, hardened state properties are included

(such as resistance to compression).

- When using this diagram of interaction, it should be ensured that the data of the CeRM used have similar characteristics (density of CA and w/c relationship, among others).
- It is necessary to carry out more tests in the future by means of different variables not included in this research, in order to obtain more general diagrams with multiple options for different possible alternatives.

Acknowledgement

The authors thank CONACYT for its doctoral scholarship program, to the EPSEB-UPC, the Department of Architectonic Constructions II-EPSEB-UPC, to the FIM-UAS and, finally, the program of Young PhD-UAS.

References

- [1] Barluenga, G., Hernández-Olivares, F. "Experimental approach to the use of recycled materials in mortar and concrete for architectural experimental applications." In: International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures. (1), 2004. pp. 403-411. URL: http://www.rilem.org/gene/main.php?base=500218&id_publication=45&id_papier=4326
- [2] Lehmann, S. "Optimizing Urban Material Flows and Waste Streams in Urban Development through Principles of Zero Waste and Sustainable Consumption." *Sustainability*. 3 (1), pp. 155-183. 2011. DOI: 10.3390/su3010155
- [3] Wang, G., Tian, B. "Effect of Waste Ceramic Polishing Powder on the Properties of Cement Mortars." In: International Conference on Energy and Environment Technology, 2009. ICEET '09, pp. 101-104. 2009. DOI: 10.1109/iceet.2009.31
- [4] Franzoni, E., Bignozzi, M. C., Bandini, S., Fregni, A. "Recycling waste for the production of sustainable mortars for brick masonry." *Environmental Engineering and Management Journal*. 12 (S11), pp. 35-38. 2013. URL: http://omicon.ch.tuiasi.ro/EEMJ/pdfs/vol12/no11suppl/10_Franzoni_13.pdf
- [5] Braga, M., De Brito, J., Veiga, R. "Incorporation of fine concrete aggregates in mortars." *Construction and Building Materials*. 36, pp. 960-968. 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.031
- [6] Lázaro, C., Ramón Trilles, V., Gómez, F., Allepuz, S., Fraga, D., Carda, J. B. "Incorporación de residuos derivados de la fabricación cerámica y del vidrio reciclado en el proceso cerámico integral." *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. 51 (2), pp. 139-144. 2012. (In Spanish) DOI: 10.3989/cyv.202012
- [7] Miranda, L. F. R., Constantino, C. S., Monich, C. R., de M Neto, A. A. "Use of Recycled Sand Produced at Construction Sites in Bedding Mortars." *Journal of Materials in Civil Engineering*. 25 (2), pp. 236-242. 2013. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000593
- [8] Fernández Ledesma, E., Jiménez, J. R., Ayuso, J., Fernández, J. M., de Brito, J. "Maximum feasible use of recycled sand from construction and demolition waste for eco-mortar production – Part-I: ceramic masonry waste." *Journal of Cleaner Production*. 87, pp. 692-706. 2015. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.10.084
- [9] Corinaldesi, V., Giugliolini, M., Moriconi, G. "Use of rubble from building demolition in mortars." *Waste Management*. 22 (8), pp. 893-899. 2002. DOI: 10.1016/S0956-053X(02)00087-9

- [10] Corinaldesi, V., Moriconi, G. "Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate." *Construction and Building Materials*. 23 (1), pp. 289-294. 2009. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.12.006
- [11] Jiménez, J. R., Ayuso, J., López, M., Fernández, J. M., de Brito, J. "Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing." *Construction and Building Materials*. 40, pp. 679-690. 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.036
- [12] Juan, A., Medina, C., Guerra, M. I., Morán, J. M., Aguado, P. J., Isabel, M., Sánchez de Rojas, I., Frías, M., Rodríguez, O. "Re-use of ceramic wastes in construction." In: *Ceramic Materials*. Chapter 10. Wunderlich, W. (Ed), InTech, 2010. URL: <http://www.intechopen.com/books/ceramic-materials/re-use-of-ceramic-wastes-in-construction>
- [13] Puertas-Maroto, F., García-Díaz, I., Palacios, M., Martínez-Ramírez, S., Barba-Juan, A., Gazulla-Barreda, M. F., Gómez, M. P. "Empleo de residuos cerámicos como materia prima alternativa para la fabricación de clínker de cemento portland." *Cemento Hormigón*. 907, pp. 20-34. 2007. (In Spanish) URL: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2474572>
- [14] Higashiyama, H., Yagishita, F., Sano, M., Takahashi, O. "Compressive strength and resistance to chloride penetration of mortars using ceramic waste as fine aggregate." *Construction and Building Materials*. 26 (1), pp. 96-101. 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.05.008
- [15] Silva, J., de Brito, J., Veiga, R. "Recycled Red-Clay Ceramic Construction and Demolition Waste for Mortars Production." *Journal of Materials in Civil Engineering*. 22 (3), pp. 236-244. 2010. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2010)22:3(236)
- [16] Cabrera, O. A., Traversa, L. P., Ortega, N. F. "Effect of crushed sand on mortar and concrete rheology." *Materiales de Construcción*. 61 (303), pp. 401-416. 2011. DOI: 10.3989/mc.2011.55609
- [17] Bektas, F., Wang, K., Ceylan, H. "Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability." *Construction and Building Materials*. 23 (5), pp. 1909-1914. 2009. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.09.006
- [18] Kumavat, H. R., Sonawane, Y. N. "Feasibility Study of Partial Replacement of Cement and Sand in Mortar by Brick Waste Material." *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2 (4), pp. 17-20. 2013. URL: <http://www.oalib.com/paper/2173846#WCnSGclGQ9o>
- [19] ASTM International. "C144-99. Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar." West Conshohocken, PA, 2 p. 1999.
- [20] Cabrera-Covarrubias, F. G., Gómez-Soberón, J. M., Almaral-Sánchez, J. L., Corral-Higuera, R., Navarro-Ezquerria, A., Tous-Coll, M. "Characterization of three recycled materials for alternative use of mortars." In: *International Conference on Advances in Civil, Structural and Construction Engineering - CSCE 2014*. Roma, pp. 69-73. 2014. DOI: 10.15224/978-1-63248-020-0-25
- [21] ASTM International. "C128-04a. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption." 6 p. West Conshohocken, PA, 2004.
- [22] ASTM International. "C136-06. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates." 5 p. West Conshohocken, PA, 2006.
- [23] ASTM International. "C117-95. Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral." 4 p. West Conshohocken, PA, 1995.
- [24] AENOR. "UNE-EN 197-1. Cemento Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes." 40 p. Madrid, 2011. (In Spanish)
- [25] ASTM International. "C230/C230M-03. Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement." 7 p. West Conshohocken, PA, 2003.
- [26] ASTM International. "C109-05. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars." 9 p. West Conshohocken, PA, 2005.
- [27] ASTM International. "C1437-99. Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar." 2 p. West Conshohocken, PA, 1999.
- [28] ASTM International. "C231-08b. Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method." 9 p. West Conshohocken, PA, 2008.
- [29] Silva, J., de Brito, J., Veiga, R. "Incorporation of fine ceramics in mortars." *Construction and Building Materials*. 23 (1), pp. 556-564. 2009. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.10.014

CAPÍTULO 4

Article

An Experimental Study of Mortars with Recycled Ceramic Aggregates: Deduction and Prediction of the Stress-Strain

Francisca Guadalupe Cabrera-Covarrubias ¹, José Manuel Gómez-Soberón ^{2,*},
Jorge Luis Almaral-Sánchez ³, Susana Paola Arredondo-Rea ³,
María Consolación Gómez-Soberón ⁴ and Ramón Corral-Higuera ³

¹ Barcelona School of Civil Engineering, Polytechnic University of Catalonia, C. Jordi Girona 1-3, Building C2, 08034 Barcelona, Spain; guadalupe.cabrera04@gmail.com

² Barcelona School of Building Construction, Polytechnic University of Catalonia, Av. Doctor Marañón 44-50, 08028 Barcelona, Spain

³ Faculty of Engineering Mochis, Autonomous University of Sinaloa, Fuente de Poseidón y Ángel Flores s/n, Col. Jiquilpan, Module B2, Los Mochis, 81210 Sinaloa, Mexico; jalmaral@uas.edu.mx (J.L.A.-S.); paola.arredondo@uas.edu.mx (S.P.A.-R.); ramon.corral@uas.edu.mx (R.C.-H.)

⁴ School of Civil Engineering, Metropolitan Autonomous University, Av. San Pablo No. 180, Col. Reynosa Tamaulipas, Delegación Azcapotzalco, 02200 Distrito Federal, Mexico; cgomez@correo.azc.uam.mx

* Correspondence: josemanuel.gomez@upc.edu; Tel.: +34-934-016-242

Academic Editor: Sinisa Dj. Mesarovic

Received: 18 October 2016; Accepted: 13 December 2016; Published: 21 December 2016

Abstract: The difficult current environmental situation, caused by construction industry residues containing ceramic materials, could be improved by using these materials as recycled aggregates in mortars, with their processing causing a reduction in their use in landfill, contributing to recycling and also minimizing the consumption of virgin materials. Although some research is currently being carried out into recycled mortars, little is known about their stress-strain (σ - ϵ); therefore, this work will provide the experimental results obtained from recycled mortars with recycled ceramic aggregates (with contents of 0%, 10%, 20%, 30%, 50% and 100%), such as the density and compression strength, as well as the σ - ϵ curves representative of their behavior. The values obtained from the analytical process of the results in order to finally obtain, through numerical analysis, the equations to predict their behavior (related to their recycled content) are those of: σ (elastic ranges and failure maximum), ϵ (elastic ranges and failure maximum), and Resilience and Toughness. At the end of the investigation, it is established that mortars with recycled ceramic aggregate contents of up to 20% could be assimilated just like mortars with the usual aggregates, and the obtained prediction equations could be used in cases of similar applications.

Keywords: mortar; ceramic wastes; recycled aggregates; stress-strain behavior; numerical simulation

1. Introduction

The recycling of waste products from the ceramic industry is an important objective, as they are an obstacle to achieving a sustainable society [1]. This industry produces bricks, paving and roof tiles, of which 2% are taken to landfill due to deficiencies, cracks or fissures. This makes their controlled elimination difficult and as a result they end up being the origin of a serious environmental problem [2,3].

As a consequence of the search for solutions to their processing and recycling, recycled ceramic aggregates (CA) are being researched as total or partial substitutes for the usual aggregates (UA) (in mortars as well as in concrete); these new applications use fractions of both coarse and fine sizes [4].

and also as a partial substitution of cement itself (sporadically reaching the adequate properties [5–14]). In short, all of this research contributes to recycling, to a closed life cycle in building materials, reducing the environmental impact by preventing the waste products from reaching the landfill, and minimizing the consumption of natural resources [15,16].

CA should be understood as materials that proceed from a previous use (rejects from a ceramics factory, or from the demolition of architectural elements containing ceramics) and which ultimately may be considered as residues; if they are subjected to processing (selection, crushing and sieving) they are transformed, allowing their inclusion in other uses. In comparison with the CA, the UA are materials without a previous use (extracted from quarries or riverbeds), typically used in the construction industry to make concrete and mortars (sands). Therefore, when CA is used to make a new mortar (replacing the UA), the resulting Mortar generated contains recycled aggregates, in this particular case of ceramic origin (RCM).

Recent research into mortars with different replacement percentages of UA by CA aggregates has concentrated its results on explaining their behavior in their fresh and hardened state, thereby trying to establish their real chances of possible practical application.

Regarding their fresh state, Bektas et al. [17] reports that the consistency of the RCM is modified according to the CA content in the coarse fraction. This behavior was explained by the high water absorption capacity of the CA (also validated by [18]). If only the fine fraction of the CA is used, Silva et al. [19] reported the opposite, concluding on this occasion that the mixing water needed for the determined consistency decreases as the fine CA are increased; it is the size and content of the CA used which dictates this property on this occasion (this is also verified by previous results [20]).

Ay and Ünal [21] conclude in their study that the use of the CA in its fraction of ceramic powder (CePo) (as a cement replacement) increases the consistency. On the contrary, Turanlı et al. [10], needed to increase the amount of water; however, in both cases the tolerance is acceptable according to ASTM C618. In a similar manner, Pereira-de-Oliveira et al. [14] obtained a decrease in the consistency of both brick and roof tile CA, attributing this to a theoretical increase in the specific surface area of the mortar (fineness of the CePo).

Therefore, if the use of CAs in the RCM leads to a loss in their consistency, it can be expected that their modification (water content available for forming hydration products) may affect their later behavior in their hardened state. Thus, with an adequate consistency, a foreseeable improvement in resistance can be guaranteed (compacting, which produces a higher density); the common thread of the behavior being that good consistency leads to high density, which in turn guarantees good resistance (desirable elastic behavior). Referring to the density of the RCM, factors such as the size of the aggregates [19], the amount of replacement [16,18,22] and its contribution as a cementing material have been studied [16].

With regard to the properties of the RCM in their hardened state, the apparent density has experienced a similar trend to the density in fresh state, showing decreases in density as the CA replaces the UA [16,18,22]. This is explained by the lower density of the CA; therefore, it is to be expected that, in the σ - ϵ behavior of the RCM, the replacement factor (density reduction) will also depend on this.

Porosity in the RCM has also been previously assessed [9,12], the RCM with finer CA show greater porosity [4]; referring to the control mortar and analyzing the distribution of its pore sizes, it is shown that the micropore zone is reduced and in the mesopore zone the values are similar in both mortars, eventually increasing in the macropore zone, generating the most notable difference in the mortar with CA. Therefore, it should be emphasized that the structure or porous network of a mortar should, intuitively, be a direct factor by which the transfer of tensions must be established; this being, therefore, a property which influences their elastic behavior and causes limitations in their resistance (possible deformation and low resistance capacity), or on the contrary favors it (increase in matrix rigidity).

Some properties have been established regarding the mechanical behavior of the RCM, among which three principles for compressive strength (f_m) have been established: replacement of UA by CA, of UA by CA and use of CePo for a part of the cement, and of CePo by cement.

In investigating the total substitution of UA by CA, different studies have been carried out [4,23], in which losses of up to 39% (justified by the lower specific weight and higher absorption of the CA) and from 40% to 73% (caused by different particle sizes-crushing method) have been obtained at an age of 28 days. Contrary to previous research [24], increases in resistance (14%) have also been established, without being conclusive.

Research has also been carried out into the partial replacement of UA by CA [16,18,22], concluding that for percentages below 30% (in some cases even 50%) the f_m is equivalent or even superior to the reference sample. This increase is due to the pozzolanic reaction that the fine fraction of the CA may show, as well as other physical effects (absorption, form and roughness). Above this “limit” of CA content, a resistance loss of up to 14% should be expected; this may be the result of the dosage method used (by volume), which underestimates the high porosity of CA.

Regarding the second principle of the research, it is concluded that RCM in which 100% of the UA is substituted by CA, as well as 10%, 20% and 30% substitutions of cement by brick CePo, cause increases in resistance of between 11% and 3% (10% and 20% in brick CePo) [24]; on the contrary, there is a reduction of 37% if the 30% mix is used. These results are explained by the possible pozzolanic reaction of the CePo; however, not all the implications of this work have been clarified with precision.

Finally, for the third principle, up to 40% replacement of brick CePo for cement has been used, revealing decreases in compressive strength when the percentage of CA substitution increases [16,21]. Contrary results have also been reported, showing increases of 3% (water/cement (w/c) = 0.4) when 20% of the cement was replaced [12]. On these occasions, it seems that the RCM benefitted from the w/c effect, for in an identical test but using w/c = 0.5 and for whatever percentage of replacement, the results always showed a loss of resistance. In a final study, results were obtained which differed from all the previous ones; for a replacement of 30% of CePo, reductions of up to 42% were reported [9].

Several hypotheses can be obtained from all the previous studies, although none are conclusive. It seems that variables such as the cooking temperature of the clay CA (potential pozzolanic capacity), the speed of its reaction or maturity (hydration process) and the blocking effect in the cementing matrix of the RCM (high density and closure of the porous network) may be involved in this behavior, but given the divergence and variability of the results and variables that intervene, further research is necessary. On the other hand, it may be said that whatever the mechanism—chemical, physical or mechanical—that alters the properties of the compressive strength of the RCM, this will have a direct repercussion on their deformation behavior, as this connection in their behavior has already been established in the general ambit of concretes and mortars [25–27], and should also arise in the RCM.

Flexural strength is another property of interest in the study of the σ - ϵ behavior in agglomerate materials, which in the case of the RCM is expected to show particular considerations. Favorable replacements of CA for UA with values of up to 50% have been reported, without affecting the flexural strength [18,22]. In the case of 100% substitution, losses of 6% were reported [4,23]. The previously mentioned strength increases are explained either by the contribution of the pozzolanic effect of the CA, or by physical effects such as increases in porosity and angularity, which cause the “sticking effect” of the cement paste; this contributes to the increase in strength. However, with the use of 100%, this behavior can be understood due to the fact that in the case of high CA contents the beneficial pozzolanic effect does not predominate in the behavior of the cementing matrix; it is the low specific weight, and high absorption and porosity, which finally establish this as “the weak link” of the group.

In the event of using CA to replace cement [9,21], strength losses have been reported for all the replacement percentages. In this case, it is clear that the substitution of CA for cement is not equal to the hydration capacity of the latter; however, the application may be justified for use with low contents (assumable losses of strength) due to the value of its environmental benefits.

Regarding the static σ - ε relationship of the RCM, little has been explained with respect to their habitual characteristics, such as the establishment of either the plastic or the elastic range (Young's modulus, or the modulus of Elasticity (E)); the same applies regarding their respective elastic deformation ($\varepsilon_{\text{elastic}}$) established at 40% of the maximum load of failure ($0.40 f_m$), and their maximum deformation of failure (ε_{max}) reached by the material before the failure is present (f_m). Despite this, these parameters are considered fundamental in evaluating the mechanical characteristics of the materials [28], and necessary for the design of the constructive elements in which they are integrated; therefore, an eventual proposal of standardized use with mechanical objectives requires their study, determination and explanation.

By general agreement, E has been nominated as the ratio between the increase of strength and the corresponding change to the unitary deformation of a material [29]; if the level of strength exceeds the elastic limit, then the material enters the plastic range, characterized by displaying non-proportional increases in its deformation as a response to the increased stress to which it is subjected. When the applied charge produces the failure in the material, the deformation at this instant is specified as the ε_{max} of the failure (see Figure 1).

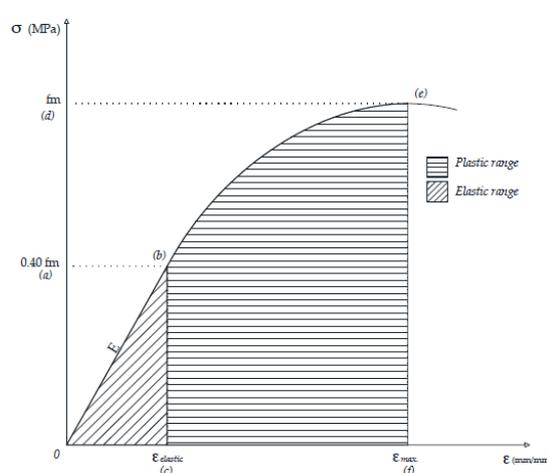


Figure 1. σ - ε curve diagram.

Static tests are the habitually used procedures for determining the σ - ε relationship of the materials, this being a mechanical characteristic, which leads to defining them in several aspects (elasticity, plasticity, malleability and hardness). The diagram σ - ε is unique for each particular material; however, these can be classified into two different types of materials: ductile materials (showing large ε) and fragile materials (showing small ε) [30]. From the diagram σ - ε it is possible to determine the E ("desirable" behavior of construction materials), which describes its relative rigidity. This property can be obtained from a laboratory test in which the slope of the elastic region of the diagram σ - ε [31] is determined; numerically this is obtained from the coefficient of the strength regarding the unitary elongation [32] as can be seen in Equation (1):

$$E = \sigma / \varepsilon = \frac{F / A_0}{\Delta L / L_0} = FL_0 / A_0 \Delta L \quad (1)$$

where E (in MPa) is Young's Modulus; F (in N) is the applied axial force; A_0 (in mm^2) is the area of the original transversal section; ΔL (in mm) is the variation of the longitudinal dimension of the object; and L_0 (in mm) is the original height.

Regarding previous results of E for the RCM, some particular variables of their study have been reported. The first was the partial use of CA as a substitution for cement in percentages with maximum

values of up to 40%. Moriconi et al. [9], applying static compression tests and with the diagram curve σ - ϵ , showed losses at all ages of the study, the maximum being at 28 days (46% with respect to the reference); with similar results. Toledo Filho et al. [12] reported that E decreases inversely to the increase in the CA replacement percentage; with substitutions of 0%, 10%, 20%, 30% and 40%, decreases of 3%, 5%, 7% and 9%, respectively, regarding the control mortar (at 28 days, $w/c = 0.5$) were observed. However, with $w/c = 0.40$, similar behavior to the previous was obtained, with the exceptions being mortars with 10% and 20% CA, which showed an increase in E of 1% and 2% respectively, both with reference to the control mortar. Therefore, it seems that the replacement factor is adverse and the w/c relationship is less decisive (within the studied limits).

The second variable studied was the use of RCM with CA replacing different percentages of UA, and in which losses have also been reported; for example Silva et al. [20] reported decreases of E when 10% of CA was replaced (the variables of cement/aggregate (c/a) studied were = 1:6 and 1:4), indicating as the most important result that the effect of c/a could be similar (18% and 17% of losses respectively) at prolonged ages (2–5 months); this behavior was held responsible for the formation of fissures, showing that a lesser E permitted lower internal tensions for identical deformations. In parallel works [18], an experimental campaign was defined with $c/a = 1:4$ but now attaining replacement values of CA by UA of 50%; on this occasion the losses indicate values of up to 40% with respect to the reference sample (at both two and five months), concluding that—if these losses are accepted—the application of monolayer mortar to the walls may be appropriate.

In the third variable studied, total replacements of CA were made, both for UA and for the cement; Higashiyama et al. [24] used two different particle size (PS) of CA in their study, using 100% CA as an aggregate and studying replacements of 10%, 20% and 30% for cement. On this occasion, for the RCM with 10% and 20% cement replacement, increases of 2% and 5%, respectively, were obtained with regard to the reference samples, this behavior being explained by the good mechanical qualities of the CA; however, in the case of the variable that used 30%, losses of 6% were reported, for reasons that have not been fully clarified.

Based on the previous studies, the objective of this research is to determine more precisely all the σ - ϵ relationships that the RCM could contain due to the effect of the replacement of their UA by different percentages of CA. Consequently, the experimental methodologies have been established for: aggregate substitution procedures, mortar mixing protocol, static mechanical and deformation spotting tests and, finally, the numeric analysis of data, which allows the real values of their σ - ϵ behavior to be established, such as the f_m , $0.40 f_m$, $\epsilon_{elastic}$, $\epsilon_{max.}$, E , toughness (T) and resiliency (U_r), as well as their particular prediction equations.

2. Materials and Methods

2.1. Materials and Mortar Dosage

CA was available as an aggregate for use in the study of the RCM, obtained from a treatment plant for aggregates from waste and demolition, which in turn came from a local company that supplied ceramic roof tiles for the construction industry; the material was eliminated from the production process for not meeting the requirements (defects in size or faults in geometry). The material used had a PS of 0–5 mm. A silica sand, from a local supplier of natural aggregates for construction, was used as UA (PS of 0–4 mm). Figure 2 shows the results of the X-ray diffraction tests (XRD) (brand PANalytical X'Pert PRO MPD Alpha1 diffractometer, Almelo, The Netherlands) equipped with a source $Cu K\alpha_1$ radiation ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) X-rays; the test was performed in the range 4° to 80° of 2θ in steps of scanning $2^\circ/s$. For both aggregates used in this research, the characteristic peaks of the principal components identified are marked on the graph, demonstrating that both aggregates can be considered “equivalent” regarding the presence of mineralogical compounds. They only differ regarding the peaks of Zircon and Hematite present in the CA (both common in ceramic materials due to their refractory capacity and pigment), but without them being a cause of distinction in later behavior due to their alternative use.

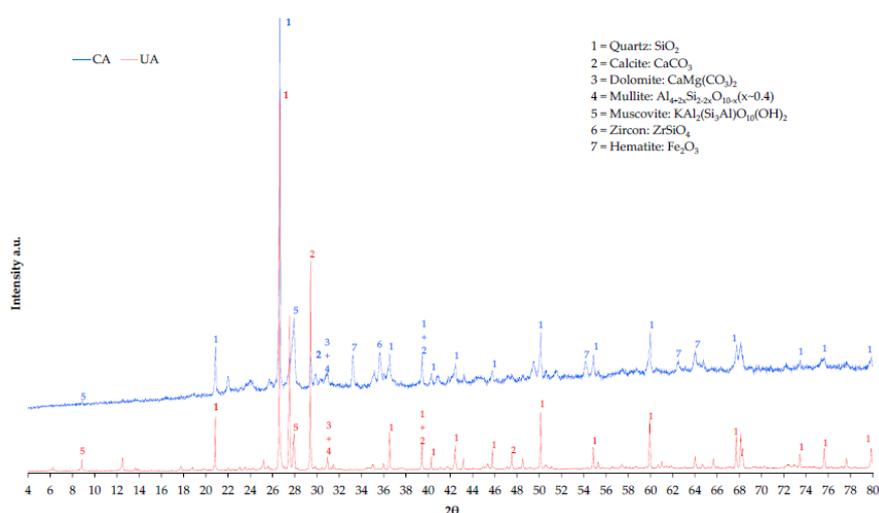


Figure 2. XRD diffractogram for the CA and UA studied.

The physical properties of the aggregates used are shown in Table 1; the bulk density values in oven-dry condition (M_{OD}), the bulk density in saturated-surface-dry condition (M_{SSD}) and the void content correspond to the materials used; on the other hand, the density values in oven-dry condition (D_{OD}), Density in saturated-surface-dry condition (D_{SSD}), absorption (more significant in this case), fineness modulus and particles of $<75 \mu\text{m}$ correspond to the aggregates finally used in the research—the granulometric profiles adjusted to the limits of ASTM C144 [33]—which involves dividing the original profiles into two fractions (sieve No. 30, 0.59 mm) in the search for the maximum bulk density. This permits two different granulometric profiles to be adjusted, thereby ensuring they are more equivalent. The CA was made up of 60% of the material retained in the sieve and 40% of the material that passed through; in the case of the UA the optimal adjustment was made using 50% of each material, the retained and the sieved.

Of the tests carried out, in agreement with others [16,22], the density of the CA was inferior to that of the UA, in general being an average 24% less. The opposite was the case for absorption, in which the CA were up to 12 times bigger than the UA, similar to others reported previously [4,18,22].

Table 1. Physical properties of aggregates.

Property ¹	CA	UA
Without adjusted granulometric profiles		
M_{OD} (kg/m ³)	1182.0	1735.1
M_{SSD} (kg/m ³)	1399.1	1860.8
Void content (%)	35.3	32.9
With adjusted granulometric profiles		
D_{OD} (kg/m ³)	1820.9	2581.6
D_{SSD} (kg/m ³)	2155.4	2623.6
Water absorption coefficient (%)	18.4	1.6
Fineness modulus materials	2.8	2.4
Particles $< 75 \mu\text{m}$ (sieve No. 200) (%)	8.2	2.9

¹ According to ASTM (C128 [34], C136 [35] and C117 [36]).

Portland cement CEM I 42.5 N/SR (UNE EN 197-1:2011 [37]) was used as a binder, being commonly used and having the usual properties and components. Potable tap water was also used in making the mixtures.

2.2. Experimental Campaign/Specimens

Test specimens of 4 cm × 4 cm × 16 cm were made with different material contents, and the percentages of CA used to substitute the UA were identified as: usual mortar (UM), which refers to the mortar in which only UA was included (0% CA), and RCM XX%, which refers to the RCM in which a part of the UA is replaced (XX%, in weight) by CA. Thus, XX% represents the percentage of CA (made up of the two fractions of particle sizes, 60% > sieve No. 30 and 40% < sieve No. 30), and its complement, until the total amount of material used represents the percentage of UA (made up of the two fractions of particle sizes, 50% > sieve No. 30 and 50% < sieve No. 30). The total of the study variables to be compared with the UM were designated thus: RCM10, RCM20, RCM30, RCM50 and RCM100 (10%, 20%, 30%, 50% and 100%).

Table 2 presents the characteristics and proportions for obtaining 1 dm³ of each of the study mixes used in the research; all the mixtures were designed with an initial *c/a* ratio of 1:4 and of *w/c* = 0.5. The dosage process was carried out in accordance with criteria generally accepted in previous studies: the recycled aggregates required previous saturation to prevent the movement of water necessary for hydration [38,39].

The absorption of the aggregates used (in the case of ceramics, and depending on the XX%) will cause that the final *w/c* relation varies. However, this increase in *w/c* should not be interpreted as a direct increase in the water used chemically to react with the cement (forming crystals or composites), but as mixing water which will be used to saturate the recycled aggregates (with more absorption capacity due to their open porous structure) and prime them for mixing (humid, superficially dried) with an identical flow capacity (ASTM C109/C109M-05). Although it would seem initially that these mortars are not suitable for comparison, they are if the implications of substituting one group of aggregates for another are taken into account. Equally, their specific and particular characteristics play a part in designing the mixture, as well as their equivalences in the behavior.

The mixing sequence and the duration of the process were in accordance with the ASTM C305-06 norm [40], preparing the initial sequence for adapting the particular saturation requirements of the CA: introducing the UA and/or CA and the total water content of the mixture into the mixer (brand Matest, Mod. E93, Brembate Sopra, Italy), leaving the materials to soak for one minute before introducing the cement. From this point onward (8.1.3 of the ASTM C305-06), the rest of the process is standard. The compliance of the properties in fresh state (ASTM C230/C230M-03 [41], C231-08b [42]) is verified before molding the test specimens.

Once the mixing is completed the resulting product is introduced into the molds for curing, in accordance with ASTM C109/C109M-99 [43].

Table 2. Characteristic and proportions of the mixtures.

Materials (g)	Classification and Proportions of the Mixtures						
	UM	RCM10	RCM20	RCM30	RCM50	RCM100	
Water	334	390	355	373	397	476	
Cement	400	433	381	372	348	323	
UA ¹	<sieve No. 30	800	780	610	521	348	0
	>sieve No. 30	800	780	610	521	348	0
CA ¹	<sieve No. 30	0	69	122	179	278	517
	>sieve No. 30	0	104	183	268	417	775

¹ Dry condition.

2.3. Details of Tests and Procedures

For determining the density of the RCM, the prescriptions of UNE EN 1015-10 [44] and UNE EN 1936 [45] were used, as well as the remaining half of a specimen previously subjected to a flexural test at an age of 60 days (considering that this property has reached stability of maturity at this stage).

The fm and the σ - ε curve were obtained at the age of 90 days (sufficient maturity for the aims of the study) in test specimens that had previously been removed from their curing process in water. The compression strength test was carried out in line with ASTM C349-97 [46].

The σ - ε curve necessary for determining E was obtained during the compression strength test; for which it was decided to use a linear displacement sensor (Linear Strain Conversion (LSC) Transducer, APEK Desing & Developments LTD, MPE Transducers Division, Wimborne, Dorset, UK), connected to the universal press (5000 KG Stepless Compression Test Machine, Wykeham Farrance Ltd., Tring, UK) with the aim of establishing the deformation produced by the effect of the load on the specimen. An external load cell (5 t \pm 2 mV/V, brand Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM), Darmstadt, Germany) was used to establish the amount of charge applied to the specimen; both instruments (transducer and charge cell) were connected to a data acquisition unit (model SCXI-1000, brand NATIONAL INSTRUMENTS, Austin, TX, USA), which sends the acquired data to a computer; this is later processed and finally the graph of the σ - ε curve is generated. Figure 3 shows the experimental setup used, and in Figure 4 there is an example of the resulting graph, the vertical axis (Y) indicating the values of the charge in kg, and the horizontal axis (X) showing the deformation in cm.

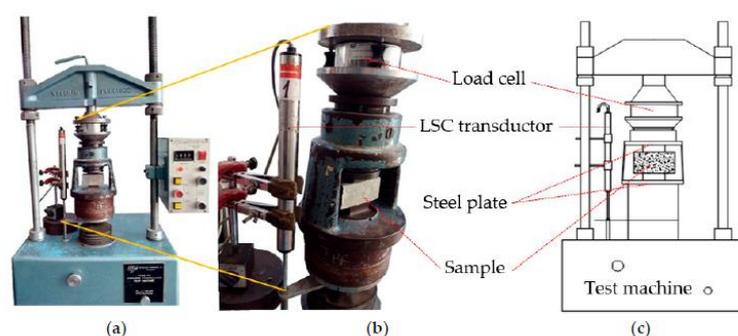


Figure 3. (a) General configuration of the experimental arrangement; (b) detail of LSC; and (c) idealized scheme from set.

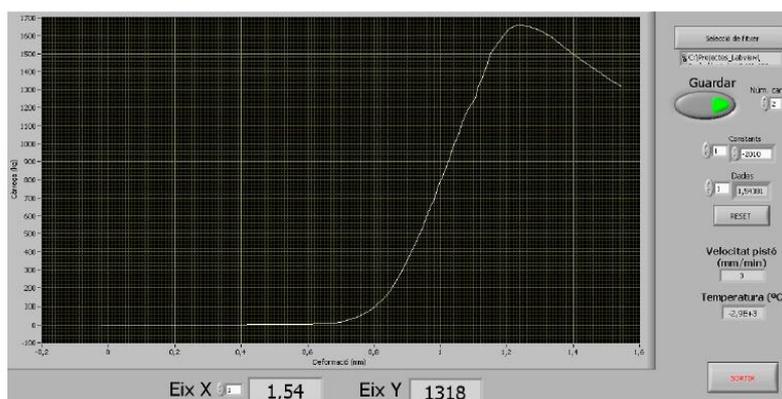


Figure 4. Curve σ - ε resulting from a test.

Once the data had been extracted from the computer, they were processed on a spreadsheet to obtain the σ - ε curves in accordance with Figure 1. As a working principle of the data capture system itself, a manual adjustment was necessary, which involved locating the starting point of the test. This was established in the following manner: the first pair of values σ and ε in which an $\varepsilon > 0$ (σ_2 with $\varepsilon_2 > 0$) was detected was considered to be the second pair of values of the test, which therefore makes

the previous values (σ_1 and ε_1) become $\sigma_1 = 0$ and $\varepsilon_1 = 0$. The rest of the pairs of σ and ε were then recalculated, in accordance with this principle of correction. The previous adjustment eliminates the initial semi-straight section of the curves, which had originated in the adjustments made at the start of the charge phase (adjustment of the charge plates, parallelism of the specimen faces, acquisition of LSC, etc.). On the other hand, it allows all the curves to be put at the same test starting point, thus making their comparison easier.

To continue with the information analysis, the value of f_m was located, which was determined as the value of maximum tension reached prior to the tension decrease (specimen failure). Then the value of $0.40 f_m$ was determined, and was established as the limit between the elastic and the plastic behavior of the material. In both cases the projection that arose between these values on the vertical axis (f_m and $0.40 f_m$) and the intersection with the σ - ε curve allowed the values of ε_{\max} . and $\varepsilon_{\text{elastic}}$ respectively, to be established on the horizontal axis.

For the simplified determination of E the following procedure was established: the slope of the theoretical straight line is obtained, created in the section limited by the intersection of the curve with $0.40 f_m$ (point b of Figure 1) and the origin of the diagram (point 0 of Figure 1) [31]. Bearing in mind that the material deforms in the elastic range (without σ , its ε is recovered), the equation used to determine the slope was of linear type, with a constant slope. For its regression, all the pairs of values σ - ε contained within the previously established range were used. Equation (2) is used:

$$y = ax + b \quad (2)$$

where y is the dependent variable (σ , in MPa), a is the slope of the curve (E , in MPa), x is the independent variable (ε , in mm/mm) and b is the point where the slope cuts the "Y" axis (in MPa).

The area below the σ - ε curve has been defined as U_r [47], assigning to this area the concept of the energy which the test specimen of mortar is able to absorb or transform (in deformation), with a validity limit of up to an σ of $0.40 f_m$. For a numerical quantification, the area below the curves, limited by the points "0", "b" and "c" of Figure 1, was estimated.

Regarding T , this has been associated as the total energy absorbed or transformed in deformation by the test specimen of mortar of the entire curve σ - ε [31,48]; however, given the difficulties and implications of a correct capture of the section of the σ - ε curve after f_m , only the area below the σ - ε curve, bounded by the points "0", "b", "e", "f" and "c" in Figure 1, have been considered. In both cases the area below the curves is obtained by means of the trapeze method, according to Equation (3), for each pair of values of increase of σ and its respective ε , in order to get their sum and thereby obtain the total sought area below the curve.

$$\int_0^i f(x)dx = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \left[\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \right] \quad (3)$$

where ε_1 (mm/mm) is the lesser deformation of the pair of study values; ε_2 (mm/mm) is the greater deformation of the pair of study values; σ_1 (MPa) is the lesser stress of the pair of study values; σ_2 (MPa) is the greater stress of the pair of study values; and $f(x)$ (MPa) is the area below the σ - ε curve. Similarly, the secant modulus of elasticity (E_0) was determined from the origin of the coordinates to the corresponding point of maximum stress of its theoretical straight line. This was established by obtaining the slope of the theoretical straight line which is created in the section limited by the intersection of the curve with f_m (point d) and the origin of the diagram (point 0) of Figure 1.

3. Results

Here now follow the results obtained regarding density in hardened state, the compression strength at E , U_r , and T , as well as the values of ε_{\max} . and $\varepsilon_{\text{elastic}}$ obtained from the experimental campaign described; a numerical-analytical process was then carried out with these results to determine

the equations for predicting the behavior of the RCM for each of the studied properties, and finally the equations which define the theoretical behavior of the σ - ε curves were established.

3.1. Density in Hardened State

Table 3 shows the results of the density (ρ) obtained for the RCM studied; it can be noted how the RCM are always less heavy than the UM and, equally, their density is inversely correlative to the CA content. This is due to the density of the aggregates used (see Table 1).

Table 3. Density in hardened state of the RCM.

Study Variables	ρ (g/cm ³)
UM	1.950
RCM10	1.948
RCM20	1.894
RCM30	1.864
RCM50	1.798
RCM100	1.529

3.2. Compression Strength

In Figure 5, the values obtained from f_m are presented for the different RCM studied, in which three zones of behavior can be observed. First (low content), similar values to those of UM are obtained for RCM10 and RCM20 (in this study, increases of 1.5% and 0.3%, respectively), similar to those established in other studies which show increases of 1% in RCM with 20% of CA at 90 days [22] and losses below 3% with 10 and 20% of CA at 56 days [17]. Second (intermediate content), for samples RCM30 and RCM50, less resistance was found than in the case of the UM (6% and 14%), contrary to previous studies (50% CA use shows greater f_m than the reference) [16,18,22]. Finally, for the third zone (maximum content), RCM100 has a marked loss with respect to the UM (loss of 35%), coinciding with other research [4,49] (39% and 40% less than the reference at 28 days with $c/a = 1:3$ and $1:2$). Of the three zones described, the first shows variation values which could be considered as within the natural variability of the test (see the standard deviation of the tests in Table 4); however, for the other two behavior zones the natural variability exceeds the standard deviation of the test in question, and consequently it is evident that this behavior must be attributed to the variable XX% of the RCM studied.

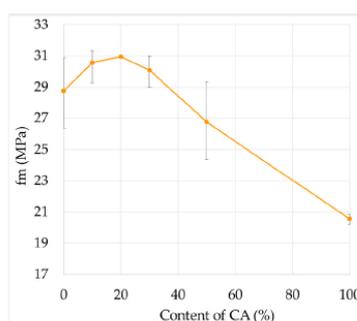


Figure 5. Compressive strength of the RCM at 90 days of age.

The explanatory hypotheses of the compressive behavior for the different CA contents are: for low CA contents, there is a possibility that the strength increases are due to a pozzolanic reaction in the fine fraction of the CA, causing a “filling” effect in the matrix and a reduction of the porosity (which improves strength). The validation of this hypothesis was corroborated by observing the

matrix with a JEOL JSM-6510 scanning electron microscope (SEM). In Figure 6, the UA, CA, grout (G) and the interfacial transition zone (ITZ) can be seen both in Figure 6a for UM and Figure 6b for RCM10. In Figure 6a, a wide ITZ can be seen around the UA, as well as a smoother UA profile (less adherence), while Figure 6b shows a denser and more uniform (lower porosity) matrix, a thinner ITZ and a rougher CA.

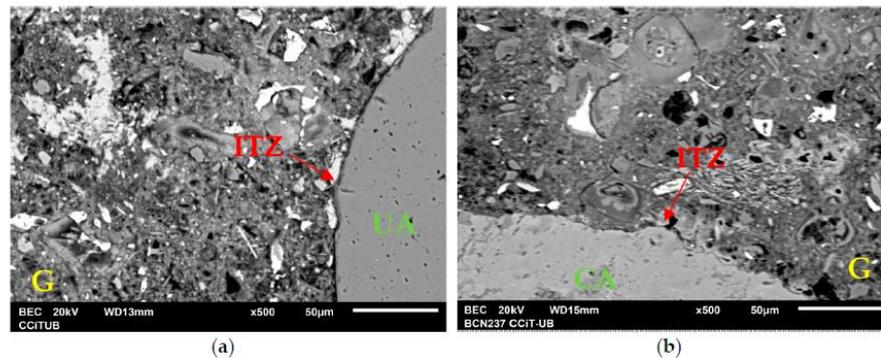


Figure 6. (a) UM (0% of CA); and (b) RCM10 (10% of CA).

Additionally, another possible reason why the RCM show divergences in their strength is the method of proportioning used in their dosage (weight or volume); for example, when substituting materials according to weight a greater amount of inferior quality mortar is produced [22], due to the lower density of the recycled aggregate, which causes lower strength. Regarding the RCM with strength losses, it is suggested that the increase in the CA content causes the pozzolanic reaction of the fine fraction to be lost (or annulled), leading to the unfavorable effects of lower density and high absorption of CA becoming dominant in the resistance behavior of the matrix (weaker and more porous). In Figure 7, the samples RCM50 (Figure 7b) and RCM100 (Figure 7b) are shown; in both cases the ITZ is wider and G is disperse and non-homogeneous; in particular, in Figure 7b, a zone of high porosity can be seen around the CA, as well as the presence of microfissures (marked in the circumferences). Figure 8 shows the location of the most usual components in mortar chemistry for the two samples referred to; the images were obtained through mapping and microanalysis by X-ray diffraction (XRD) connected to the SEM used. The preferred location refers directly to the origin of the CA, and the degree and chemical composition of the hydration attained by G and its porosity; they are distinguished by the juxtaposition in the images of the increase of the ITZ (in Figure 8a,b for the compounds Al and Si, respectively) as well as an important number of microfissures (bad adherence) in the RCM with high contents (see Figure 7b).

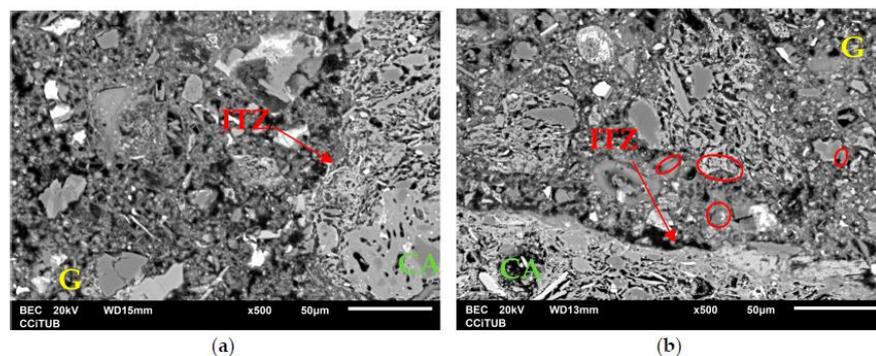


Figure 7. SEM of: (a) RCM50 (50% of CA); and (b) RCM100 (100% of CA).

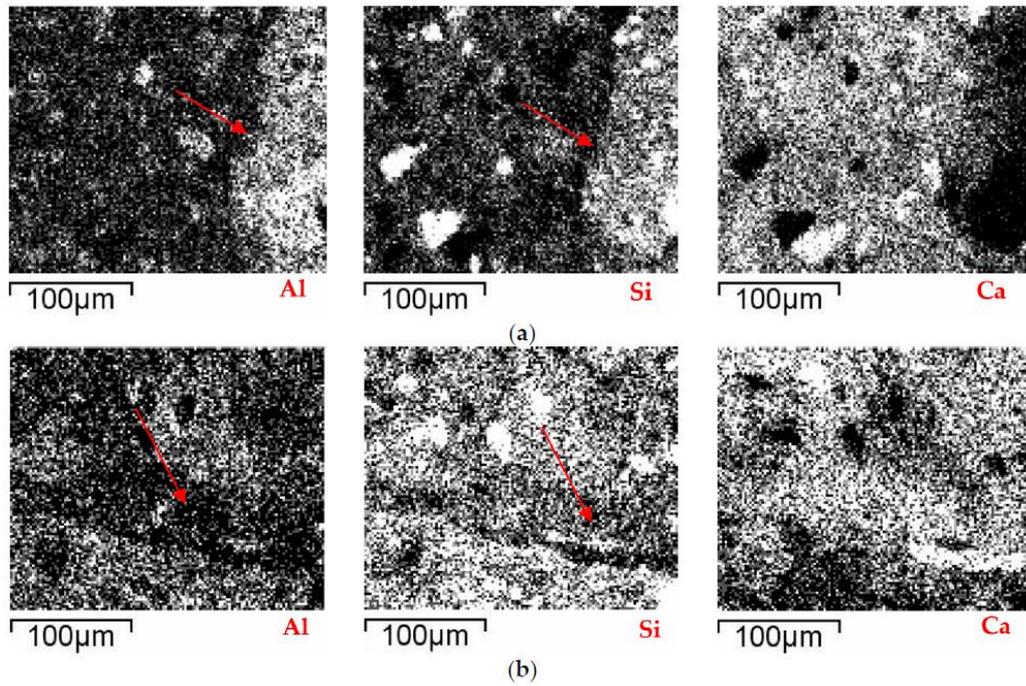


Figure 8. Microanalysis of components by mapping in SEM of the majority compounds: (a) RCM50; and (b) RCM100.

3.3. Calculation of E

Figure 9 shows the curves corresponding to the RCM with the different percentages of the studied CA, up to a stress level equal to σ_{max} . The E is determined from these curves (see test details).

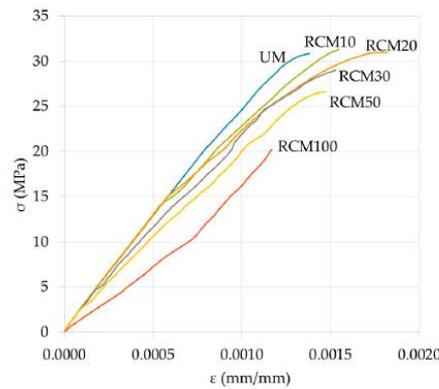


Figure 9. σ - ϵ curves of the RCM.

In general, it can be seen that the RCM10 and RCM20 show similar values to UM (similar behavior to fm); and with regard to the rest of the mixtures (CA content $\geq 30\%$), the E shows inversely proportional losses. Specifically, for the RCM10 there is an increase of 1%, while the RCM20 has the same value of E (when compared to the reference); for RCM with 30%, 50% and 100%, the values of E suffered decreases of 8%, 17% and 46%, respectively. With the exception of RCM20, the rest of the

study variables exceeded the test variability and can therefore be considered variations of the XX% of the RCM studied.

The above-mentioned trends are coherent with previous works (the case of using CA to replace cement) with different levels of loss of E (the maximum was 41% at 70 days) [9]. Similarly, substitutions of 0%, 10%, 20%, 30% and 40% of CA by UA with w/c mixtures of 0.4 and 0.5 show decreases of 3%, 5%, 7% and 9% at 28 days with $w/c = 0.5$; while for mortars with 10% and 20% of CA and $w/c = 0.4$ increases of 1% and 2% respectively were obtained [12], similar to this study. However, Higashiyama et al. [24] obtained values of E higher than the reference (2% and 5%) in mortars with 100% of CA and with 10% and 20% of CePo as a cement replacement.

Compared with studies where percentages of the UA were replaced by CA (similar to this one), the results were contradictory; RCM with 10% of CA ($c/a = 1:6$ and $1:4$; at ages of 2–5 months) showed losses of 18% and 17%, respectively (similar values for the effect of c/a). The explanation for this was attributed to the forming of cracks, given that a lower value of E permits lower internal tensions for identical deformations [20]. Similarly, in another work by the same author, with replacement of 50% of CA by UA ($c/a = 1:4$ at ages of two and five months), the resulting losses were of 40% regarding the reference samples [18].

To sum up, it can be said that in this study the behavior of E is similar, in terms of its origin, its implications and its justification (the effect of the CA on the RCM), to the previously mentioned case of the property of f_m (correlated and coherent properties, as occur in the UM). However, it should be pointed out that in the previous works in which the E of the RCM was studied [18,19], this was determined by means of resonance vibration frequency according to the French norm NF B10-511F [50]. This involved causing the specimen to vibrate until the resonance frequency was obtained, with which it was then possible to determine the dynamic elasticity modulus through an established equation. Consequently, the scarcity of studies that obtain the E of RCM by means of the σ - ε curve is patent. As this provides knowledge to this field of study, a cautious comparison of the various studies is required until further data are obtained.

From the curves in Figure 9, the previously mentioned procedures were carried out in order to establish the behavior properties of σ - ε of the RCM (see Table 4, average values of each test and its standard deviation). It can be appreciated that for T the values obtained have two clearly defined zones, limited by RCM20: before it, increases of up to 49% are seen (the pozzolanic reaction effect of the CA); after it (high CA contents) the losses are of up to 55% (RCM100), in both cases regarding UM. Concerning U_r , the observed behavior is similar to that of T , with the difference that after RCM20 the losses are not proportional (linear decrease of T); meanwhile, in the case of U_r they undergo acceleration with the increase of CA. Therefore it can be expected that in the elastic range of the RCM the effect of the increase of CA will make it more likely for them to have a normal behavior or one similar to a UM. Regarding $\varepsilon_{\text{elastic}}$, the values obtained from the different RCM may all be considered as constants (0.0005 mm/mm), thereby establishing this as the reference value for the use, design and calculation of mortar applications. For the RCM, regarding the ε_{max} , the increases obtained with respect to $\varepsilon_{\text{elastic}}$ are on average 3.15 times bigger, with the greatest increase being in RCM20 (limit of the zone with pozzolanic reaction, with 3.92 times more). This means that the RCM would have a plastic deformation capacity of between 1.48 and 3.12 times more than, for example, the usual concrete; and comparing the average of all RCM with respect to the UM, the former will show 0.43 times less deformation. Therefore, it can be said that the RCM have a tendency to show more fragile failures than the UM. Finally, as regards the E_0 , there is an evident loss of rigidity for all the CA contents, which is correlational with the increase of the CA content.

Table 4. Properties of σ - ε of the RCM.

Study Variables	fm (MPa)	0.40 fm (MPa)	E (MPa)	T (MPa)	U_r (MPa)	$\varepsilon_{\text{elastic}}$ (mm/mm)	$\varepsilon_{\text{max.}}$ (mm/mm)	E_0 (MPa)
UATM	28.77 ± 2.28	11.51 ± 0.91	26252 ± 41	0.024 ± 1.8 × 10 ⁻⁴	0.003 ± 2.53 × 10 ⁻⁴	0.0004 ± 2.18 × 10 ⁻⁵	0.0014 ± 2.03 × 10 ⁻⁵	23619 ± 1004
CRM10	30.58 ± 1.12	12.23 ± 0.45	26514 ± 53	0.029 ± 1.77 × 10 ⁻³	0.003 ± 7.29 × 10 ⁻⁵	0.0005 ± 6.46 × 10 ⁻⁶	0.0016 ± 6.53 × 10 ⁻⁵	21710 ± 520
CRM20	30.95 ± 1.44	12.38 ± 0.58	26251 ± 31	0.035 ± 7 × 10 ⁻⁴	0.003 ± 1.4 × 10 ⁻⁴	0.0005 ± 2 × 10 ⁻⁵	0.0018 ± 3.1 × 10 ⁻⁵	20249 ± 542
CRM30	30.10 ± 0.99	12.04 ± 0.40	24064 ± 6	0.025 ± 1.97 × 10 ⁻⁴	0.003 ± 8.92 × 10 ⁻⁵	0.0005 ± 1.45 × 10 ⁻⁵	0.0016 ± 3.46 × 10 ⁻⁵	21107 ± 304
CRM50	26.76 ± 2.48	10.71 ± 0.99	21731 ± 25	0.022 ± 5 × 10 ⁻⁴	0.003 ± 1 × 10 ⁻⁴	0.0005 ± 2.98 × 10 ⁻⁵	0.0015 ± 2.06 × 10 ⁻⁶	18940 ± 745
CRM100	20.56 ± 0.34	8.23 ± 0.14	14194 ± 30	0.010 ± 8 × 10 ⁻⁴	0.002 ± 1.5 × 10 ⁻⁴	0.0005 ± 3 × 10 ⁻⁵	0.0012 ± 2 × 10 ⁻⁵	15891 ± 643

Figure 10 shows the graphs corresponding to the results of σ - ϵ obtained from the RCM and the equations which best adjust the trends (coefficient of determination) referring to the replacement factor (RF , where $RF = \text{content of CA}/100$); the use of these correlations was decided upon in order to show the significance of the RF with respect to the properties of the RCM. As can be seen, the graphs in Figure 10a–c and the variable ϵ_{max} in Figure 10d generally tend to reduce their values as the RF increases, their best fitting curves being represented by second degree polynomial equations. Specifically, if the equations are aimed at the particular behavior of the properties studied, they could even establish two markedly different zones; for low RF (≤ 0.20) the RCM properties show values similar to—and even greater than—those of the UM, while for $RF \geq 0.20$ the trend could be represented by a decreasing linear equation. Finally, in the case of $\epsilon_{\text{elastic}}$ (Figure 10d), in contrast to all of the others, the RF effect generates a generally increasing equation.

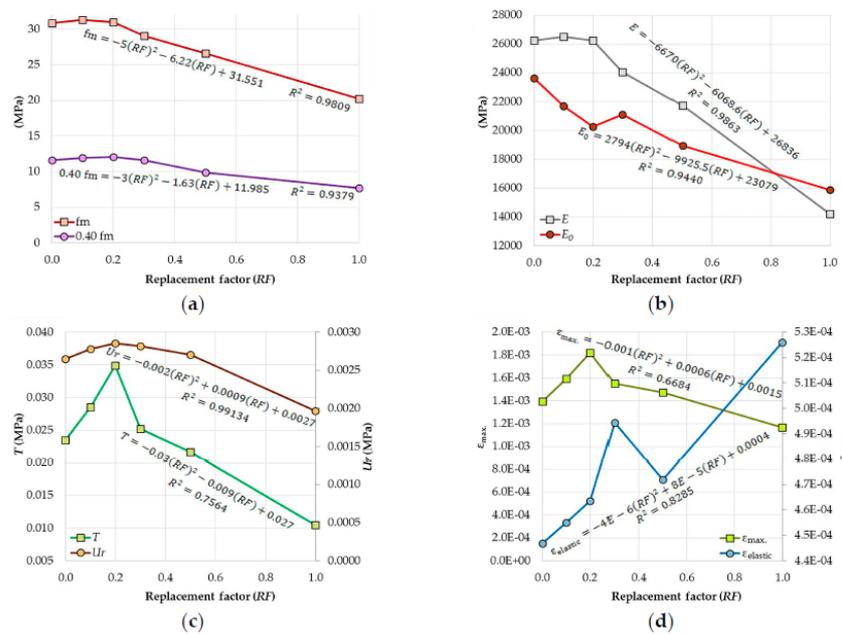


Figure 10. Graphs of the different properties of the RCM vs. RF : (a) RF vs. f_m and $0.4 f_m$; and (b) RF vs. E and E_0 ; (c) RF vs. T and U_r ; (d) RF vs. ϵ_{max} and $\epsilon_{\text{elastic}}$.

3.4. Determining the Prediction Equations of the RCM

Once the physical, mechanical and σ - ϵ behavior of the different RCM had been obtained, the objective became the study and establishment of the prediction equations of behavior by means of the prescription, use and determination of the relationship of their properties, as well as the proposal of new coefficients (proper to the RCM). Similarly, numerical equations describing the curve, both in the elastic and plastic range up to the failure load, were determined for all the variables studied.

In order to obtain the prediction equations various pre-existing configurations for the usual concrete were evaluated, intending to optimize their adaptation to mortars and recycled materials; similarly (taking the previously acquired physical and mechanical properties into account) new combinations were also evaluated with the aim of finding those which best described and predicted the σ - ϵ behavior of the RCM. Finally, apart from establishing the refined prediction equations (PE_r) (for each XX% studied in this research), these were distinguished by means of correction coefficients (C_c); thus aiding their exactitude and precision in predicting the RCM.

To obtain them, it was necessary to use algorithms of numerical approximation by sequencing in cycles with correction criteria known as optimizers, in particular those provided by Solver [51].

This software forms part of the command or scenario analysis tools that aid in choosing the best method to make or determine a behavior law. Specifically, using Solver it was possible to find the theoretical constants (T_C) of the conceptual models or predictive equations that represented the behavior of the real values obtained in the experimental campaign. Once the logical conditions (or limitations) of the test had been satisfied and the studio series validations had been carried out, the results obtained from the process were the coefficients that satisfied these pre-established limits. The process included:

Defining the proposed configuration to be solved (objective equation, O_E). The order, position and variables to be considered were tested according to pre-established logical criteria of the UM behavior, as observed in Equation (4).

$$O_E = (T_C) \times \text{Study configuration} \quad (4)$$

where T_C is conditioned to be a whole value.

The PE_r to be determined was prescribed with two coefficients or adjustment constants: the first constant (T_C) was limited by the maximum and minimum possible values of the particular evaluation of each group of experimental values obtained (established on the basis of data in Table 4), and when possible this coefficient was forced to be a whole number (simplicity in the equation); the second constant, C_C , corresponds to a refining of the O_E , allowing it to be sensitive to XX%; see Equation (5).

$$PE_r = (T_C) \times (C_C) \times \text{Study configuration} \quad (5)$$

Stringent conditions for analysis were limited to the following: the values of the variables considered in the O_E were limited by the maximum and minimum of each real experimental result (Table 4); the value of O_E with which the adjustment process was initiated was tested with four possible approximation processes: maximum and minimum values, average total value and the average of the maximum and minimum extremes; and all were obtained from the real experimental campaign. As an algorithm or method of solving the O_E , of the algorithms available (non-linear method: for adjusting softened non-linear behavior; simple method: for adjusting linear problems; and the evolutionary method: for non-linear and disperse behavior), the non-linear method was used, as it was closest to the behavior of the real experimental values.

Finally, the following specifications were defined as parameters of the iteration of the applied algorithm: the minimum acceptable value of error in the convergence of the O_E equal to or less than 0.0001 (average figure of the last five iterations); evaluation of the iterations $i + 1$: it was established that the new value of the variables to be tested should be determined by means of a forward difference approximation; and finally the initial test values of the variables to be evaluated in the O_E were set as equal for all, with a value equal to zero (hypothesis of test values corresponding to the same study phenomenon).

When the O_E with its constant T_C has been obtained, the value of the distinctive constant C_C is determined from the relationship between the real experimental value for each sample with different XX% and the theoretical value of the established O_E ; giving as a result as many O_E (with distinctive C_C) as RCM studied, with Equation (6).

$$C_C = \text{real experimental value of the CRMXX\%/value obtained from the } O_E \quad (6)$$

where $0 \leq \text{XX\%} \leq 100$.

These O_E with distinctive C_C (PE_r) were compared with the real experimental values, the difference being called the Error Differential (E_D) of exactitude obtained from Equation (7).

$$E_D = PE_r - \text{real value of the experimental campaign for each CRMXX\%} \quad (7)$$

where $0 \leq \text{XX\%} \leq 100$.

Taking into account the group of the E_D established for each PE_r and real test, their standard deviation, S , was determined with Equation (8) and the Relationship (R) of the average of E_D (\bar{X}) with respect to the average of the real experimental values (\bar{X}_r) (in percentage, see Equation (9)). It is the criteria (S and R) and the agreement between the experimental and simulated group which define, firstly, the criteria for determining the best approximation process for configuring the target equation analyzed and, secondly, those for choosing, from the different configurations, the O_E which is the most appropriate, accurate and similar to the real experimental values.

$$S = \sqrt{\sum_{XX\%=0}^{XX\%=100} (X_{XX\%} - \bar{X})^2 / n - 1} \quad (8)$$

where n is the number of real tests carried out; \bar{X} the average of the E_D and X the E_D for each $XX\%$ of the study.

$$R (\%) = (\bar{X} / \bar{X}_r) \times 100 \quad (9)$$

where \bar{X} is the average of the E_D and \bar{X}_r the average of the real experimental values.

From the results of the previous procedures for obtaining the PE_r , the following equations were established:

The static modulus of elasticity of Equation (10), established by means of the real properties of f_m and ρ , and being defined as PE_r through the use of the C_C (see Table 5, in column E) for each RCM. The coefficients C_C from $XX\% \geq 30$ show significant reductions which will establish differences in the PE_r .

$$E = 5521C_C \times \sqrt{0.40 f_m \times \rho} \quad (10)$$

In the specific case of the $\varepsilon_{\text{elastic}}$, it was decided to establish two types of PE_r , as the real experimental results did not converge satisfactorily for all the RCM studied; therefore, first Equation (11) is valid for $0 \leq XX\% \leq 30$, and Equation (12) is applied for $30 \leq XX\% \leq 100$. In both cases, the equations follow similar proposals of variables, and the C_C constants to be used for each RCM may be found in Table 5, column $\varepsilon_{\text{elastic}}$.

$$\varepsilon_{\text{elastic}} = C_C \times 0.40 f_m / E \quad (11)$$

$$\varepsilon_{\text{elastic}} = 0.007C_C \times 0.40 f_m / \sqrt{E} \quad (12)$$

Regarding the U_r , the proposed Equation (13), along with the coefficient C_C of Table 5 column U_r , allows the capacity of the different RCM to absorb or transform the energy or workload to be established. In the particular case of $C_C = 100\%$, this is the coefficient that can cause greatest variation in this property.

$$U_r = 5C_C \times 0.40 f_m / E \quad (13)$$

For property T , Equation (14) has been formulated, based on a formulation of the area of a triangle, which, along with the coefficients C_C , allows it to be refined for the different RCM.

$$T = 0.62C_C \times f_m \times \varepsilon_{\text{max}} \quad (14)$$

The graph in Figure 11 shows the proposed prediction equation of E for the RCM (10), as well as the real experimental values of the research campaign. The equation chosen was that which achieved the best convergence, and graphically it is closer to the line of the real experimental values (see the other equations considered). Similarly, the graph shows the results of other previously-mentioned studies; although, unfortunately, these were proposed with different variables and parameters (shown in the graph), which makes it difficult for the proposed equation to fit (or explain) all of them, although the trend is similar in several [18–20]. Further research will be necessary, and new simulations with different adjustment and refinement parameters should be performed. The established equation, therefore, could be applied to predicting E in the RCM with a c/a close to 1:4, for density values of

the RCM in hardened state between $1.95 \leq \rho \leq 1.53 \text{ kg/cm}^3$ and for replacement values of UA by CA between $0 \leq \text{XX}\% \leq 100$.

Table 5. C_C values for application in PE_r equations of the RCM.

Study Variables	Corrector Coefficient (C_C for Mechanical Properties of RCM)			
	E	$\epsilon_{\text{elastic}}$	U_r	T
UM	0.9817	0.9380	1.0086	0.6651
RCM10	0.9915	0.9553	1.0572	0.8075
RCM20	0.9817	0.9734	1.0855	0.9880
RCM30	0.8999	1.0380	1.0716	0.7127
RCM50	0.8126	0.9910	1.0291	0.6129
RCM100	0.5308	1.1043	0.7480	0.2968

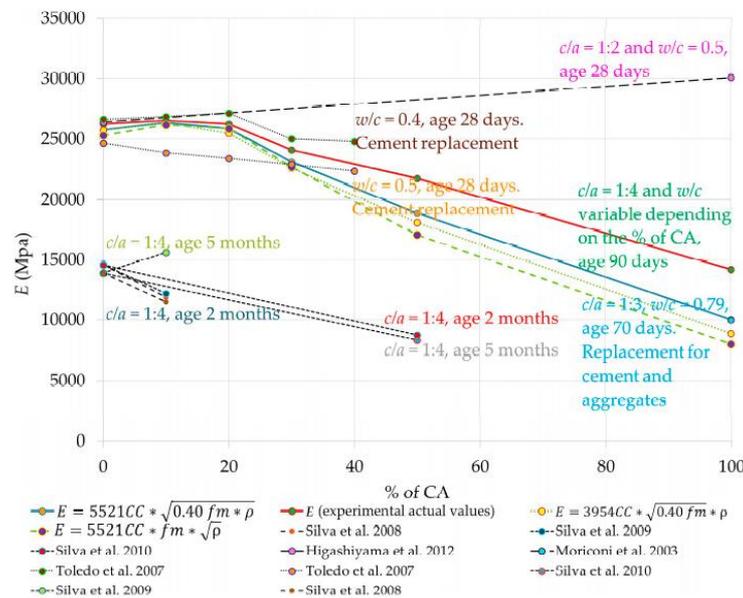


Figure 11. E prediction equation for RCM confronted with real experimental data, and reported in other investigations.

Table 6 shows the real experimental values of the properties studied, as well as the theoretical data calculated from the previously established simulation Equations (10)–(14). This table allows comparison of the approximations and the exactitude obtained by use of the behavior prediction equations of the RCM.

Table 6. Values of the experimental properties and those determined through simulation.

Study Variables	E (MPa)		$\epsilon_{\text{elastic}}$ (mm/mm)		U_r (MPa)		T (MPa)	
	Expt.	Simul.	Expt.	Simul.	Expt.	Simul.	Expt.	Simul.
UM	26,252	25,771	0.0004	0.0004	0.003	0.002	0.024	0.018
RCM10	26,515	26,334	0.0005	0.0004	0.003	0.002	0.029	0.025
RCM20	26,251	25,493	0.0005	0.0004	0.003	0.002	0.035	0.035
RCM30	24,065	22,578	0.0005	0.0005	0.003	0.003	0.025	0.020
RCM50	21,731	18,127	0.0005	0.0005	0.003	0.002	0.022	0.015
RCM100	14,194	8883	0.0005	0.0005	0.002	0.002	0.010	0.004

Finally, the analytical expression of the curve of the σ - ε relationship of the RCM studied was obtained with the results of Table 4 (values of E and E_0), using in its conception the proposal by Fanella and Naaman [47] for this objective (Equation (15)).

$$Y = [AX + BX^2/1 + CX + DX^2] \quad (15)$$

In the previous equation, the constants of use (A , B , C and D , see Equations (16)–(19)) are established, between the proportions of the mechanical properties of the RCM and those of the mathematical and geometrical parameters that produce the curve of an equation fitting the behavior of σ - ε ; and X is the value of the deformation in the graph of the real experimental E for the particular point to be determined on the theoretical curve.

$$A_1 = E/E_0 \quad (16)$$

$$B_1 = 0.45 - 0.41/A_1 + 0.20/A_1^2 \quad (17)$$

$$C_1 = A_1 - 2 \quad (18)$$

$$D_1 = B_1 + 1 \quad (19)$$

Using Equation (15) to define the curve of the behavior to be studied and the real experimental values of the RCM, Equation (20) (O_E) is defined, which has the constant belonging to the RCM (T_C) family of data (see Table 7); its determination was obtained through a similar calculation process with the Solver tool.

$$O_E = (T_C) \times [AX + BX^2/1 + CX + DX^2] \quad (20)$$

where X is equal to ε .

To achieve better prediction of the different RCM, a PE_r (Equation (21)) has been established by means of the particular constants C_C (Table 8) of each XX%, to which the previously indicated process was applied.

$$PE_r = (T_C) \times (C_C) \times [AX + BX^2/1 + CX + DX^2] \quad (21)$$

Once the processes had been carried out, it was necessary to establish three different equations (and T_C) to better adjust the numerical predictions to the real experimental results: two equations were established with respect to the prediction of σ in the σ - ε curve of the RCM until the elastic range (σ_{elastic}); one for $0 \leq \text{XX}\% \leq 50$ and another for $\text{XX}\% = 100$. For σ of the curve to maximum of failure (σ_{max}), a single equation was established for all of the XX% (of less precision) (see Tables 7 and 8).

Table 7. Values of the constants for each of the curves.

PE_r of the Curve σ - ε	Application	T_C (for the σ - ε Curve of the RCM)	A	B	C	D
PE_r for σ_{elastic}	$0 \leq \text{XX}\% \leq 50$	16,337	0.893	0.242	-0.704	1.253
PE_r for σ_{elastic}	$\text{XX}\% = 100\%$	16,337	1.245	0.253	-0.704	1.242
PE_r for σ_{max}	$0 \leq \text{XX}\% \leq 100$	13,113	1.179	0.253	-0.704	1.242

Table 8. Values C_C for the different percentages of CA.

XX%	Corrector Coefficient (C_C for σ - ε Curve of the RCM)	
	C_C for PE_r up to σ_{elastic}	C_C for PE_r up to σ_{max}
0	1.7739	1.0962
10	1.8005	1.1126
20	1.7788	1.0992
30	1.6677	1.0306
50	1.5276	0.9440
100	0.7174	0.7174

The σ - ϵ curves of the RCM studied by means of the previously-determined simulation equations are shown in Figure 12. In both cases, their profiles maintain the order established according to XX% used; likewise, establishing a grouping between the curves showing similar behavior ($0 \leq XX\% \leq 20$), afterwards distancing them proportionally in accordance with XX% ($30 \leq XX\% \leq 100$).

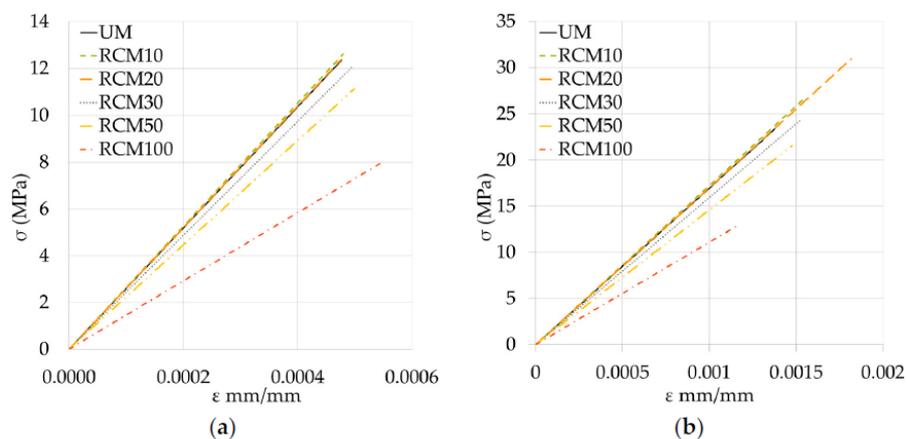


Figure 12. Curve σ - ϵ simulated for the RCM: (a) up to σ_{elastic} ; and (b) up to σ_{max} .

4. Conclusions

Based on the experimental data obtained and the numerical processes carried out, the following conclusions can be presented:

The density of the RCM is less than that of the UM, this being inversely correlative to the content of CA; this reduction in density has been attributed to the low density of the CA.

The behavior of the mechanical property of fm responds to three different groupings in terms of CA replacement: with small replacements (10% to 20%), the RCM show similar behavior, even managing to occasionally exceed the UM; for intermediate content replacements (30% to 50%), losses in strength of between 6% and 14% may occur; and, finally, for a total replacement, the losses can be significant with respect to the UM (35% less). In the previous behavior, the study of the ITZ in SEM images validates the hypothesis that the strength increases of the RCM can be attributed to the possible pozzolanic reaction of the CA, causing a “filling” effect in the matrix and reducing its porosity; on the contrary, a less dense ITZ can be seen for high contents, possibly meaning greater porosity in this area, which, combined with the low density of the aggregates, leads to a lower fm in RCM with high contents. Similarly, it has been shown that the mineralogical composition (established by means of XRD) of the CA is not involved in the possible later variations in the RCM behavior.

The σ - ϵ behavior of RCM is similar to that shown by UM, and is the closest to the RCM10 and RCM20; in the case of σ , the RCM10 obtained values even higher than the UM. As for ϵ , this increases as the percentage of CA is increased, up to a maximum of 20%; with CA contents $CA \geq 30\%$, losses inversely proportional to the content of the CA are obtained. The results of E , obtained from the σ - ϵ curves, show similar behavior to that shown by the property of fm; for the RCM10 an increase of 1%, for the RCM20 values similar to the UM, and for RCM with $CA \geq 30\%$ the losses are established in the range of 8% to 46%. The previous behavior has been validated as part of the variables studied, and not as the result of its statistical variability, thus lending strength to the research.

The results of the properties of the RCM that were obtained by means of the σ - ϵ curves have shown increases, while the CA content has been increased until 20%; when the replacement passes 30% the values of each of the properties is inferior regarding the UM. This data has made it possible to formulate predictive equations regarding the percentage of CA, which (quickly and simply) provide values close to the different RCM.

By means of numerical analysis, two constants for use in predictive equations have been obtained, which allow the different properties of the RCM to be related; the first of them is the theoretic constant which represents the behavior of the real values obtained during the experimental campaign of the CA, and the other allows exactitude and precision for each of the RCM with its respective percentage of CA. Specifically, for the predictive equation of E , this cannot be corroborated by using the results of previous studies, as these have been proposed with different variables and parameters, although in some cases similar trends are evident.

The analytical expressions obtained from the σ - ϵ curve of the studied RCM allow the curves in the elastic range to be predicted, up to their failure point; thereby easing the study, design and calculation of the constructive elements that include these mortars.

Acknowledgments: The authors thank CONACYT for its doctoral scholarship program, the Polytechnic Higher School of Building Construction of Barcelona-UPC, the Department of Architectonic Constructions II-EPSEB-UPC, the School of Engineering Mochis-UAS and, finally, the program of Young Doctors-UAS.

Author Contributions: José Manuel Gómez-Soberón the research concept and design; Francisca Guadalupe Cabrera-Covarrubias, José Manuel Gómez-Soberón, Jorge Luis Almaral-Sánchez, Susana Paola Arredondo-Rea, María Consolación Gómez-Soberón and Ramón Corral-Higuera the collection and/or assembly of data; Francisca Guadalupe Cabrera-Covarrubias, José Manuel Gómez-Soberón, Susana Paola Arredondo-Rea, María Consolación Gómez-Soberón the data analysis and interpretation; Francisca Guadalupe Cabrera-Covarrubias, José Manuel Gómez-Soberón the writing the article; Jorge Luis Almaral-Sánchez, Ramón Corral-Higuera the critical revision of the article; José Manuel Gómez-Soberón, Jorge Luis Almaral-Sánchez the final approval of article.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Abbreviations

The following abbreviations are used in this manuscript:

σ - ϵ	Stress-strain
CA	Recycled aggregates of ceramic
UA	Usual aggregates
RCM	Recycled ceramic mortars
CePo	Ceramic powder
c/a	Cement/aggregate
w/c	Water/cement
fm	Compressive strength
PS	Particle size
E	Module of elasticity or Young
$\epsilon_{\text{elastic}}$	Elastic deformation
0.40 fm	40% of the maximum load of failure
ϵ_{max}	Maximum deformation of failure
U_r	Resiliency
T	Toughness
M_{OD}	Bulk density in oven-dry condition
M_{SSD}	Bulk density in saturated-surface-dry condition
D_{OD}	Density in oven-dry condition
D_{SSD}	Density in saturated-surface-dry condition
UM	Usual mortar
SEM	scanning electron microscope
G	Grout
ITZ	Interfacial transition zone
XRD	X-ray diffraction
RF	Replacement factor
PE_r	Refined prediction equations
C_c	Correctors coefficients
T_c	Theoretical constants
O_E	Objective equation
E_D	Error Differential
S	Standard deviation
σ_{elastic}	Stress in the elastic range
σ_{max}	Up to maximum stress of failure

References

1. Higashiyama, H.; Yamauchi, K.; Sappakittipakorn, M.; Sano, M.; Takahashi, O. A visual investigation on chloride ingress into ceramic waste aggregate mortars having different water to cement ratios. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *40*, 1021–1028. [[CrossRef](#)]
2. Lavat, A.E.; Trezza, M.A.; Poggi, M. Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture. *Waste Manag.* **2009**, *29*, 1666–1674. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
3. Lázaro, C.; Trilles, V.R.; Gómez, F. Incorporación de residuos derivados de la fabricación cerámica y del vidrio reciclado en el proceso cerámico integral. *Bol. Soc. Española Cerám. Vidr.* **2012**, *51*, 139–144. [[CrossRef](#)]
4. Corinaldesi, V. Environmentally-friendly bedding mortars for repair of historical buildings. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *35*, 778–784. [[CrossRef](#)]
5. Wild, S.; Khatib, J.M.; O'Farrell, M. Sulphate resistance of mortar, containing ground brick clay calcined at different temperatures. *Cem. Concr. Res.* **1997**, *27*, 697–709. [[CrossRef](#)]
6. O'Farrell, M.; Wild, S.; Sabir, B.B. Resistance to chemical attack of ground brick-PC mortar Part I. Sodium sulphate solution. *Cem. Concr. Res.* **1999**, *29*, 1781–1790. [[CrossRef](#)]
7. O'Farrell, M.; Wild, S.; Sabir, B.B. Resistance to chemical attack of ground brick \pm PC mortar Part II. Synthetic seawater. *Cem. Concr. Res.* **2000**, *30*, 757–765. [[CrossRef](#)]
8. O'Farrell, M.; Wild, S.; Sabir, B.B. Pore size distribution and compressive strength of waste clay brick mortar. *Cem. Concr. Compos.* **2001**, *23*, 81–91. [[CrossRef](#)]
9. Moriconi, G.; Corinaldesi, V.; Antonucci, R. Environmentally-friendly mortars: A way to improve bond between mortar and brick. *Mater. Struct.* **2003**, *36*, 702–708. [[CrossRef](#)]
10. Turanlı, L.; Bektas, F.; Monteiro, P.J.M. Use of ground clay brick as a pozzolanic material to reduce the alkali-silica reaction. *Cem. Concr. Res.* **2003**, *33*, 1539–1542. [[CrossRef](#)]
11. O'Farrell, M.; Sabir, B.B.; Wild, S. Strength and chemical resistance of mortars containing brick manufacturing clays subjected to different treatments. *Cem. Concr. Compos.* **2006**, *28*, 790–799. [[CrossRef](#)]
12. Toledo Filho, R.D.; Gonçalves, J.P.; Americano, B.B.; Fairbairn, E.M.R. Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil. *Cem. Concr. Res.* **2007**, *37*, 1357–1365. [[CrossRef](#)]
13. Puertas, F.; García-Díaz, I.; Palacios, M.; Martínez-Ramírez, S. Empleo de residuos cerámicos como materia prima alternativa para la fabricación de clínker de cemento portland. *Cem. Hormigón* **2007**, *907*, 20–34.
14. Pereira-de-Oliveira, L.A.; Castro-Gomes, J.P.; Santos, P.M.S. The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *31*, 197–203. [[CrossRef](#)]
15. Wang, G.; Tian, B. Effect of Waste Ceramic Polishing Powder on the Properties of Cement Mortars. In Proceedings of the International Conference on Energy and Environment Technology ICEET'09, Guilin, China, 16–18 October 2009; IEEE Computer Society: Washington, DC, USA, 2009; pp. 101–104.
16. Kumavat, H.R.; Sonawane, Y.N. Feasibility Study of Partial Replacement of Cement and Sand in Mortar by Brick Waste Material. *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.* **2013**, *2*, 17–20.
17. Bektas, F.; Wang, K.; Ceylan, H. Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability. *Constr. Build. Mater.* **2009**, *23*, 1909–1914. [[CrossRef](#)]
18. Silva, J.; Brito, J.; Veiga, R. Recycled Red-Clay Ceramic Construction and Demolition Waste for Mortars Production. *J. Mater. Civ. Eng.* **2010**, *22*, 236–244. [[CrossRef](#)]
19. Silva, J.; Brito, J.; Veiga, R. Incorporation of fine ceramics in mortars. *Constr. Build. Mater.* **2009**, *23*, 556–564. [[CrossRef](#)]
20. Silva, J.; Brito, J.; Veiga, R. Fine ceramics replacing cement in mortars Partial replacement of cement with fine ceramics in rendering mortars. *Mater. Struct.* **2008**, *41*, 1333–1344. [[CrossRef](#)]
21. Ay, N.; Ünal, M. The use of waste ceramic tile in cement production. *Cem. Concr. Res.* **2000**, *30*, 497–499. [[CrossRef](#)]
22. Jiménez, J.R.; Ayuso, J.; López, M.; Fernández, J.M.; Brito, J. Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *40*, 679–690. [[CrossRef](#)]
23. Corinaldesi, V. Mechanical behavior of masonry assemblages manufactured with recycled-aggregate mortars. *Cem. Concr. Compos.* **2009**, *31*, 505–510. [[CrossRef](#)]

24. Higashiyama, H.; Yagishita, F.; Sano, M.; Takahashi, O. Compressive strength and resistance to chloride penetration of mortars using ceramic waste as fine aggregate. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *26*, 96–101. [[CrossRef](#)]
25. Gesoğlu, M.; Güneysi, E.; Özturan, T. Effects of end conditions on compressive strength and static elastic modulus of very high strength concrete. *Cem. Concr. Res.* **2002**, *32*, 1545–1550. [[CrossRef](#)]
26. Demir, F.; Korkmaz, K.A. Prediction of lower and upper bounds of elastic modulus of high strength concrete. *Constr. Build. Mater.* **2008**, *22*, 1385–1393. [[CrossRef](#)]
27. Suto, H. Relation between Modulus of Elasticity and Compressive Strength of Ultrahigh-Strength Mortar with Mixed Silicon Carbide as Fine Aggregate. *J. Mater. Sci. Technol.* **2001**, *17*, 579–580.
28. Zhou, J.; Chen, X. Stress-Strain Behavior and Statistical Continuous Damage Model of Cement Mortar under High Strain Rates. *J. Mater. Civ. Eng.* **2013**, *1*, 120–130. [[CrossRef](#)]
29. Martínez, P.; Azuaga, M. Medición del Módulo de Elasticidad de Young. Available online: http://www.fisicarecreativa.com/informes/infor_mecanica/young97.pdf (accessed on 10 January 2016).
30. Candelario, M.P. Propiedades Mecánicas de los Materiales. *METALOGRAFÍA—UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA*. Available online: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/2-propiedades-mecanicas-de-los-materiales/> (accessed on 4 April 2015).
31. Lima, P.R.L.; Toledo, R.D.; Melo, J.A. Compressive Stress-strain Behaviour of Cement Mortar-composites Reinforced with Short Sisal Fibre. *Mater. Res.* **2014**, *17*, 38–46. [[CrossRef](#)]
32. Serrano-Guzmán, M.F.; Perez-Ruiz, D.D. Análisis de sensibilidad para estimar el módulo de elasticidad estático del concreto. *Concr. Cem. Investig. Desarro.* **2010**, *2*, 17–30.
33. *Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar*; ASTM C144-99; American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA, USA, 1999.
34. *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption*; ASTM C128-04a; American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA, USA, 2004.
35. *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*; ASTM C136-06; American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA, USA, 2006.
36. *Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral*; ASTM C117-95; American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA, USA, 1995.
37. *Parte 1: Composición, Especificaciones y Criterios de Conformidad de los Cementos Comunes*; AENOR, UNE-EN 197-1; Asociación Española de Normalización y Certificación: Madrid, España, 2011.
38. Sagoe-Crentsil, K.K.; Brown, T.; Taylor, A.H. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cem. Concr. Res.* **2001**, *31*, 707–712. [[CrossRef](#)]
39. García-González, J.; Rodríguez-Robles, D.; Juan-Valdés, A.; Morán del Pozo, J.M.; Guerra-Romero, M.I. Pre-saturation technique of the recycled aggregates: Solution to the water absorption drawback in the recycled concrete manufacture. *Materials* **2014**, *7*, 6224–6236. [[CrossRef](#)]
40. *Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*; ASTM C305-06; American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA, USA, 2006.
41. *Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement*; ASTM C230/C230M-03; American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA, USA, 2003.
42. *Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method*; ASTM C231-08b; American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA, USA, 2008.
43. *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*; ASTM C109/C109M-05; American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA, USA, 2005.
44. *Parte 10: Determinación de la Densidad Aparente en Seco del Mortero Endurecido*; AENOR, UNE-EN 1015-10; Asociación Española de Normalización y Certificación: Madrid, España, 2000.
45. *Determinación de la Densidad Real y Aparente y de la Porosidad Abierta y Total*; AENOR, UNE-EN 1936; Asociación Española de Normalización y Certificación: Madrid, España, 2007.
46. *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure)*; ASTM C349-97; American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA, USA, 1997.
47. Fanella, D.A.; Naaman, A.E. Stress-strain Properties of Fiber Reinforced Mortar in Compression. *ACI J.* **1985**, *82*, 475–483.
48. Ávila, O.; Carrillo, J.; Alcocer, S.M. Rehabilitación de muros de concreto usando CRFA: Ensayos en mesa vibradora. *Concreto Cem. Investig. Desarro.* **2011**, *2*, 2–17.

49. Corinaldesi, V.; Moriconi, G. Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. *Constr. Build. Mater.* **2009**, *23*, 289–294. [[CrossRef](#)]
50. *Norme Française Homologué, “Mesure du Module D’élasticité Dynamique”*; FNOR, NF B10-511; Association française de Normalisation: Paris, Francia, 1975.
51. FrontlineSolvers. Available online: <http://www.solver.com> (accessed on 1 July 2015).



© 2016 by the authors; licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

CAPÍTULO 5

Article

Metamorphosis in the Porosity of Recycled Concretes Through the Use of a Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) Additive. Correlations between the Porous Network and Concrete Properties

José Miguel Mendivil-Escalante ¹, José Manuel Gómez-Soberón ^{2,*}, Jorge Luis Almaral-Sánchez ¹ and Francisca Guadalupe Cabrera-Covarrubias ³

¹ Faculty of Engineering Mochis, Autonomous University of Sinaloa, Fuente de Poseidón y Ángel Flores s/n, Col. Jiquilpan, Module B2, Los Mochis, Sinaloa 81210, Mexico; josemiguelmendivil@hotmail.com (J.M.M.-E.); jalmaral@uas.edu.mx (J.L.A.-S.)

² Barcelona School of Building Construction, Polytechnic University of Catalonia, Av. Doctor Marañón 44-50, Barcelona 08028, Spain

³ Barcelona School of Civil Engineering, Polytechnic University of Catalonia, C. Jordi Girona 1-3, Building C2, Barcelona 08034, Spain; guadalupe.cabrera04@gmail.com

* Correspondence: josemanuel.gomez@upc.edu; Tel.: +34-934-016-242

Academic Editor: Rafael Luque

Received: 16 December 2016; Accepted: 7 February 2017; Published: 14 February 2017

Abstract: In the field of construction, sustainable building materials are currently undergoing a process of technological development. This study aims to contribute to understanding the behavior of the fundamental properties of concretes prepared with recycled coarse aggregates that incorporate a polyethylene terephthalate (PET)-based additive in their matrix (produced by synthesis and glycolysis of recycled PET bottles) in an attempt to reduce their high porosity. Techniques to measure the gas adsorption, water porosity, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and X-ray diffraction (XRD) were used to evaluate the effect of the additive on the physical, mechanical and microstructural properties of these concretes. Porosity reductions of up to 30.60% are achieved with the addition of 1%, 3%, 4%, 5%, 7% and 9% of the additive, defining a new state in the behavioral model of the additive (the overdosage point) in the concrete matrix; in addition, the porous network of these concretes and their correlation with other physical and mechanical properties are also explained.

Keywords: PET additives; recycled concrete; concrete porosity; polymeric resins; porosimetry of gas adsorption; acoustic resonance spectroscopy

1. Introduction

At its current level, the technological development of concrete is focused on the optimization of its characteristics, components and mechanical properties, particularly in their durability. Parallel to this development, a new sustainable concept for concrete has emerged, known as recycled concrete (RC), which is produced by the mixture of natural stone aggregates and recycled coarse aggregates from demolition waste (in specific of old concrete) (RA_{coarse}) agglutinated with a cement paste [1,2]. This development arose as an attempt to satisfy the current need for the use of construction waste [3,4] and the RC has been tested in various countries as a method of conserving natural resources, increasing the useful lifespan of sanitary landfills, and thus avoiding the exploitation of non-renewable natural resources [5].

There are several standards that regulate the use of RA_{coarse} for RC; they have been specified contents from 20% to 50% as the upper limit to use them [6–11]. The behavior of the RC in the fresh

state, reports a reduction of the workability, causing the need for more water in the mixing [12,13], and of previous saturation of them [14,15]. This performance is related to the composition of the RA_{coarse} [16] (usually 65%–70% of old natural aggregate and 30%–35% of old adhered mortar [17]), which, in turn, responds to its superior absorption capacity (between 5% and 15%) [17,18] and to the low density of RC [19,20] (between 2090 and 2392 kg/m³) [14,21,22].

The mechanical behavior of the RC indicates reductions in their compressive strength (between 5.7% and 40%) [21–28], directly related to the increase of their porosity and the creation of weak links in the cement matrix [29]. Similar behavior is reported for the modulus of elasticity (reductions between 4.17% and 45%) [20,30,31], which is explained because considering the RA_{coarse} as the weakest aggregates [20].

Regarding the durability of RC, its high porosity (between 3.9% and 22.6%) [21,32] implies a greater permeability of it, allowing to aggressive agents the possibility to access; therefore the evaluation of it (porosity) allows understanding its durability.

As an alternative for improving the properties of concrete and contributing to environmental sustainability, research is underway into the use of polyethylene terephthalate (PET) as a component of RC. This substance, via its transformation into an unsaturated polyester resin, could be used as an additive to improve the performance of RC [33]. It is frequently found in plastic bottles, which are widely used and are thus the cause of huge quantities of waste [34]. Regarding the technical aspects favoring its application, previous results have shown that this material may reach 80% of its final strength in just one day (interesting for concretes); however, it may also show strength losses if subjected to high temperatures (comparable with conventional concrete) [35]. New and more sustainable applications can be developed in order to reduce this waste, such as new polymer variants and textile applications, or its possible use as a densifier for concretes (new additives) [36].

Generally, the use of polymers to replace fractions of the aggregates in concretes began in the 1960s [37]. In particular, experiments were carried out on the partial substitution of fine aggregate by crushed polymers, obtaining lighter and more ductile concretes with greater resistance to penetration by chloride ions; on the other hand, the workability, compressive strength and resistance to attraction are properties which are weakened by the inclusion of polymers [38]. This can be explained by aspects of the PET's own resistance, as well as its capacity to bond with the other compounds within the matrix of the concrete. The maximum percentage permitted for the replacement of fine aggregate by PET granules was established as 25%, above which losses in compressive strength and the elasticity module must be expected (5.82% and 10.31% respectively) [39]; in this case it would seem that the beneficial effect of low dosages of PET are outweighed by the damaging effects of high contents.

On the other hand the uses of PET fiber in concrete, either as a reinforcement to improve the flexural and traction behavior or as an indirect improvement in mitigating the process of corrosion, have already been described in several studies [40–42]. In particular for the case of flexural strength—the most acceptable general application for obtaining greater benefits in behavior—it was established that polymer fibers bigger than 50 mm improved this property considerably, with the opposite occurring when they are smaller [43]; this can be understood as being due to the grip or binding effect (reduction of fissures) of the compounds that form the matrix towards the PET fiber when the system undergoes this mechanical effect. In the particular case of mortars containing fibers, it was established that their incorporation does not modify the compressive strength behavior, showing that contents of up to 1.5% fiber produce the best results [44]. On the other hand, the use of polypropylene/polyethylene polymeric hybrid fiber (contents below 2.9%) increases the compressive strength by up to 38%; this improvement is related to the roughness and size of the fibers used, which have a reinforcing effect in the matrix [45].

Nowadays, the evolution of the application of polymers in concretes has enabled the creation of a polymer-modified concrete (PMC), comprising conventional concrete mixed with a polymer resin [46], with PET being the polymer used in this case. This substance, transformed into an unsaturated

polyester resin, could be used as an additive to improve the performance of RC [33], while also reducing the production costs of polymer concretes and making savings in energy use.

Previous studies indicate that increases in mechanical strength (of between 15% and 20%) may be obtained in PMC, the origin of these improvements lying in the strong bond of the resin itself with the cementing matrix [47]; this has also been validated in other studies where the advantages of its use in terms of good resistance, durability and rapid curing have been clearly shown [48]. PMC is used in structural applications, pavements, wastewater pipes, repairs, concrete surface coatings etc., providing sufficient durability levels in all applications [49,50] with regard to environmental effects, chemical attacks, abrasion, or any other process [51]. On the other hand, the durability of a concrete tends to be linked to the process of water penetration, which transports the aggressive agent and, in turn, depends on the porosity of the concrete. This is a function of the pore structures and their degree of connectivity, being the physical properties that finally establish its structure [52] (capillary absorption, permeability and diffusion).

While it has been shown that the partial or total replacement of natural coarse aggregates by RA_{coarse} to produce an RC has a positive effect on environmental impact [53,54], this also causes an increase in the porosity of the RC produced [21], which has repercussions in terms of durability.

Therefore, this investigation justified to incorporate an additive or resin derived from waste PET bottles, to improve the porosity properties of RC (of high porosity), allowing to produce an increase in the densification of the paste of them, and thus reverse this effect. This work proposes the study of porosity in these concretes as a comparative instrument and as an explanation of their behavior.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

The following processes were used to obtain the PET-based additive [55]. Firstly, the polymeric resin was synthesized from a recycled PET base taken from plastic bottles post-consumption, with the prior elimination of any non-polymer material; their size was then reduced with a scissors-type cutting tool, the crushed material was then washed in a 50% solution of water and caustic soda to guarantee the elimination of impurities. The second phase in obtaining the additive involved a depolymerization (glycolysis) process undertaken in a reactor (Globe Chemical Reactor, Syrris brand, Royston, UK), using propylene glycol (50% of the weight of the PET) as a solvent, and zinc acetate (0.5% of the weight of the PET) as a catalyst. Finally, the process of synthesizing the resin was carried out on the resulting product, which involved adding maleic anhydride and adipic acid at a molar ratio of 1.1:0.5:0.5, with the aim of obtaining the PET additive to be used in the research (recycled resin, RR).

The recycled aggregate is taken from concrete used in hydraulic pavement and recovered from an uncontrolled landfill (original concrete, OC), which was then subject to crushing (Jaw Crusher, Mod. JS-0804, Manek brand, Mumbai, India), and sieved to obtain a suitable size for use as an aggregate for concrete. The basic properties of the OC are shown in Table 1.

Table 1. Properties of the original concrete (OC) used as recycled aggregates.

Property	Value
Absorption (%)	6.91
Density (g/cm ³)	2.36
Porosity (%)	17.87
Rebound index	28.15

ASTM C136 [56] was used to characterize the distribution of the particle size of the aggregates, obtaining the granulometric profiles from this test for the natural fine aggregates (NA_{fine}) (Figure 1a), natural coarse aggregates (NA_{coarse}), and RA_{coarse} (Figure 1b). The NA_{fine} used was found to be within the ASTM C33/C33M limits [57], while the profiles of both coarse aggregates used exceeded the lower

limit of between 12.7 and 25.4 mm, which indicates the existence of particle content of a larger size than that specified in the regulations. However, this characteristic is common in both aggregates as well as those habitually used in local pre-mixing plants. Therefore, it can be said that partial substitution will not affect the behavior of the concretes containing them, at least not as a result of the effect of their particle distribution.

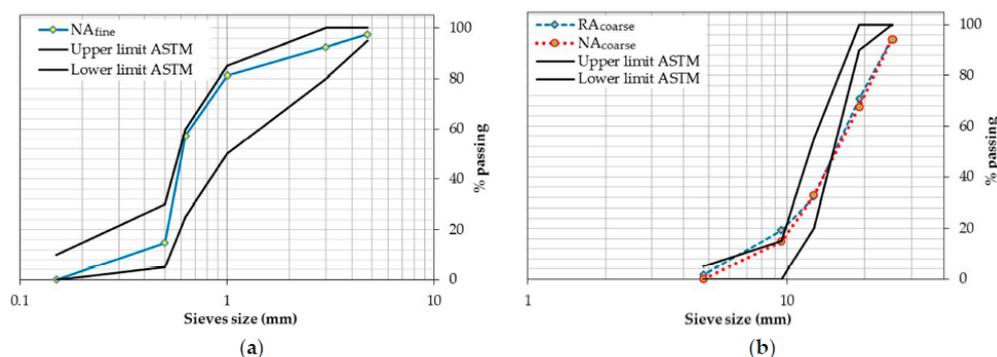


Figure 1. (a) Granulometry of natural aggregate fine (NA_{fine}); (b) Granulometry of coarse aggregates (recycled [RA_{coarse}] and natural [NA_{coarse}]).

With regard to the physical properties of the aggregates (ASTM C 642) [58], it should be noted (see Table 2) that the properties of the RA_{coarse} produced are seen to be affected by the singularity of the OC. In particular, the high absorption of the OC causes up to five times more absorption in the RA_{coarse} than in the NA_{coarse} (caused by the old mortar sticking to the natural sand); however, it should be noted that both are in accordance with the regulations. To a lower extent, density reductions of up to 8% [20] are reported for the RA_{coarse} compared to the NA_{coarse} . In both cases (absorption and density), the variations detected are attributed to the porous nature of the old mortar sticking to RA_{coarse} [27].

Table 2. Properties of recycled aggregates (RA_{coarse}) and natural (NA_{coarse} and NA_{fine}) used in the experiment.

Property	RA_{coarse}	NA_{coarse}	NA_{fine}
Absorption (%)	6.27	1.19	1.88
Density (g/cm^3)	2.38	2.56	2.59
Fineness modulus	-	-	2.53
Maximum size (mm)	19.05	19.05	4.76

2.2. Methods and Experimentation Process

For the purpose of this research it was necessary to use several experimental techniques; standardized tests for determining the physical properties and mechanical trials, as well as more specific and complex techniques and procedures. They are listed in Table 3, below.

The preparation of the specimens of concrete modified with polymer and recycled aggregate (RPC) used a water/cement ratio (w/c) of 0.50% and 25% of NA_{coarse} substituted for RA_{coarse} in the samples, producing six types of mixtures whose sole modification was the quantity of RR content used (% added depending on the weight of the cement). Furthermore, as a control variable, one more mixture was prepared without the addition of RR (AF-0; where AF = Addition Factor of RR, and 0 = zero percent RR addition). The values used for the dosages are shown in Table 4.

Table 3. Experimental techniques.

Tests/Technical	Normative
Workability	ASTM C143/143M
Apparent density	ASTM C642
Pore volume	ASTM C642
Compressive strength	ASTM C39/C39M
Dynamic modulus of elasticity	ASTM C215
X-ray diffraction (XRD)	-
Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)	-
Gas (N ₂) adsorption porosimetry	-

Table 4. Quantities of materials used in the dosage of experimental mixtures.

Component	Classification of Mixtures ¹						
	AF-0	AF-1	AF-3	AF-4	AF-5	AF-7	AF-9
Cement (Kg/m ³)				350.00			
Water (Kg/m ³)				175.00			
RA _{coarse} (Kg) (4.76–12.70 mm)				262.50			
NA _{coarse} (Kg)(4.76–12.70 mm)				787.50			
NA _{fine} (Kg) (1.00–4.76 mm)				700.00			
RR (Kg)	-	3.50	10.50	14.00	17.50	24.50	31.50
w/c				0.5			

¹ AF = Addition Factor of RR, the second term showing the content thereof in the mixture.

The mixing process involved introducing the components into the mixer in the following order: the cement content and the NA_{fine} (in a dry state) were put into the mixer for one minute at mixing speed; the RA_{coarse} and NA_{coarse} were then added to the mixture (both in a saturated surface-dry condition, achieved by immersion in water for 24 h, and after evaporation of the excess by extended and ventilation); this was left in the moving mixer for one minute more until homogenization occurred. Water was then added to the mixture, which was then left to stand for 30 s in order to saturate the NA_{fine} and begin hydrating the cement; finally, the mixing process was carried out for one minute, with an extra minute being added in order to fully incorporate the RR into the mixture.

Six cubic specimens (10 × 10 × 10 cm) (three for compressive strength and three more for apparent density, pore volume and water absorption) and three prismatic specimens (16 × 16 × 60 cm) (for module of elasticity and after testing for X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and porosity to N₂) were prepared for each of the mixtures used in this study (ASTM C192/C192M) [59] which, 24 h after molding, were then demolded and submerged in water until being submitted to testing (28 days of curing) at room temperature in the laboratory.

The test specifications for XRD were: PANalytical X'Pert PRO MPD Alpha1 brand diffractometer, Almelo, The Netherlands) equipped with a Cu K α_1 radiation source ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) X-rays; the test was performed in the range 4° to 80° of 2 θ in scanning steps of 2/s. And for the case of FTIR: Alpha-Bruker Fourier Transform Infrared Spectrometer ALPHA-T, with OPUS/Mentor software, WI, USA; the solid samples were prepared by compression with potassium bromide (KBr), grinding the study materials and a portion of KBr with an agate mortar and pestle, the test process included analysis after 32 scans of wave numbers in the 500–4000 cm⁻¹ interval, with a resolution of 4 cm⁻¹.

2.3. Characterization of the Porous Network

Gas (N₂) adsorption porosimetry was selected as a technique for characterizing the porosity of the RPCs in this study, as it provides sufficient resolution for the porosity in the zones known as micropores and mesopores (less than 2 and 50 nm, respectively) [60]; these zones being where porosity increase is foreseeable due to the presence of mortar adhering to the RA_{coarse}. These pores may also be reduced by using the RR.

The total volume of the porosity was determined in order to define pore distribution and obtain the specific surface of the porous materials. This technique is, as a general principle, the quantification of the gas molecules that are found to be attracted to the solid surface of a material, leading to the process known as gas adsorption, in contrast to the phenomena of gas absorption, in which the gas molecules penetrate the solid.

In the case of gas adsorption, the complete test process includes two differential phases, the first of which is known as enrichment (positive adsorption or intrusion) and the second is known as emptying (negative adsorption or desorption). Both curves do not necessarily follow identical trajectories, which leads to different interpretations or explanations of the phenomena that they characterize. The isotherm used in the test establishes both the distribution of pores and the specific surface by means of the Brunauer–Emmett–Teller (BET) method.

The principle governing this technique has been established in previous works [61] in which, using the drop in pressure and volumes (of both the sample and the established test chamber), the ideal gas law is applied to determine the quantity of gas adsorbed, which is related to the total volume of the pores.

For the preparation of the samples studied, and as a requirement of the equipment used (Micromeritics Instrument Corporation brand, TriStar-surface area and porosity analyzer, with TriStar 3000 V6.04 A Software, Norcross, GA, USA), the RPC specimens were manually crushed, selecting the representative particles that satisfy the criteria: size less than 4 mm and total volume up to the maximum allowed in the test (3.3 cm³). For each variable studied two identical samples were tested, thereby generating better representation in the study.

3. Results

Standard ASTM C642 [58] was used for the characterization of the physical properties to be used in correlation with the porous network of the RPC, obtaining the absorption, apparent density and total water porosity for each sample. Additionally, the ASTM C143/C143M [62] norm was used to determine the workability by means of Abraham’s cone and ASTM C39/C39M [63] to obtain the simple compressive strength of the samples, using a Universal Testing Machine (UTM) (5000 Kg Stepless compression test machine, Wykeham Farrance Ltd., Tring, UK); Table 5 shows the results.

Table 5. Physical properties of concrete modified with polymer and recycled aggregate (RPC).

Parameters	Classification of Mixtures						
	AF-0	AF-1	AF-3	AF-4	AF-5	AF-7	AF-9
Apparent density (g/cm ³)	2.45	2.47	2.52	2.53	2.56	2.59	2.53
Pore volume (%)	12.02	11.26	10.92	10.63	10.21	10.03	10.31
Compressive strength (MPa)	22.70	22.90	23.34	23.86	23.82	24.15	24.07
Workability (cm)	8.55	8.50	8.50	8.45	8.50	8.65	8.95

For apparent density and in general terms, the use of the RR produces slight increases (up to 6%) compared to AF-0. Finally, in reference to the porosity of the samples, the highest value was presented by AF-0, with values gradually reducing as the RR factor was increased, until falling to a difference of 1.99% (Comparing AF-7 with control sample), to then increase again in AF-9.

The previous results show, as a possible mechanism of their behavior (sensitive increases in density correlated with RR and inverse correlation with porosity), that the additive is the cause of variations in the matrix of the RPC, given that the rest of the variables in the studied samples have been constant in the tests. For the specific case of open porosity, the RR has a blocking effect [64] on the hardened RPC, which translates into small increases in density.

Regarding the results of simple compression, it can be seen that this increases noticeably as the percentage of RR rises, an effect favored by the densification of the matrix. This effect does not apply to the AF-9 variable, which could be attributed to the saturation of RR in the cementing matrix.

With regard to workability, any increase is correlative to the content of the RR, behavior that can be related to the hydrophobic nature of the RR; nevertheless, the values obtained are found to be within an acceptable interval according to the ASTM C192/C192M norm [59].

The dynamic modulus of elasticity (E_d) was also chosen as a mechanical property to be studied in the RPC, as it is one of the properties of resistance that best describes the behavior of concretes, in addition to being easy to obtain and non-destructive (ASTM C215) [65]; the system completed the process via the algorithm and the calculation of the frequencies, correlating mass, density and the propagation of longitudinal elastic waves [66].

Table 6 shows the results obtained, from which it can be seen that the increase in RR content generates increases of 16%–17% for the variables studied compared to the control sample. These results present a direct correlation with density and, consequently, an inverse relationship with the absorption parameter, which is attributed to the reduction in the porosity of concretes. In all cases, the variations in the behavior of the RPCs are related to the different levels of RR content.

Table 6. Dynamic modulus of elasticity (E_d).

Mixture	E_d (GPa)
AF-0	25.64
AF-1	26.68
AF-3	27.61
AF-4	28.24
AF-5	29.28
AF-7	29.87
AF-9	29.56

With the aim of clarifying whether there is any type of evolution in the hydration behavior of the RPC, tests were carried out on pastes with the RR used by means of FTIR. This progress was studied via the identification of three different vibrational bands: (1) the appearance of the $\text{Ca}(\text{OH})_2$ band, which can be observed around 3640 cm^{-1} ; (2) the appearance of the H_2O band, which can be seen around 3437 cm^{-1} ; and (3) the shift in the C–S–H of the 927 cm^{-1} band (anhydride cement) to 990 cm^{-1} (hydrated cement). Figure 2a shows the progress of hydration for the samples at 3, 7, 14 and 28 days in comparison with the anhydride cement (CP), in which it can be seen that the bands are represented for all samples at 3642 and 3448 cm^{-1} , which are associated with water and calcium hydroxide molecules. As all the samples display the characteristic bands of calcium hydroxide and water, the C–S–H band is taken as a reference for establishing the progress of hydration.

In the case of the anhydride cement the C–S–H band is observed around 930 cm^{-1} , this position agreeing with previously mentioned studies, while for the samples at 3, 7, 14 and 28 days of hydration the C–S–H band shows displacement of 974 cm^{-1} , 978 cm^{-1} , 987 cm^{-1} and 993 cm^{-1} , which indicates that with more days of hydration the C–S–H band shifts to higher wave numbers, this being due to the advance of hydration caused by the reaction of SiO_4 during the formation of the C–S–H in the water-cement paste mixtures. It must be emphasized that it had previously been reported that the C–S–H band is to be seen at approximately 991 cm^{-1} in pastes of 28 days hydration [67,68].

Figure 2b shows the FTIR spectra of the anhydride cement and the 9% RR paste at different hydration ages; these spectra show the presence of identical bands, already established in Figure 2a (without RR). The band at 3642 cm^{-1} belongs to the formation of calcium hydroxide and that at 3447 cm^{-1} is due to the vibration of the symmetric tension of the water; 1650 cm^{-1} is attributable to the vibration of the symmetric flexion of the H_2O contained in the pastes and the 1437 cm^{-1} corresponds to the vibrations of the CO_3 in the CaCO_3 . That at 1116 cm^{-1} comes from the vibrations of the SO_4^{2-} of the plaster, while 640 cm^{-1} is due to the asymmetric flexion vibration of the C_3S silicates; the peaks of 874 – 711 cm^{-1} are caused by the symmetric and asymmetric flexion vibration of the CO_3 , which moves with time and is a result of the dissolution of the tricalcium silicate.

In contrast to the pastes without RR at 3, 7, 14 and 28 days of hydration (Figure 2a), which show a shift in the C–S–H band of 930–993 cm^{-1} due to the cement hydration, in the pastes with 9% RR at 3, 7, 14 and 28 days (Figure 2b) the C–S–H band remains at 991 cm^{-1} , which indicates that optimal hydration is reached after the third day (the same as was observed for the paste without RR at 28 days). In brief, the optimal hydration for the paste without RR is reached at 28 days hydration, whereas the paste with 9% RR achieves it after 3 days. Extrapolating the previous information it can be said that the use of RR in the PMC may accelerate the hydration process (accelerated strength gain), but in any case it cannot lead to or be the cause of the formation of new or different compounds.

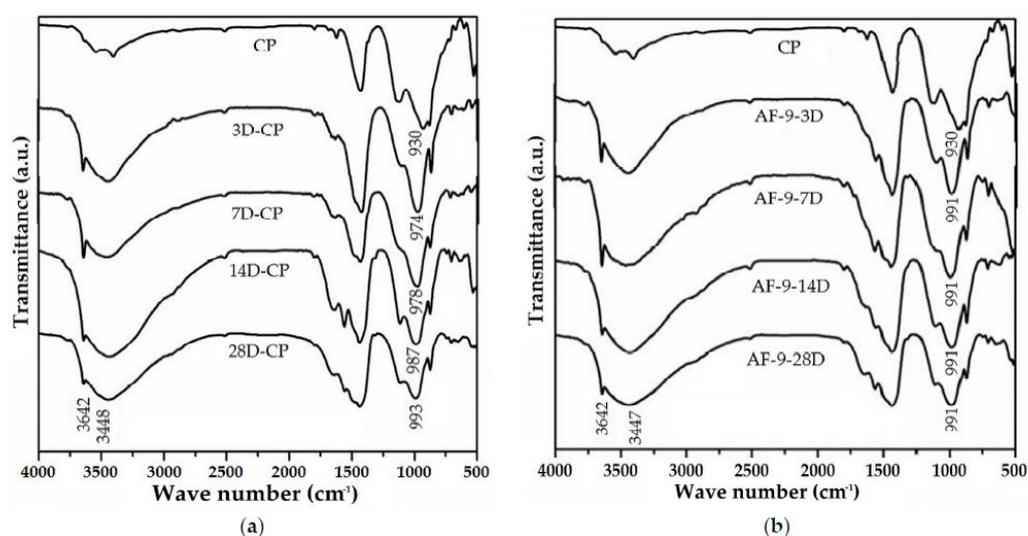


Figure 2. FTIR spectra for ages of 3, 7, 14 and 28 days of hydration: (a) Anhydride cement and the cement pastes; (b) Anhydride cement and cement pastes with 9% of RR; a.u.: absorbance units.

The results of the analysis of the N_2 adsorption tests carried out on the different study samples are presented below (accumulated porosity). Figure 3 details the distribution of the average pore radii at the adsorption stage with all the samples showing average radii, which are mainly found within the mesopore range (1–25 nm), indicating that the possible structural changes in the matrices of these concretes should be studied in the paste [69]. Moreover, it should be noted that depending on the RR content, the porosity of samples AF-1 to AF-7 is reduced when compared to the control sample AF-0. Similarly, AF-9 presents a significant reduction in porosity, although to a lesser extent than the other samples, thus placing it above them (effect of RR overdosage with an inflection point in the mesopores between the samples AF-7 and AF-9, Table 6). As a result, the maximum RR additive content is considered an effect of overdosage, above which the beneficial effects of its use in concrete are less than in those with lower additive contents; in this case the maximum limit is reached when the RR content is greater than 7%.

The RR dosage analysis denotes an inverse correlation between the pore radius reduction and RR dosage, thus causing mechanical improvements similar to those previously presented. This behavior is explained by the formation of what is known as the polymeric film of an RPC, which becomes thicker and more rigid with the increase of RR in the concrete and for which previous modeling exists [70].

In the specific case of AF-9, the trends indicated above do not appear to be valid, as evidenced by the fact that the porosity does not continue to decrease as expected, instead increasing until reaching an increase of 2.8% (compared to AF-5 and AF-7, although still below AF-0). This indicates that a point of RR overdosage exists between content of 7% and 9%, causing a possible non-optimal dispersion of RR within the cementitious matrix, generating zones in which it agglomerates, and making the natural

hydration process (continuous porosity) impossible. An RR overdosage increases the packing capacity of cement particles, slowing (or even encapsulating and blocking) the formation of the hydration products responsible for the formation, structure and porosity of the calcium hydroxide (CH) and hydrated calcium silicates (CSH) of a concrete [71], thus leading to a potential cementitious matrix that does not develop due to the blocking of its cement particles, and in this way is prevented from achieving optimal hydration.

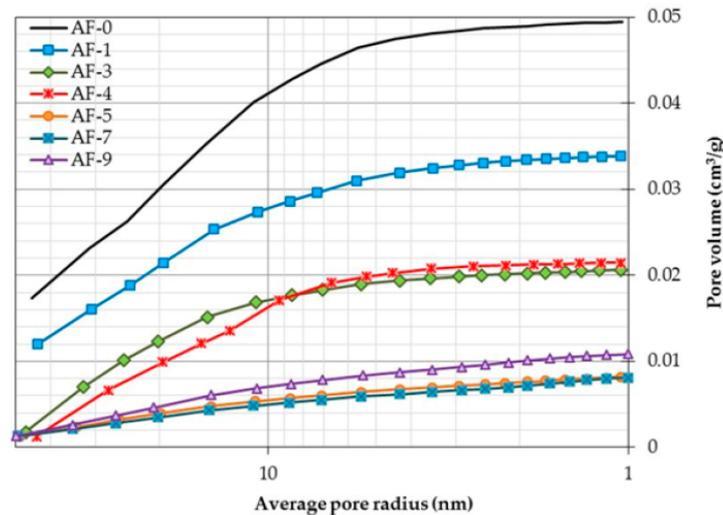


Figure 3. Distribution of pores obtained in the gas adsorption test (intrusion phase) for the samples studied.

In the constitutive modeling of RPC, taking that proposed by Beeldens [64] as a model, the four simplified stages are as follows: Stage (1) The formation of the alkaline solution of pores by the initial hydration of the cement; Stage (2) Deposit of RR on the surface of the aggregates with the partial or total coating of some cement particles and, furthermore, the formation of a continuous film with preferential provision on the surface of the hydrates; Stage (3) Continuous hydration and formation of the polymeric film; and Stage (4) The culmination of the final hydration process of the cement, consolidation of the continuous phase of the RR through the cementitious matrix, extraction of the excess water from the pore solution, restriction of the capillary pores, and the formation of bridges between the aggregates. The four stages described are valid for explaining the AF-1, AF-3, AF-4, AF-5 and AF-7 studied here; however, for the AF-9 mixture (overdosage), only the first three stages can be applied, this new case (overdosage) requiring the replacement of Stage 4 by a new stage within the hydration model for an RPC, which has been named Stage 4RR_{exceeded} (see Figure 4). This last stage is also characterized by being the final hydration phase and the consolidation of the continuous film of the RR, but particular partial phases also occur: some of the RR particles lead to agglomerations of isolated products within the matrix, preventing the formation of efficient bridging between the aggregates (unbound bridge). In addition, the anhydride cement particles cannot develop their full crystallization because this is inside the film formed by the RR coverage, thereby preventing the expected densification in the RPC (encapsulated particle).

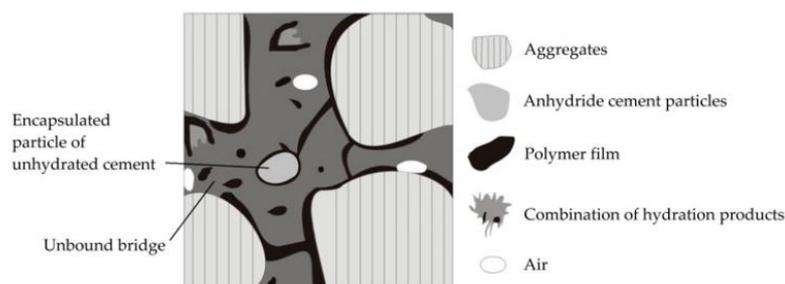


Figure 4. Idealized graphic diagram of microstructural behavior for the proposed new stage of additive overdosage (Stage $4RR_{exceeded}$).

To corroborate the above, the formation of the hydration products was determined for cases AF-5 to AF-7 (see Figure 5) through XRD. Here, the CH (1) peaks can be appreciated, as well as the zones of increase in the formation of CSH (2). In both cases, the behavior described by the diffractograms relates to the detection of more defined and more intense peaks in direct relation to the RR content, taking AF-0 as a reference. However, for case AF-9, the variations in the formation of hydration products show trends towards lower intensity peaks in both hydrates, which could indicate a loss of hydration capacity in the mixture caused by the effect of the RR overdosage (the limitations of the technique itself should be taken into account in this interpretation of the results).

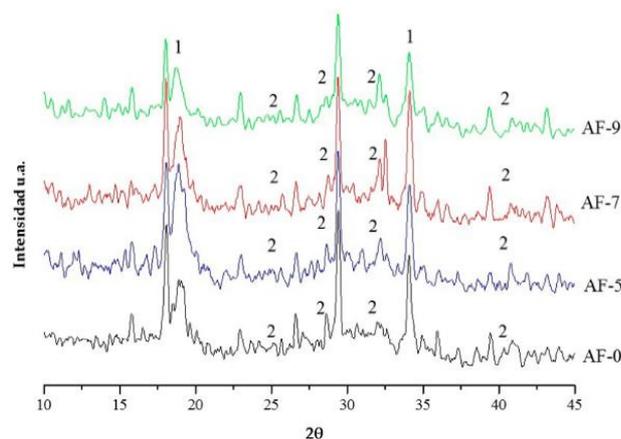


Figure 5. X-ray diffraction (XRD) for the different concrete modified with polymer and recycled aggregate (RPC). 1: calcium hydroxide (CH); 2: hydrated calcium silicates (CSH).

With regard to the quantity of adsorbed gas (total porosity), Table 7 (column 2) shows that the order of the porosity increase in the samples studied is AF-7, AF-5, AF-4, AF-9, AF-3, AF-1 and AF-0 (the order is as expected and similar to that of the other experimental techniques used), reaching a maximum difference of 21.27% between AF-7 with respect to AF-0.

As a constant characteristic of the distribution of radius size (columns 3, 4 and 5, shown as percentage of total porosity), all the samples show higher percentage sizes in the mesoporous zone, reporting a variation in absolute terms of only 3.05, which represents a significance to the order of 5% within these sizes. According to Figure 3, and determining the greater absolute variation of pore size in the other two size zones, the macroporous zone appears to be the key to the variation in the behavior of the mixtures with the use of RR, reporting a 2.64% variation in the absolute value of these sizes. However, compared to the mesoporous zone, this represents a significance of up to 7.33%.

Table 7. Distribution of the pore size ranges obtained from the adsorbed gas test.

Mixture	Total Porosity (cm ³ /g)	Macropores ¹ (%)	Mesopores ² (%)	Micropores ³ (%)
AF-0	0.04954	38.34	59.62	2.04
AF-1	0.04900	33.38	64.94	1.68
AF-3	0.04800	38.34	59.62	2.04
AF-4	0.04667	34.03	63.39	2.58
AF-5	0.04600	32.44	65.21	2.35
AF-7	0.03900	38.51	59.51	1.98
AF-9	0.04700	39.51	58.37	2.12

¹ Size > 25 nm; ² Size 1–25 nm; ³ Size < 1 nm.

The behavior of the specific BET surface is presented in Figure 6, which shows a notable decrease for AF-5, AF-7 and AF-9 compared to AF-0, which reaches, in general terms, a value of 71.83% for the group of variables studied. The technological alternatives which are able to provide this type of densification in concretes can only be obtained under strict conditions in the special design of the dosage of the concrete mixes, with a manipulation of the same carried out in situ [72], or finally, by the use of less common components to produce “special concretes” [73].

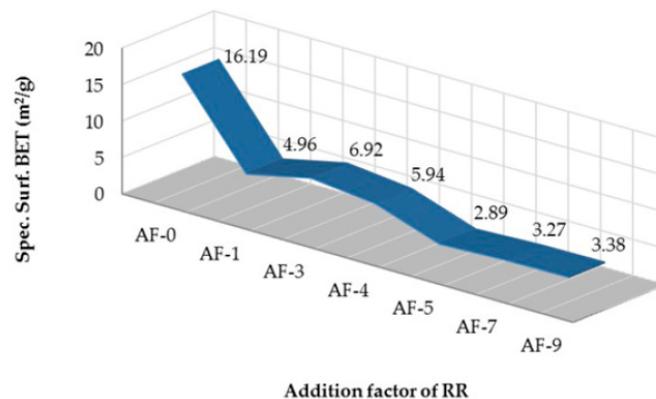


Figure 6. Specific surface determined by means of the Brunauer–Emmett–Teller (BET) method of the mixtures tested.

Within the isothermic curve (theoretical pore radius vs volume of adsorbed N₂, Figure 3) three radius sizes of interest can be identified, which can be used to describe and understand the behavior of the test samples. These radii are classified into three typologies: that known as the maximum radius, defined as the greatest radius of pore value detected in the test; the medium radius, statistically able to represent the radius of pore value that corresponds to half of the volume of the total adsorption of the test, situating said value on the axis of the abscissa of the graph; and, finally, the critical radius of saturation, which refers to the size of the pore in which gas adsorption initiates a drastic decrease in the adsorbed volume (the end of the test process), and is identified by the change in slope of the curve, becoming a straight line with constant slope. For its determination, the first pore radius causing a change in the slope of the curve with an angle greater than 5° was chosen, taking 87.1°–86.5° as a common range from all the samples for its possible identification, measured from the vertical axis as origin and with reference to the horizontal axis in an anticlockwise direction.

For the first of the radii of interest (maximum radius), a correlation between this and the physical properties of the RPC was established, indicating that the porosity (to water) reaches a high determination factor (see Figure 7) for the adjustment of a straight line with a constant inverse slope (an increase in the maximum pore radius produces lower pore volumes). Obtaining the best fit through a linear type equation could show a high and direct correlation between both parameters and

therefore help to explain or understand the porous network of the RPC. However, a priori, it can be said that it appears that the change from lower radius maximum pores to those with a larger radius reduces total porosity to water. This could be explained by the hypothesis that while RR causes the porosity of average or small radii to be sealed, it is unable to do this with large radius pores, which in turn remain open and are able to contain a higher quantity of water absorbed in the RPC.

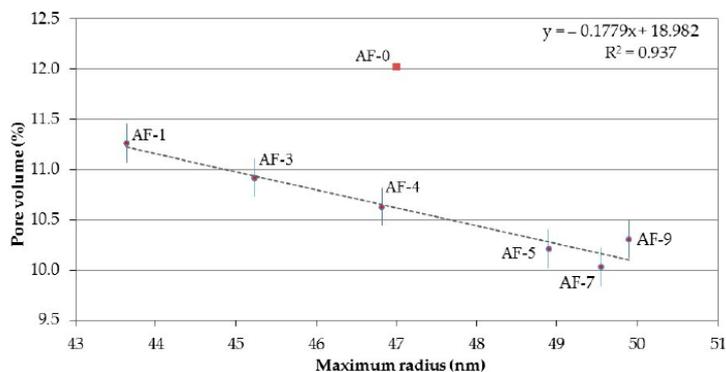


Figure 7. Correlation between the Maximum radius and the Pore volume (to water) of the different concretes modified with polymer and recycled aggregate (RPC).

In terms of the correlation indicated in Figure 8 for the maximum radius, Ed and compressive strength, the best determination factor attained was $R^2 = 0.9831$ for Ed and $R^2 = 0.9543$ for compressive strength, with a type of linear curve fit. However, in contrast to the previous case, on this occasion there is an ascending incremental relationship. The explanatory hypothesis for this is that the technique used in the determination of Ed is based on the measurement of the frequency of impact through the element, observing that when the RR causes the change in the maximum radius (small or medium) to increase, the remaining porosity of the element is sealed or densified. Therefore, this generates more compact and continuous elements that facilitate the improved passage and reception of the signal and, thus, higher Ed values. Regarding the compressive strength, the behavior is understood as being the same as in the usual concretes; that is, a concrete matrix is more resistant as it becomes denser.

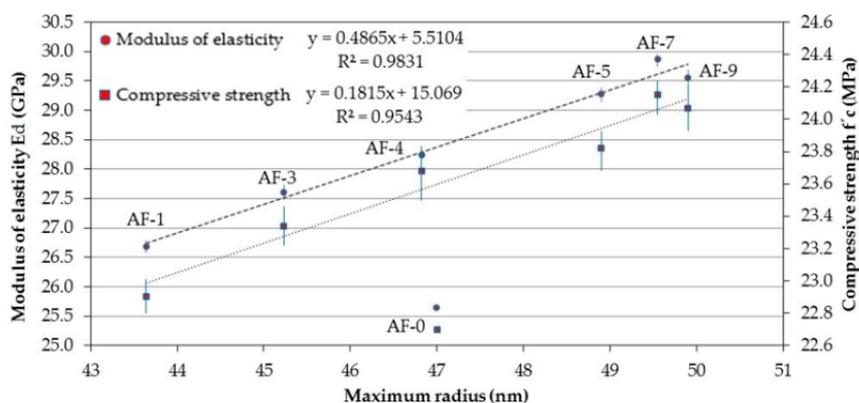


Figure 8. Correlation between the Maximum radius and, the Modulus of elasticity and Compressive strength, of the different concretes modified with polymer and recycled aggregate (RPC).

Relating the medium radius and total porosity (to water) obtains a straight line of fit with an ascending slope, which in this case (due to its type of fit and direction) is one of the correlations

between the porous network and physical properties of a concrete that can be better explained (see Figure 9). This is because the medium radius is a representative value of the entire porosity of a concrete; increases in porosity to water are the natural result of medium radius increases.

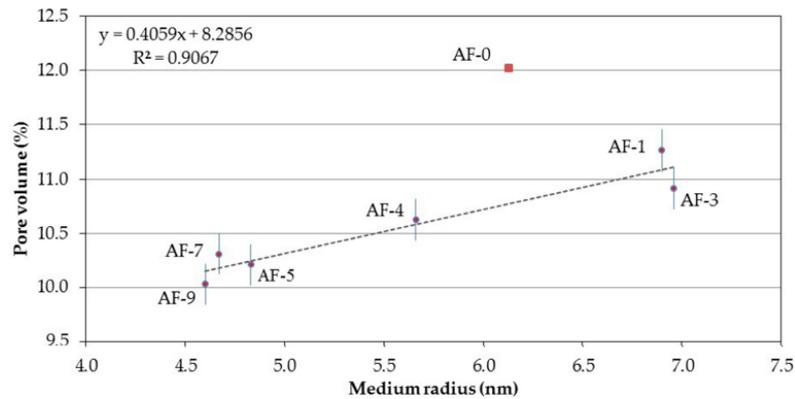


Figure 9. Correlation between the Medium radius and the Pore volume of the different concretes modified with polymer and recycled aggregate (RPC).

With regard to the medium radius, it is possible to establish a correlation between this and the corresponding E_d (Figure 10) using a linear regression type with an inverse slope. The linear nature of the equation denotes a strong link between the calibration parameter (medium radius) and the independent variable E_d . This property is therefore better explained for the RPC (with the medium radius) than with the maximum radius. This reasoning could be due to the origin or nature of the medium radius parameter (pore that is the equivalent to half of the volume of porosity recorded in the adsorption of N_2 test).

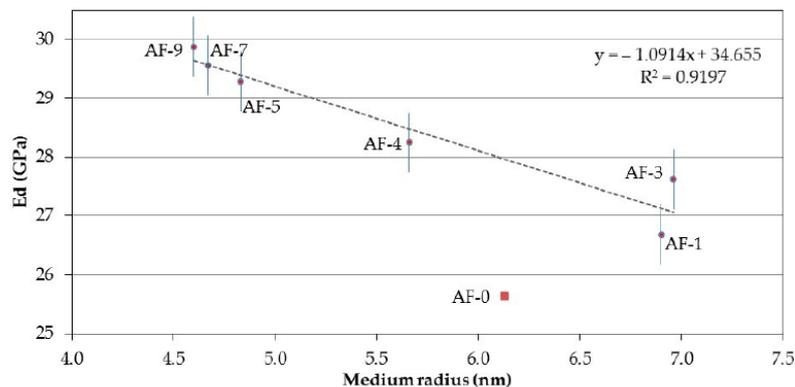


Figure 10. Correlation between the Medium radius and the Modulus of elasticity of the different concretes modified with polymer and recycled aggregate (RPC).

Using what was defined as the critical radius of saturation and correlated with E_d (Figure 11), a linear fit with an ascending slope (similar for the case with the medium radius and pore volume) is obtained. Taking into account the fact that the slope in this case is more pronounced than that in the medium radius (implying faster changes or an accelerated variation of correlation), the interpretation of this term, in similar situations, should be selected as that of most interest as a parameter allowing the mechanical phenomenon of the E_d of the RPC (greater possible path of the line) to be explained or defined more adequately.

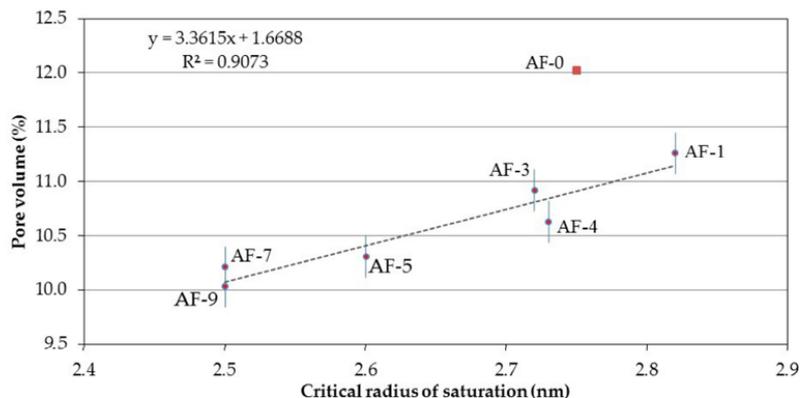


Figure 11. Correlation between the Critical radius of saturation and the Pore volume of the different concretes modified with polymer and recycled aggregate (RPC).

The relationship between the porosity obtained via the adsorption of N₂ and the total porosity to water (see Figure 12) proved highly significant in this research, which validates both techniques as comparable in terms of their capacity to characterize the porous structures of the RPC. On the other hand, of the previously presented different correlations that try to explain the porosity to water of the PRC, this one is of quadratic polynomial type, the interpretation being that it is necessary to consider some other variable for the explanation of the phenomenon (not established in this research).

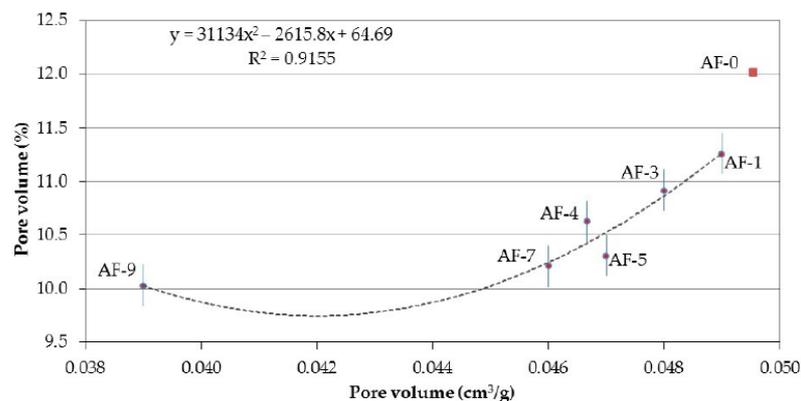


Figure 12. Correlation between the Pore volume (N₂) and the Pore volume (to water) of the different concretes modified with polymer and recycled aggregate (RPC).

Relating the N₂ pore volume to the density (see Figure 13), an equation of the decreasing polynomial type obtains the best fit, which corroborates that the reduction in total porosity improves the density results although with a tendency to increase this parameter due to the nature of the test itself.

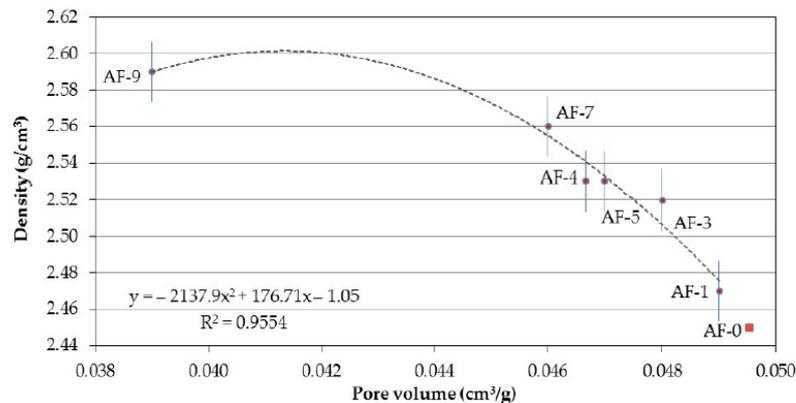


Figure 13. Correlation between the Pore volume and the Density of the different concretes modified with polymer and recycled aggregate (RPC).

4. Conclusions

The study of the physical, mechanical and microstructural properties of the RPCs has permitted their behavior to be described, which shows improvements when RR additive percentages of between 1% and 9% are used in their matrix. Among the different properties studied, the porosity of the resulting matrix becomes one of the most favorable microstructural improvements obtained, achieving reductions of up to 16.55% less than the control specimen, while for water absorption values of up to 22% less were obtained. For the case of the dynamic modulus of elasticity, it is possible to obtain improvements of 16.50%.

Considering the constitutive model of the RPC behavior from previous studies, the reduction in the porosity of the RPC is attributed to the formation of a cementitious matrix impregnated by a polymeric network, which is constituted among the bridging bounds of the RR particles. These bridging bounds are positioned with preferential orientation in order to bond with the aggregates, thus leading to the physical obstruction of the continuous porosity used for the conduction of fluids.

It is verified that RC considered as porous can mitigate this problem if they are designed using the RR additive, thereby allowing the use of RA_{coarse} to be equivalent to NA_{coarse} and thus achieving environmental improvements.

A change in the favorable behavior trend of the RPC has been established when the RR contents are between 7% and 9%, which leads to a reversal of the improvements attained with the previous dosage. Nevertheless, for the 9% RR content studied here, the properties of these variables present improvements when compared to the control sample (although fewer than those recorded for lower RR content).

This behavior caused by overdosage is due to the agglomeration of RR particles that are not completely linked, obstructing the pore sealing bridges, which thus remain isolated while also coating the cement hydrates and the particles of the aggregates that are encapsulated (loss of the reactive capacity for hydration contrasted by XRD). This new stage was designated Stage 4RR_{exceeded}, which describes a new alternative for the behavior of overdosage in the use of RR.

The total porosity to water and the porosity by adsorption of N₂ are techniques that reliably express the correlations between the results and the other properties describing the behavior of the RPC mixtures studied. Among these correlations this study has also verified, through ascending linear correlation, the best affinity with the results obtained. Finally, the parameter for the medium radius (obtained for the adsorption of N₂) enables the precise description and correlation established between the porous network of the RPC studied here, as well as the properties for Ed and the pore volume (to water), thus allowing their behavior to be explained in part.

Acknowledgments: The authors thank National Council of Science and Technology (CONACYT) for its doctoral scholarship program, the School of Engineering Mochis-Autonomous University of Sinaloa (UAS) and the Barcelona School of Building Construction-Polytechnic University of Catalonia (UPC).

Author Contributions: J. Manuel Gómez-Soberón the research concept and design; J. Miguel Mendivil-Escalante, J. Manuel Gómez-Soberón, J. Luis Almaral-Sánchez and F. Guadalupe Cabrera-Covarrubias the data collection and/or assembly; J. Miguel Mendivil-Escalante and J. Manuel Gómez-Soberón the data analysis and interpretation; J. Miguel Mendivil-Escalante, J. Manuel Gómez-Soberón and F. Guadalupe Cabrera-Covarrubias the writing of the article; J. Luis Almaral-Sánchez the critical revision of the article; J. Manuel Gómez-Soberón and J. Luis Almaral-Sánchez the final approval of article.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Castro, P.; Castillo, R.; Carpio, J.J. *Corrosión en Estructuras de Concreto Armado. Teoría, Inspección, Diagnóstico, Vida Útil y Reparaciones*, 2nd ed.; Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto IMCYC: Mexico City, Mexico, 2001.
2. Pomeroy, C.D. Concrete properties. *Phys. Bull.* **1972**, *23*, 657–658. [[CrossRef](#)]
3. Sabet, D.B.; Lim, T.Y.D.; Teng, S. Ultra durable concrete for sustainable construction. *Adv. Mater. Res.* **2012**, *368*, 553–556.
4. Huda, S.B.; Alam, M.S. Mechanical behavior of three generations of 100% repeated recycled coarse aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *65*, 574–582. [[CrossRef](#)]
5. Quin, Y.J.; Li, L.; Yibulayin, A.; Zhang, G.T. Experimental study on the fundamental characteristics of different parent recycled concrete fine aggregates. *Appl. Mech. Mater.* **2013**, *368*, 1080–1085. [[CrossRef](#)]
6. *Aggregates for Mortar and Concrete, Part 100: Recycled Aggregates*; DIN 4226-100; German Standards: Berlin, Germany, 2002.
7. *Proposed Standard for the Use of Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete*; BCSJ; Committee on Disposal and Reuse of Construction Waste, Building Contractors Society of Japan: Tokyo, Japan, 1977.
8. *Recycled Aggregate for Concrete-Class H*; JIS A 5021; Japan Industrial Standard, Japan Standards Association: Tokyo, Japan, 2005.
9. *Betonpuingranulaaten als Toeslagsmateriaal vor Beton (In Dutch)*; CUR; Aanbeveling 4, CUR-VB: Gouda, The Netherlands, 1984.
10. *Concrete-Complementary British Standard to BS EN 206-1, Part 2: Specification for Constituent Materials and Concrete*; BS 8500-2; B.S. Institution: London, UK, 2002.
11. *Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil—Utilização em Pavimentação e Preparo de Concreto Sem Função Estrutural—Requisitos (In Portuguese)*; NBR 15116; ABNT—Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro, Brazil, 2004.
12. Topçu, I.B. Physical and mechanical properties of concrete produced with waste concrete. *Cem. Concr. Res.* **1997**, *27*, 1817–1823. [[CrossRef](#)]
13. Tangchirapat, W.; Buranasing, R.; Jaturapitakkul, C.; Chindapasirt, P. Influence of rice husk-bark ash on mechanical properties of concrete containing high amount of recycled aggregates. *Constr. Build. Mater.* **2008**, *22*, 1812–1819. [[CrossRef](#)]
14. Vieira, J.P.B.; Correia, J.R.; De Brito, J. Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates. *Cem. Concr. Res.* **2011**, *41*, 533–541. [[CrossRef](#)]
15. García-González, J.; Rodríguez-Robles, D.; Juan-Valdés, A.; Morán-del Pozo, J.M.; Guerra-Romero, M.I. Pre-saturation technique of the recycled aggregates: Solution to the water absorption drawback in the recycled concrete manufacture. *Materials* **2014**, *7*, 6224–6236. [[CrossRef](#)]
16. Buyle-Bodin, F.; Hadjieva-Zaharieva, R. Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete. *Mater. Struct.* **2002**, *35*, 504–509. [[CrossRef](#)]
17. Poon, C.S.; Shui, Z.H.; Lam, L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Constr. Build. Mater.* **2004**, *18*, 461–468. [[CrossRef](#)]
18. Levy, S.M.; Helene, P. Durability of recycled aggregates concrete: A safe way to sustainable development. *Cem. Concr. Res.* **2004**, *34*, 1975–1980. [[CrossRef](#)]
19. Hansen, T.C.; Narud, H. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concr. Int.* **1983**, *5*, 79–83.

20. González-Fontebao, B.; Martínez-Abella, F.; Carro-López, D. Stress-strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate. *Constr. Build. Mater.* **2011**, *25*, 2335–2342.
21. Gómez Soberón, J.M.V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate. An experimental study. *Cem. Concr. Res.* **2002**, *32*, 1301–1311. [[CrossRef](#)]
22. Katz, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cem. Concr. Res.* **2003**, *33*, 703–711. [[CrossRef](#)]
23. Dhir, R.K.; Limbachiya, M.C.; Leelawat, T. Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS5328 designated mixes. *Proc. ICE Struct. Build.* **1999**, *134*, 257–274. [[CrossRef](#)]
24. Topçu, I.B.; Şengel, S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cem. Concr. Res.* **2003**, *34*, 1307–1312. [[CrossRef](#)]
25. Li, J.; Xiao, H.; Zhou, Y. Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* **2009**, *23*, 1287–1291. [[CrossRef](#)]
26. Limbachiya, M.C.; Koulouris, A.; Roberts, J.J. Performance of recycled aggregate concrete. In Proceedings of the RILEM International Symposium On Environment-Conscious Materials and Systems for Sustainable Development, Koriyama, Japan, 6–7 September 2004; pp. 127–136.
27. Rao, M.C.; Bhattacharyya, S.K.; Barai, S.V. Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Mater. Struct.* **2011**, *44*, 205–220.
28. Yang, J.; Du, Q.; Bao, Y. Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. *Constr. Build. Mater.* **2011**, *25*, 1935–1945. [[CrossRef](#)]
29. Kwan, W.H.; Ramli, M.; Kam, K.J.; Sulieman, M.Z. Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *26*, 565–573. [[CrossRef](#)]
30. Berndt, M.L. Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate. *Constr. Build. Mater.* **2009**, *23*, 2606–2613. [[CrossRef](#)]
31. Xiao, J.; Li, J.; Zhang, C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cem. Concr. Res.* **2005**, *35*, 1187–1194. [[CrossRef](#)]
32. Kou, S.; Poon, C.S. Compressive strength, pore size distribution and chloride-ion penetration of recycled aggregate concrete incorporating class-F fly ash. *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.* **2006**, *21*, 130–136.
33. Guerra, T.K.; Proszek, G.J. Polymer concrete with recycled PET: The influence of the addition of industrial waste on flammability. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *40*, 378–389.
34. Mohammad, K.; Amir, H.H.; Yahya, S.; Khadijeh, S.; Abolfazl, G. Chemical recycling of PET wastes with different catalysts. *Int. J. Polym. Sci.* **2015**, *2015*, 124524.
35. Rebeiz, K.S. Time-temperature properties of polymer concrete using recycled PET. *Cem. Concr. Compos.* **1995**, *17*, 119–124. [[CrossRef](#)]
36. Byung-Wan, J.; Seung-Kook, P.; Jong-Chil, P. Mechanical properties of polyester polymer concrete using recycled polyethylene terephthalate. *ACI Struct. J.* **2006**, *103*, 219–225.
37. Jamshidi, M. A comparative study on physical/mechanical of polymer concrete and Portland cement concrete. *Asian J. Civ. Eng.* **2010**, *11*, 421–432.
38. Kou, S.C.; Lee, G.; Poon, C.S.; Lai, W.L. Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes. *Waste Manag.* **2009**, *29*, 621–628. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
39. Choi, Y.W.; Moon, D.J.; Chung, J.S.; Cho, S.K. Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. *Cem. Concr. Res.* **2005**, *35*, 776–781. [[CrossRef](#)]
40. Foti, D. Innovative techniques for concrete reinforcement with polymers. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *112*, 202–209. [[CrossRef](#)]
41. Foti, D.; Paparella, F. Impact behavior of structural elements in concrete reinforced with PET grids. *Mech. Res. Commun.* **2014**, *57*, 57–66. [[CrossRef](#)]
42. Foti, D.; Vacca, S. Comportamiento mecánico de columnas de hormigón armado reforzadas con mortero reoplástico. *Mater. Constr.* **2013**, *63*, 267–282. [[CrossRef](#)]
43. Mehrabzadeh, M.; Shodjaei, S.T. Chemical recycling of polyethylene terephthalate. *Iran. Polym. J.* **2000**, *9*, 37–40.
44. Pereira De Oliveira, L.A.; Castro-Gomes, J.P. Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar. *Constr. Build. Mater.* **2011**, *25*, 1712–1717. [[CrossRef](#)]

45. Silva, E.R.; Coelho, J.F.J.; Bordado, J.C. Strength improvement of mortar composites reinforced with newly hybrid-blended fibres: Influence of fibres geometry and morphology. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *40*, 473–480. [[CrossRef](#)]
46. Fowler, D.W. Polymers in Concrete: A vision for the 21st century. *Cem. Concr. Compos.* **1999**, *21*, 449–452. [[CrossRef](#)]
47. Mahdi, F.; Abbas, H.; Khan, A.A. Strength characteristics of polymer mortar and concrete using different compositions of resins derived from post-consumer PET bottles. *Constr. Build. Mater.* **2010**, *24*, 25–36. [[CrossRef](#)]
48. Rebeiz, K.S. Precast use of polymer concrete using unsaturated polyester resin based on recycled PET waste. *Constr. Build. Mater.* **1996**, *10*, 215–220. [[CrossRef](#)]
49. Garas, V.Y.; Vipulanandan, C. Review of Polymer Concrete Properties, (poster abstracts). In Proceedings of the Center for Innovative Grouting Materials and Technology CIGMAT '03, Part 2, Houston, TX, USA, 2003; pp. 1–3. Available online: http://www2.egr.uh.edu/~civeb1/CIGMAT/03_poster/11.pdf (accessed on 10 August 2013).
50. Shivani, R.B.; Yuvraj, M.G. Polymer modified concrete. *Int. J. Res. Eng. Technol.* **2015**, *4*, 845–848.
51. Yueshun, C.; Jun, W.; Xiaolong, Z. Description of concrete durability damage process. *Wuhan Univ. J. Nat. Sci.* **2006**, *11*, 653–656. [[CrossRef](#)]
52. Cheng, P.; Chen, X.F.; Wu, L. Research on Ordinary Concrete. *Durab. Appl. Mech. Mater.* **2014**, *584*, 1318–1321. [[CrossRef](#)]
53. Saeed, A.; Hammons, M.I. Use of recycled concrete as unbound base aggregate in airfield and highway pavements to enhance sustainability. In Proceedings of the Airfield and Highway Pavements Conference, Bellevue, WA, USA, 15–18 October 2008; pp. 497–508.
54. Ramadan, S.F.; Solikin, M.; SriSunarjono, I. Effect of recycled coarse aggregate on concrete properties. *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.* **2015**, *4*, 19060–19061.
55. Mendivil-Escalante, J.M.; Almaral-Sánchez, J.L.; Gómez-Soberón, J.M.; Arredondo-Rea, S.P.; Corral-Higuera, R.; Castro-Beltrán, A.; Cabrera-Covarrubias, F.G. New concrete additive by chemical recycling of PET. *Adv. Sci. Technol. Res. J.* **2014**, *8*, 1–5.
56. *Standard Test Method for Sieve Analysis of fine and Coarse Aggregate*; ASTM C136-96; American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA, USA, 1996.
57. *Standard Specification for Concrete Aggregates*; ASTM C33/C33M-11; American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA, USA, 2011.
58. *Standard Test Method for Density, Absorption and Voids in Hardened Concrete*; ASTM C642-06; American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA, USA, 2006.
59. *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*; ASTM C192/C192M-02; American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA, USA, 2016.
60. Gómez-Soberón, J. Relationship between gas adsorption and the shrinkage and creep of recycled Aggregate Concrete. *Cem. Concr. Aggreg.* **2002**, *32*, 1301–1311. [[CrossRef](#)]
61. Vidick, B. Specific surface area determination by gas adsorption: Influence of the adsorbate. *Cem. Concr. Res.* **1987**, *17*, 845–847. [[CrossRef](#)]
62. *Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete*; ASTM C143/C143M-03; American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA, USA, 2003.
63. *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*; ASTM C39/C39M-05; American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA, USA, 2005.
64. Beeldens, A.; Van, G.D.; Schorn, H.; Ohama, Y.; Czarnecki, L. From microstructure to macrostructure: An integrated model of structure formation in polymer-modified concrete. *Mater. Struct.* **2005**, *38*, 601–607. [[CrossRef](#)]
65. *Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens*; ASTM C215-08; American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA, USA, 2008.
66. Chen, J.; Jayapalan, A.R.; Kim, J.Y.; Kurtis, K.E.; Jacobs, L.J. Rapid evaluation of alkali-silica reactivity of aggregates using a nonlinear resonance spectroscopy technique. *Cem. Concr. Res.* **2010**, *40*, 914–923. [[CrossRef](#)]

67. Saikia, N.J.; Sengupta, P.; Gogoi, P.K.; Borthakur, P.C. Cementitious properties of metakaolin-normal Portland cement mixture in the presence of petroleum effluent treatment plant sludge. *Cem. Concr. Res.* **2002**, *32*, 1717–1724. [[CrossRef](#)]
68. Trezza, M.A. Hydration study of ordinary portland cement in the presence of zinc ions. *Mater. Res.* **2007**, *10*, 331–334. [[CrossRef](#)]
69. Chen, Z.P.; Wang, N.; Zhang, S.Q.; Zheng, S.F. Experimental study on basic behavior of recycled fine aggregate mortar. *Adv. Mater. Res.* **2011**, *168*, 1680–1685. [[CrossRef](#)]
70. Van, G.D.; Beeldens, A. Evolution in modeling cement hydration and polymer hardening in polymer-cement concrete. *Adv. Mater. Res.* **2013**, *687*, 291–297.
71. Mendivil-Escalante, J.M.; Gómez-Soberón, J.M.; Almaral-Sánchez, J.L.; Corral-Higuera, R.; Arredondo-Rea, S.P.; Castro-Beltrán, A.; Cabrera-Covarrubias, F.G. Synthesis and characterization of PET polymer resin for your application in concrete. *Int. J. Struct. Anal. Des.* **2015**, *2*, 105–109.
72. Kumbhar, P.D.; Murnal, P.B. Assessment of suitability of existing mix design methods of normal concrete for designing high performance concrete mixes. *Int. J. Civ. Struct. Eng.* **2012**, *3*, 158–167.
73. Rodrigues, P.I.A.; Parras, M.L.; Morio, I.M. Compressive strength of the self-compacting concrete: Influence of the pozzolanic activity of the calcareous and basalt. *Cienc. Eng. Sci. Eng. J.* **2006**, *15*, 95–100.



© 2017 by the authors; licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Discusión global de los resultados y conclusiones

Con base a los artículos que conforman el compendio de publicaciones, los resultados presentados en el primer artículo del compendio (capítulo 3), permiten señalar el comportamiento de las propiedades en estados fresco de los morteros que contienen áridos reciclados cerámicos. Se hace referencia a que el factor de reemplazo (RF) del árido natural por árido reciclado cerámico es influyente en las propiedades de los mismos, siendo más evidente a medida que el RF aumenta; en el caso de la densidad, los morteros presentan comportamiento inverso al RF (por lo que la densidad disminuye), mientras que la relación de la proporción agua/cemento (a/c) con el RF es directa (aumenta cuando mayor es la cantidad de árido reciclado). Estos comportamientos se atribuyen a las propiedades propias de los áridos reciclados utilizados, al ser menos densos y con mayor coeficiente de absorción (demanda mayor cantidad de agua para alcanzar la consistencia deseada). La presentación en forma gráfica de los resultados obtenidos de la campaña experimental realizada, permite obtener coeficientes de las ecuaciones de regresión, los cuales pueden ser utilizados para la creación del diagrama de interacción triple (correlaciones experimentales-teóricas de las propiedades en estado fresco de los morteros). Como conclusiones generales obtenidas del primer artículo se mencionan las siguientes:

- Los áridos reciclados cerámicos presentan menor densidad y mayor absorción al agua que los áridos naturales, lo cual repercute en las propiedades de los morteros.
- Fue necesario un pequeño ajuste granulométrico de los áridos (dividir el material a través de un tamiz en específico), con el objetivo de igualar los áridos reciclados con los áridos naturales, provocando que los perfiles granulométricos representados se localizaran dentro de los límites señalados por normativa; este procedimiento es necesario de realizar para evitar una distorsión de variable ajenas a la propia concepción de la investigación que impidiera su comparativa directa.
- La relación c:a, influye en los morteros reciclados con tendencia similar al efecto ocasionado por un mayor RF; la relación a/c y el contenido de aire, aumentan cuando mayor es la relación c:a, mientras que la disminución de la densidad es más notable; excepto en morteros con remplazos cercanos al 60% del árido cerámico y con la relación c:a = 4, los cuales presentan mayor densidad que con la relación c:a = 3.25.
- El diagrama de interacción triple obtenido con las ecuaciones de regresión de los datos experimentales, permite determinar de forma simple las analogías de vinculación entre las propiedades en estado fresco de los morteros; facilitando así la predicción de las relaciones que presentarán los mismos desde la fase de diseño de las mezclas.
- El diagrama obtenido permite reducir el tiempo de experimentación previo necesario para la obtención del comportamiento óptimo buscado.
- Para el uso del diagrama de interacción, se debe prever que los datos utilizados de los morteros cerámicos sean de similares características (densidad de los áridos reciclados y relación a/c, entre otros); por lo que es necesario la realización de más futuras investigaciones en los cuales se utilicen diferentes variables no incluidas en esta investigación (obtención de diagramas más universales), con múltiples opciones para diferentes alternativas posibles.

Por lo que respecto al segundo artículo (capítulo 4), de los resultados obtenidos se destaca la resistencia a compresión de los morteros reciclados y la obtención la curva de tensión-deformación característica de cada uno de los morteros. Al realizar un análisis más específico de los valores de tensión-deformación, se puede obtener información adicional tal como la resiliencia, tenacidad, así como los valores de deformación en el rango elástico y total de la curva. Al ser analizados los resultados experimentales mediante un proceso de simulación numérico-analítico, fue factible la determinación de ecuaciones de predicción del comportamiento de los morteros reciclados, así como la formulación de ecuaciones que definen el

comportamiento teórico de las curvas de esfuerzo-deformación. En cuanto a los resultados del comportamiento de resistencia a compresión, se reportó que para porcentajes bajos (10 y 20%) los morteros reciclados presentan resistencias incluso mayores que el mortero natural, atribuyendo a la posible reacción puzolánica de los áridos finos cerámicos que ocasionan un efecto de relleno, logrando que la ZTI sea más densa. Mientras que para porcentajes altos la resistencia disminuye, por efecto de la mayor porosidad que pueden ocasionar los áridos reciclados, aunado a lo anterior a la baja densidad de los mismos que producen una ZTI menos densa (origen de pérdidas de resistencia). Esta hipótesis fue validada por medio de imágenes obtenidas de SEM, en las cuales se observan los diferentes espesores y contornos de los áridos en la ZTI, así como la densidad de la matriz en esa zona. Como conclusiones obtenidas del segundo artículo se mencionan las siguientes:

- Las densidades de los morteros reciclados son menores que la del mortero natural, con comportamiento inverso correlativo al contenido de árido reciclado; esta reducción de la densidad se ha atribuido a la baja densidad de los áridos reciclados.
- Los morteros reciclados presentaron valores similares de la resistencia a compresión con respecto al mortero natural cuando se utilizaron el 10 y 20% de árido reciclado, llegando incluso a alcanzar resistencias superiores; con porcentajes de sustitución mayor, las pérdidas aumentan.
- Se ha demostrado que la composición mineralógica (determinada por medio de DRX) de los áridos reciclados utilizados en la investigación, no está implicada en las variaciones del comportamiento de los morteros.
- El comportamiento de las curvas de esfuerzo-deformación de los morteros reciclados y el módulo de elasticidad obtenido con las mismas, es similar al presentado por un mortero natural, y de forma más próxima para los que contienen 10 y 20% de árido reciclado.
- Las propiedades obtenidas por medio de las curvas esfuerzo-deformación, presentan incrementos con respecto al mortero natural de control cuando se utiliza hasta un máximo del 20% de sustitución; con porcentajes de sustitución mayor, los valores obtenidos de las propiedades son inferiores al de control. A partir de los datos obtenidos se ha logrado formular ecuaciones predictivas con respecto al porcentaje de sustitución, las cuales proporcionan, de forma simple y rápida, valores próximos de los diferentes morteros.
- Por medio de análisis numérico se han obtenido ecuaciones predicativas que permiten relacionar algunas de las propiedades de los morteros reciclados (entre ellos), así como la predicción del comportamiento teórico de las curvas esfuerzo-deformación.

En los resultados obtenidos en el tercer artículo (capítulo 5), se indica la influencia de las propiedades de los áridos gruesos reciclados en los hormigones, los cuales ocasionaron una alta absorción y menor densidad que el hormigón con árido natural; ambos efectos causados por la propia naturaleza del árido reciclado, el cual contiene mortero viejo adherido. Por otra parte, el aumento en el uso de aditivo PET en los hormigones produjo incrementos de densidad aparente y reducción gradual en la porosidad cuando se comparó con el hormigón de referencia; este comportamiento se atribuye al aditivo, dado que las variables de todas las muestras fueron constantes en los ensayos. En cuanto a los resultados de compresión simple y módulo de elasticidad dinámico, los hormigones presentaron incrementos debido al aumento del porcentaje del aditivo; este comportamiento tiene relación directa con la densidad y relación inversa con la absorción, como consecuencia de la reducción de la porosidad. Los ensayos de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) en los hormigones con los diferentes porcentajes de aditivo, mostraron que la hidratación óptima de los hormigones de control se alcanza a los 28 días, mientras que hormigón con el máximo porcentaje de aditivo (9%) se alcanza después de 3 días. Por lo que se puede decir que el uso del aditivo influye en el proceso de hidratación, no obstante no conduce a la formación de nuevos o diferentes compuestos. Como conclusiones obtenidas del tercer artículo se mencionan las siguientes:

- A través del estudio de las propiedades físicas, mecánicas y micro estructurales de los hormigones reciclados se ha logrado describir su comportamiento; el cual, reporta mejoras con el uso del aditivo. De entre las diferentes propiedades estudiadas, la porosidad de la matriz resultante es una de las mejoras micro

estructurales más favorable obtenidas, logrando reducciones con respecto al de testigo, así como la absorción al agua; por otra parte, se logran obtener mejoras en el caso del módulo de elasticidad dinámico.

- La disminución en la porosidad de los hormigones se atribuye a la formación de una matriz cementante impregnada por una red polimérica, la cual se constituye entre los puentes de las partículas del aditivo. Estos puentes son posicionados con orientación preferencial enlazando a los agregados, resultando así la obstaculización física de la porosidad continua que es utilizada como conducción de los fluidos.
- Se verifica que los hormigones reciclados considerados como porosos pueden mitigar esta problemática si son diseñados utilizando el aditivo, permitiendo de esta forma que el uso de los áridos reciclados se equipare a los áridos naturales y se logren así mejoras medioambientales.
- Por otra parte se encontró que entre el 7 y 9% de aditivo utilizado, se halla una inflexión en el comportamiento favorable de su uso, una sobredosificación provoca que las mejoras detectadas en hormigones con dosificaciones bajas, se vean de nuevo reducidas al contener por arriba del 7% del aditivo; no obstante el uso de 9% del mismo ocasiona mejoras en los hormigones, cuando se es comparado con el hormigón de testigo.
- La sobredosificación se origina por aglomeración de partículas de aditivo que no se llegan a enlazar en su totalidad, dificultando la formación de los puentes de sellado de los poros, permaneciendo así aisladas mientras recubren también a los hidratos del cemento y partículas de áridos que resultan encapsuladas.
- Se valida que la porosidad total al agua y la porosidad por adsorción de N_2 son técnicas que expresan de forma fiable las correlaciones entre sus resultados y otras propiedades que describen el comportamiento de las mezclas de hormigón (con áridos reciclados y aditivo) estudiadas; de igual forma, entre ellas se ha verificado la mejor afinidad de sus resultados por correlación lineal ascendente. Por último, el parámetro de radio medio obtenido de la adsorción de N_2 logra describir y correlacionar con precisión la relación establecida entre la red porosa de los hormigones estudiados y las propiedades de módulo de elasticidad y del volumen de poro al agua, permitiendo así explicar en parte su comportamiento.

Perspectivas a futuro

Artículos en proceso

- Diagramas de interacción de las propiedades en estado fresco (consistencias, densidad y contenido de aire) de los morteros con áridos de vidrio. (para revista JCR)
- Diagramas de interacción de las propiedades en estado fresco (consistencias, densidad y contenido de aire) de los morteros con áridos de hormigón.

Datos en proceso de análisis

- Propiedades mecánicas, tales como densidad en estado endurecido, resistencia a la compresión y flexión, y retracción (total, básica y por secado) de los morteros que contienen árido de hormigón reciclado.
- Propiedades de elasticidad de los morteros que contienen áridos tanto de vidrio como de hormigón reciclado; obtención del módulo estático y dinámico (por excitación de la vibración por impulso y por la velocidad de propagación de pulsos longitudinales de ondas).
- Porosidad, superficie específica BET y características de poros por medio de la técnica de Porosimetría de absorción de gases (N_2) de los morteros con cada uno de los diferentes áridos de estudio, su comparación y su correlación con sus propiedades mecánicas.
- Análisis de imágenes obtenidas por medio de SEM, para la obtención de la porosidad por medio de mapeo de elementos presentes en los morteros.

Investigaciones futuras

- Comparación de las propiedades de los morteros con cada uno de los tres materiales utilizados, con el fin de determinar el material y porcentaje que presenta las mejores prestaciones, teniendo como factor común, el estudio de los morteros bajo las mismas condiciones y procedimiento de fabricación.
- Análisis de los compuestos de hidratación de los morteros, por medio de la técnica de Difracción de Rayos X.
- Realización de ensayos más específicos tales como absorción por capilaridad, absorción de vapor de agua y de durabilidad de los morteros.
- Análisis económico de los áridos reciclados para fabricación de morteros y su comparación entre ellos.
- Elaboración de compuestos estructurales tales como muros de albañilería, con el uso de morteros con los tres materiales reciclados para su estudio y comparación.
- Evaluación mediante el Análisis del Ciclo de Vida de los materiales de la factibilidad del uso de los áridos reciclados como proceso sostenible medioambiental.
- Elaboración de nuevos morteros con otros materiales resultantes del fin de vida de uso en la construcción tales como: metales, plásticos, madera, asfaltos, etc.

ANEXOS

En el presente anexo, se incluyen otros artículos que han sido publicados y que complementan la investigación de la presente tesis. Estos artículos no cumplen con los requisitos para incluir en el compendio; sin embargo, la presentación de los mismos permitirá ofrecer una visión más amplia del tema investigado.

Los datos más importantes de cada uno de ellos se enlistan a continuación, y de forma posterior se presentan cada uno de los artículos en su versión completa.

- **ANEXO 1:**

F. G. Cabrera-Covarrubias, J. M. Gómez-Soberón, J. L. Almaral-Sánchez, S. P. Arredondo-rea, and R. Corral-Higuera, “**Mechanical properties of mortars containing recycled ceramic as a fine aggregate replacement,**” Rev. la Construcción, vol. 14, no. 3, pp. 22–29, 2015.

FI = 0.185 (JCR)

- **ANEXO 2:**

F. G. Cabrera-Covarrubias, J. M. Gómez-Soberon, J. L. Almaral-Sánchez, S. P. Arredondo-Rea, and J. M. Mendivil-Escalante, “**Mechanical and Basic Deformation Properties of Mortar with Recycled Glass as a Fine Aggregate Replacement,**” Int. J. Civ. Eng., pp. 1–15, 2016. doi: 10.1007/s40999-016-0071-9

FI = 0.372 (JCR)

- **ANEXO 3:**

F. G. Cabrera-covarrubias, J. M. Gómez-soberón, J. L. Almaral-sánchez, S. P. Arredondo-rea, M. C. Gómez-soberón, and J. M. Mendivil-escalante, “Propiedades en estado fresco de morteros con árido reciclado de hormigón y efecto de la relación c/a - **Properties in fresh state of mortars with recycled aggregate concrete and effect of c/a relation,**” Ing. y Desarro., vol. 35, no. 1, 2017. doi:10.14482/inde.35.1.8949

Index Copernicus

Mechanical properties of mortars containing recycled ceramic as a fine aggregate replacement

Propiedades mecánicas de morteros que contienen cerámica reciclada como reemplazo del árido fino

Francisca Guadalupe Cabrera-Covarrubias (Main Author)
Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, España.
francisca.guadalupe.cabrera@estudiant.upc.edu

José Manuel Gómez-Soberón (Contact Author)
Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona.
Av. Doctor Marañón 44-50, 08028 Barcelona, España.
+34 934016242
josemanuel.gomez@upc.edu

Jorge Luis Almaral-Sánchez
Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ingeniería de Los Mochis, Mexico.
jalmaral@uas.edu.mx

Susana Paola Arredondo-Rea
Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ingeniería de Los Mochis, Mexico.
paola.arredondo@uas.edu.mx

Ramón Corral-Higuera
Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ingeniería de Los Mochis, Mexico.
ramon.corral@uas.edu.mx

Manuscript Code: 225

Date of Reception/Acceptance: 01-07-2014 / 01-12-2015.

Abstract

We study the behavior of mortars where 0%, 10%, 20%, 30%, 50% and 100% of their original natural sand was replaced by ceramic sand in a search of potential new building materials that will help to conserve natural resources and that are environmentally friendly. In this paper, the physical properties of the sands and their derived mortars, including their compressive strength, flexural strength, and shrinkage due to base and total drying, are characterized. Our results show that the compressive and flexural strengths of the recycled mortars decrease proportionally to the amount of natural sand replacement used. A similar behavior is observed for the shrinkage due to drying in mortars with low ceramic substitutions (10%, 20% and 30%). Based on these findings, we believe that the use of mortars made with recycled sand (with substitution contents lower than 30%) could be feasible in applications where the mechanical requirements are low.

Keywords: recycled mortars, ceramic materials, mortar shrinkage

Resumen

A partir de la búsqueda de nuevas alternativas en el área de construcción que ayuden a la conservación de los recursos naturales y del medio ambiente, se estudia el comportamiento de morteros con sustituciones parciales de reemplazo del 0%, 10%, 20%, 30%, 50% y 100% de arena cerámica reciclada por arena natural. Se caracterizan las propiedades físicas de las arenas estudiadas, así como las propiedades mecánicas de los morteros resultantes de ellas; tales como la resistencia a la compresión, flexión y de retracción básica, por secado y total. Los resultados obtenidos indican que para la resistencia a compresión y a flexión de los morteros reciclados, éstos sufren decrementos proporcionales al remplazo de la arena natural; sin embargo, para el caso de la retracción por secado éstos reportan comportamiento similar (morteros con sustituciones bajas de 10%, 20% y 30%). En base a lo anterior, morteros con arena cerámica reciclada (con contenidos menores al 30% de reemplazo) podrían ser factibles de su utilización en aplicaciones, en las cuales los requerimientos de éstos sean bajos.

Palabras Claves: morteros reciclados, materiales cerámicos, retracción morteros

Introduction

Environmental awareness driven by climate change and the reduction of natural resources is stimulating the search for new alternatives aimed to reduce the use of natural resources (Barluenga & Hernández-Olivares, 2004; Bektas, et al., 2009; Cabrera Álvarez et al. 1997; Lopes Lima & Batista Leite, 2012; Shui et al., 2008; Tam et al., 2007).

The current increase of civil projects in the construction sector has generated a large amount of residues, called residues from construction and demolition (RCDs) (Calvo Pérez et al., 2002; Echevarría Caballero et al., 2005; Jiménez et al., 2013; Parra y Alfaro et al., 2006). Residues derived from the demolition of buildings could be used as replacement materials for natural aggregates.

This replacement could both mitigate the sustainability problem and result in direct environmental and economic benefits (Jiménez et al., 2013; Lee, 2009; Lehmann, 2011; Miranda & Selmo, 2006; Pereira-de-Oliveira et al., 2012; Sales & Rodrigues de Souza, 2009; Tam et al., 2007; Wang & Tian, 2009)

Dump waste materials could be used in new applications, such as the fabrication of concretes and mortars (V. Corinaldesi et al., 2002; Valeria Corinaldesi, 2012; Dapena et al., 2011;

Gutiérrez Moreno et al., 2015; Tertre, 2007; Vegas et al., 2009) after an adequate selection process, including specific grinding and proper sieving.

Some of the feasible RCD components suitable for recycling as replacements for aggregates in recycled mortars are materials containing ceramic elements. Mortars with applications in construction are formed by an important fraction of fine aggregates (i.e., sand), among other components.

Traditionally, these materials are natural sands extracted from quarries and rivers, so their use has an environmental impact and leads to their exhaustion because they are non-renewable materials. Thus, the use of recycled sands originating from ceramic materials in mortar fabrication could be an alternative for current and future sustainable construction.

Therefore, the goals of this work are to analyze the physical and mechanical properties and deferred deformation of recycled ceramic mortars (CMs) with different percentages of recycled sand derived from ground ceramic residues as substitutes for their original contents of natural sand. The aim of this analysis is to verify the effect of substituting natural materials by recycled ones on the behavior of CMs, determining the criteria for their optimal use in potential applications, and reporting data on their exhibited properties.

Materials

The recycled ceramic aggregates (CAs) used in this work came from local industries and were certified in their processing. The minimum particle size of the fine aggregates was 0.5 mm, and they were derived from defective residues of ceramic roof tiles that did not comply with technical size and geometry specifications.

Silica sand, which was acquired from a local marketer and had a particle size of 0.4 mm, was used as natural sand or natural aggregate (NA).

Figure 1 shows the CA (a) and NA (b) used in this work, depicting some of the visual differences existing between them, such as the (evident) color, the maximum particle size (higher for CA), and the particle size distribution.

Both sands required adjustments to their granulometric profiles so their respective particle size distributions could be brought (as much as possible) into compliance with the specifications of the ASTM C144 standard. If such adjustments were not performed, both granulometric profiles would be unbalanced (i.e., the particle size distributions would have steep hikes, sharp changes in curvature, or distribution curves far from the limits established by industry standards), implying that the obtained results could be a consequence of different profiles rather than different materials.

To ensure that the particle size distributions were properly adjusted, a criterion for combining the different percentages of each aggregate type was developed, which consisted of using two different fractions of different particle sizes (both from the original material of each sand) that were separated by a No. 30 sieve (0.59 mm). This criterion is based on the attempt to achieve suitable compositions, with minimal intervention, that generate similar profiles that are close to the limits of regulation.

To achieve that similarity, the No. 30 sieve was identified as the best means to attain the targeted particle size (i.e., the particle size distribution tail corresponding to smaller sizes that caused the particle size to fall outside the limits of the regulation). If such resulting fractions are combined into different percentages (for each profile under study, CA and NA) and equal targets are required (maximum capacity), then the resulting profiles of each sample produce similar granulometric curves that are close to the limits described in the standards.

This approach avoids introducing variables that could be related to a profile divergence during our research; however, for industrial applications, we acknowledge the existence of such a limitation. The maximum capacity for the CA was achieved by a combination of 60% sand with particle sizes bigger than the No. 30 sieve (0.59 mm) and 40% sand with particles sizes smaller than it. For the NA, the optimum combination was found for mixtures of 50% of each of the fractions separated by the No. 30 sieve (0.59 mm).

Figure 1. Sands used (cm): a) CA, b) NA. Source: Self-elaboration.

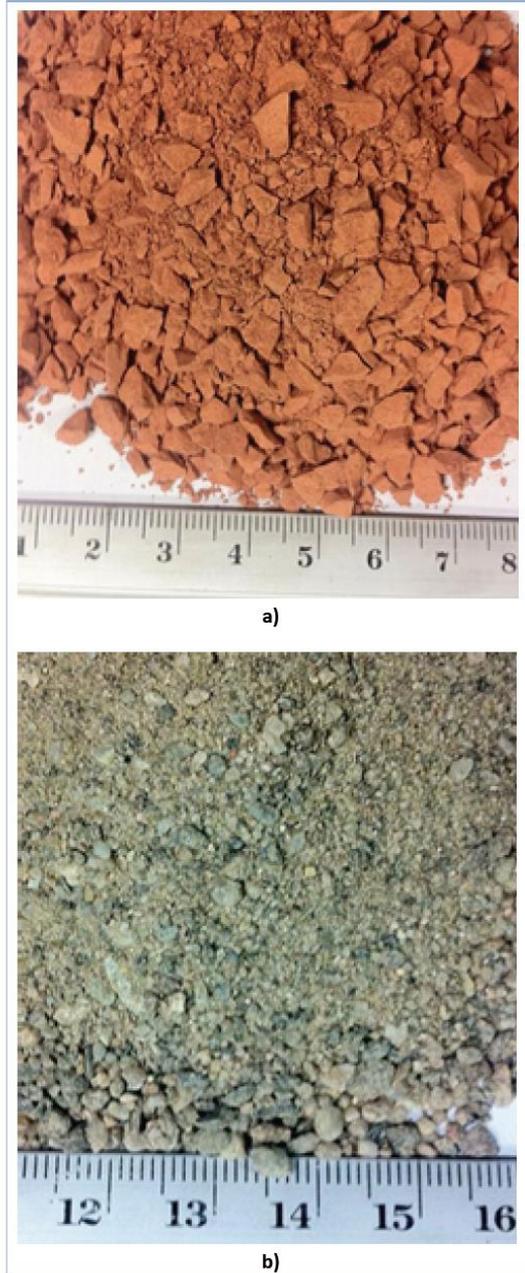
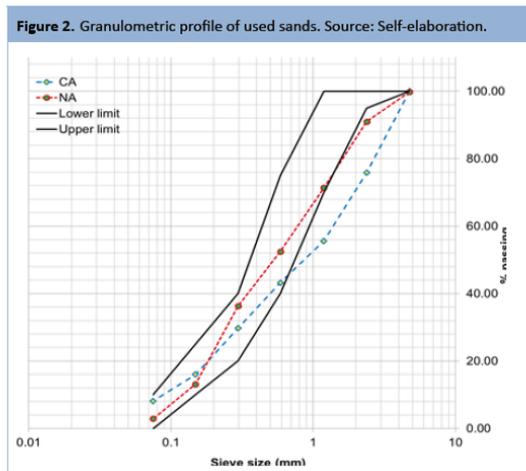


Figure 2 shows the granulometric curves of both sands resulting from the above granulometric adjustment, together with the extreme limits established by the standard. As depicted, for the CA, 33% of the sample falls below the lower limit of the standard (between mesh No. 16, 1.19 mm, and No. 8, 2.38 mm), while only 4% of the sample falls below the lower limit for the NA.

Even when both curves are not optimal (in practice, optimal curves are impossible to achieve), the adjustment will ensure that the particle size distribution will not be an important factor affecting the study of aggregate replacement in either sand.



Some of the physical properties of the sands are described in Table 1. In general, compared to the NA, the CA has a lower density (29.5 and 17.8% lower density in terms of the OD (oven-dry condition) and the SSD (saturation-surface-dry condition), respectively) and exhibits a notably higher absorption capacity (differing by 16.8%).

The behavior of volumetric weights agrees with the reported values derived from their densities: the values for the CA are smaller than those for the NA (31.9 and 24.8% lower bulk density in terms of OD and SSD, respectively), and there is a greater void content in the CA (7.3% higher than that in the NA). The causes for such behaviors could be related to the inherent low densities of the components and their exhibited unbalanced granulometric profiles, with a higher amount of coarse aggregates (i.e., a higher fineness modulus), which hinders their achievement of an optimal compactness.

Table 1. Physical properties of aggregates. Source: Self-elaboration.

Property*	CA	NA
Density (OD) (kg/m ³)	1820.9	2581.6
Density (SSD) (kg/m ³)	2155.4	2623.6
Bulk density (OD) (kg/m ³)	1182.0	1735.1
Bulk density (SSD)(kg/m ³)	1399.1	1860.8
Voids (%)	35.3	32.9
Water absorption (%)	18.4	1.6
Fineness modulus	2.8	2.4
Materials Finer than 75- μ m (sieve No. 200) (%)	8.2	2.9

* Determined according to ASTM.

Finally, Portland cement classified as CEM I 42.5 N/SR (UNE EN 197-1:2011, by its usual properties and components) mixed with tap water without any further treatment or load was used as a binding agent.

Experimental Works

Mortar specimens of 4 cm x 4 cm x 16 cm with substitutions (change factor "R" = [CA/total aggregates] x 100, in weight) of 0%, 10%, 20%, 30%, 50% and 100% of the original NA content by CA were prepared to evaluate their compression and flexural behaviors. Specimens 2.5 cm x 2.5 cm x 28.5 cm in size were used to evaluate shrinkage. All of the mixtures were designed with a cement/sand ratio of 1:4 (by weight) and an

initial water/cement (w/c) fraction of 0.5.

The w/c fraction was corrected according to the ASTM C203 standard until a fluidity of $110 \pm 5\%$ was achieved, according to the ASTM C109 standard. The water increments reported in the recycled mixtures were a consequence of the individual needs of each mixture, given the influence of the CA content.

To achieve these compositions, the CA and the NA were taken to their saturation points (by mixing with water for 1 minute) before the cement was added to the mixer. The characteristics and ratios used to manufacture 1 dm³ of each of the mixtures studied are shown in Table 2.

Table 2. Features and mixture proportions study. Source: Self-elaboration.

Materials (g)	Replacement level of fine recycled aggregate					
	R = 0	R = 10	R = 20	R = 30	R = 50	R = 100
Cement	400	433	381	372	348	323
NA** <sieve 30	800	780	610	521	348	0
>sieve 30	800	780	610	521	348	0
CA** <sieve 30	0	69	122	179	278	517
>sieve 30	0	104	183	268	417	775
Water* (w/c)	0.84	0.90	0.93	1.00	1.14	1.48

*Necessary water for mixed = water of hydration +water to saturate aggregates + water for workability.
**Dry condition.

Assays details

Density and porosity

The apparent densities, the open porosities, and the mortar absorptions were evaluated using half of the specimen remaining from the assay before the flexural test (UNE EN 1015-10 and EN 1936) at an age of 60 days (because this is the most representative maturity age for referencing mixtures with long-term tests). The cracked face resulting from the flexural test was matched to the other face to improve this assay's approximation.

Compressive and flexural strengths

The assay ages established for these tests were 3, 7, 28, 60 and 90 days. The specimens were maintained in saturation conditions by keeping them immersed in water until the age of the test was reached, when the specimens were removed from the water bath and immediately tested. The time elapsed between the specimen removal and testing was never longer than 30 minutes.

Three specimens for each variable were used during the flexural tests, following the guidelines of the ASTM C348 standard. One of the halves (3 specimens per variable) remaining from the flexural tests was subsequently used for the compressive tests according to the suggestions of the ASTM C349 standard.

Shrinkage

To characterize shrinkage (due to base, drying, and total shrinkage), six specimens with sizes of 2.5 cm x 2.5 cm x 28.5 cm were fabricated for each of the conditions being studied. Immediately after their removal from the cast, they were prepared according the guidelines described in previous studies (Gómez-Soberón, 2002);(Gómez-Soberón, 2003).

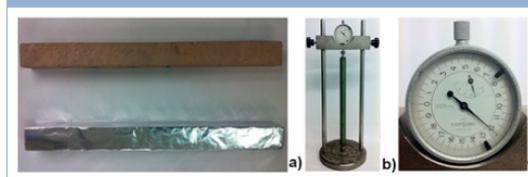
Three of the six specimens were covered by three layers of paraffin and aluminum foil to evaluate the basic shrinkage (ebasic), and the remaining three were used for total retraction

(etotal) (see Figure 3a).

By computing the difference between these two values, we deduced the shrinkage due to drying (ϵ_{drying}) of the mortars. The first reading for the shrinkage was taken after 24 hours of mixing; then the specimens were placed in a curing chamber for 28 days, and the following readings were taken on days 3, 7, 14 and 28 (removing them from the curing chamber only for the reading).

After this period, the specimens were removed from the chamber and exposed to the laboratory ambient conditions ($T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $\text{RH} = 50\%$), and readings were subsequently taken at ages of 3, 7, 14, 28, 40, 60 and 90 days. The recordings were taken using equipment with a rigid test-frame (Figure 3b) and a micrometer with a precision of 0.001 mm (Figure 3c), according to the suggestion by the ASTM C490-04 standard.

Figure 3. a) Basic and total shrinkage specimen, b) the test frame, c) the micrometric reader. Source: Self-elaboration.



Results And Discussion

Density and porosity

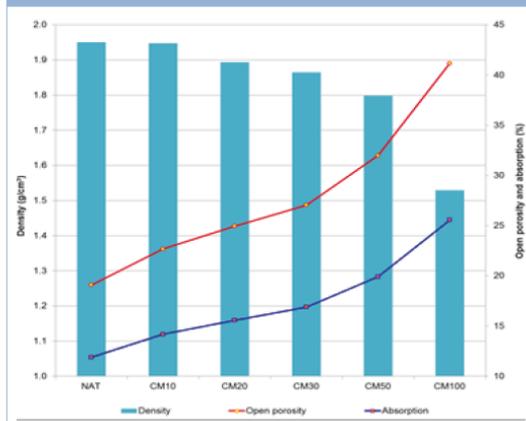
The physical properties of the hardened mortar are shown in Figure 4. The CMs exhibited lower values for apparent density than the mortars made with natural sand (NAT), and the density was inversely correlated with R. These variations ranged from -0.1% for CM10 up to a maximum of -21.5% for CM100, with respect to NAT in both cases. This behavior could be explained by the low density of the CA compared with the NA (see Table 1), which also has been reported in previous studies (Jiménez et al., 2013; J. Silva, Brito, & Veiga, 2010; M. A. G. Silva, Silva, & Simão, 2007).

On the other hand, the CM porosity and absorption values are inversely correlated with the apparent densities of the specimens. The more noticeable differences with NAT occur with higher R factors, at values of 115.7% for porosity and 115.3% for absorption for CM100. In the case of CM absorption, these results could be related to the high absorption capacity of the CA used for fabrication (see Table 1).

Regarding porosity, the observations may be related to a higher requirement for water during the mixing procedure (see Table 2), with respect to the amount retained by the CA, and the evaporation of water could leave behind a bigger network of voids in the CMs. It is possible that the characteristics specific to aggregates, such as the sharp forms of the CA or their particle size distributions, could also concurrently modify the workability of the CM.

This effect, in turn, results in a higher water demand (i.e., the sharper-edged particles observed in the CA) for a desired consistency.

Figure 4. Density, porosity and absorption of the CM. Source: Self-elaboration.



Compression strength

Figure 5 shows that the resistances of all of the mixtures increased over the elapsed time, probably due to hydration reactions occurring in the mortars; however, comparing CM with NAT, the resistances decrease. This behavior is observed at ages of 3, 7 and 90 days; at 90 days, the CM20 mixture showed the highest values of all the CMs tested (30.54 MPa).

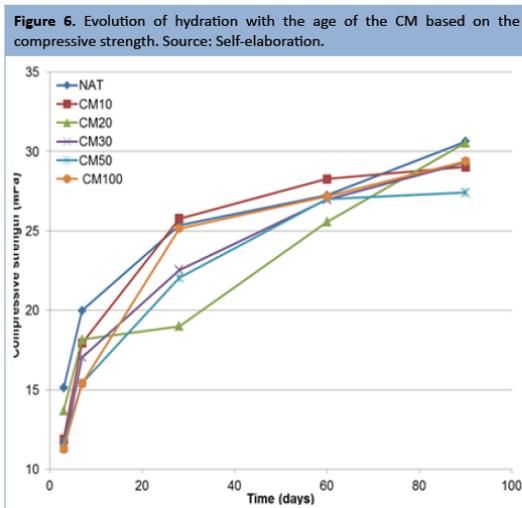
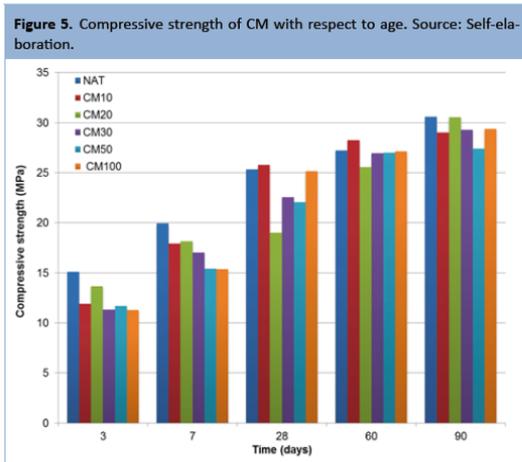
However, at ages of 28 and 60 days, the behavior of CM10 surpasses even that of the NAT (thus indicating a possible null effect of the substitution of the CA), increasing its values by 1.6 and 3.8% , respectively (an average of 2.72%), which nevertheless could be considered to be low changes or changes related to the dispersion.

In general, the behavior of resistance loss related to increasing the CA content could be caused by the physical characteristics of the CAs, such as lower densities and higher absorptions than those exhibited by the NA. The NA mixtures end up producing weaker mortars that form more porous matrices due to their higher water requirements.

Along the same lines, it is also possible that the shape and form of the particles could affect their adherence to cement. Similar behaviors have been reported previously in where the characteristics of the CA (low density and high absorption) have been indicated as responsible (Valeria Corinaldesi, 2012); as well as to the variations to the relationship w/c due to the high absorption of the CA (João Silva ET AL., 2009), and also the dosage method used (by volume) (Jiménez et al., 2013).

The reasons for the higher resistances of the CMs with respect to the NAT have not been experimentally validated; however, we predict that one plausible hypothesis for this behavior could be that their pozzolanic reactivities (associated with the fine fraction in CA) promote the “filling effect” in the mortar matrix.

Previous works have reported that CAs with percentages below 30% (and in some cases even up to 50%) exhibit compression strengths equivalent to or even higher than those of the reference mixture. Such behavior is justified by the pozzolanic reactivity that such aggregates can exhibit, thus generating new crystalline products that improve the mortar matrix (Jiménez et al., 2013; Kumavat & Sonawane, 2013; Silva et al., 2010).



Regarding the change in resistance of the mortars (Figure 6), even when there are some variations between the CMs and NAT, the curves of all of the CMs behave similarly. This similarity shows that the hydration process follows a consistent pattern for CMs; that is, the compressive strength increases with time, but, for ages close to 28 days, the values tend to stabilize (that is, the increase in resistance decelerates).

Flexural strength

Figure 7a shows that the flexural strength behavior is similar to the behavior observed for the compression strength, which tends to increase in all the mixtures with time. However, the strengths of the CMs decrease in the presence of CAs, and they respond to an increasing R factor for all of the analyzed ages. At the ages of 3 and 7 days, CM20 exhibits strength values similar to those of NAT, with differences of -4.7% and -1.9%, respectively.

This result suggests that mortars with such percentages of ceramic materials could develop resistances equivalent to those exhibited by NAT. For the age of 28 days, CM10 and CM30 are most similar to NAT (-10.3% and -11.7%, respectively). Finally, after 90 days, CM30 is the most similar (8.5%) to NAT. The highest strength loss among the CMs is reported for CM100, with a curing age of 90 days, which could decrease up to 19% with respect to NAT. On the other hand, CM30 aged for 60 days

exhibits the lowest strength loss (of only -1.2%).

In general, the observed loss of flexion strength related to the increase of CAs can be explained by the physical characteristics of the CAs (similar to the cause for the change in compression strength in the CM): a lower density and a higher absorption are observed in mortars with a porous matrix, along with a possible deficient adherence between the cement and the aggregates.

Similar behaviors have been reported in previous works for samples with substitution percentages of 100% CA (Valeria Corinaldesi, 2009) (Valeria Corinaldesi, 2012), where such behavior was related to the low density of the specimens and the observed CA porosity (acknowledged as the weakest link of the set). In addition, the same work suggests that the effect of the "matrix filling" caused by the pozzolanic addition of fine particles may not control the overall behavior of specimens with high CA contents.

The hydration capacity increased for all of the samples (see Figure 7b). Based on the results obtained for the extremes cases under study (3 and 90 days), we found that CM30 had the most accelerated evolution of hydration capacity, representing a difference of only 1.1% with respect to NAT. On the other hand, the material with the worst hydration evolution was CM100 (16.7% with respect to the samples with natural sand).

As a partial conclusion, the results presented here are not conclusive regarding the relationships found for the different percentages, but they are indeed conclusive for the cases with maximum substitution (100%). To justify this conclusion, we note that these decreases are related in a direct way to the fact that in specimens with high CA contents, the possible pozzolanic effect could be attributed to higher strengths, as was observed in other works (João Silva et al., 2009), which might not be sufficient to induce changes in the cement matrix. Therefore, the physical properties of CAs (the density, high absorption and higher porosity) are responsible for the weakness observed in the CM.

Shrinkage

To study the deformations in the CMs, the obtained curves were divided into two stages: a) data obtained in a curing chamber, in the age (t) range of $0 < t < 28$ days; and b) data obtained in the laboratory environment, ranging from $28 < t < 90$ days. During the first stages (in the humidity chamber) and during the process of basic shrinkage (ebasic) (Figure 8a), the mortars CM10, CM20, CM30 and NAT shrank, but CM50 and CM100 actually expanded (all of them were covered with paraffin and are referenced in the plot with the term PAR).

Analyzing the behavior of the previously discussed variables, for the first set, we could predict that the high absorption observed by the CAs with a low amount of CM substitution provides a low amount of water for the hydration process, which produces a chemical reaction that consumes water. On the other hand, the observations obtained for the second set of variables could be explained by the high w/c ratio values required for the CMs; given that high CA substitutions lead to elevated absorption capacities, these materials will have highly porous networks for the hydration process.

The associated high amount of available water therefore induces the generation of CSH products that are known for inducing specimen expansion. In the same stage but during the process of total shrinkage (etotal) (Figure 8b), all of the specimens exhibited expansive deformation values at the end of their exposure periods inside the curing chamber. Such behavior could be explained by the specific curing conditions

(i.e., a high relative humidity and a constant temperature) that stimulate water inclusion in the specimens, with the consequent higher sensitivity and correlation with the R factor.

During the second stage (in the laboratory environment), it was necessary to set aside the values obtained in the first deformation stage (in the curing chamber, both for ϵ_{basic} and ϵ_{total}) so the real values describing deformation in the laboratory environment could be obtained. We defined the value of both the obtained deformation and the curing age as zero at the beginning of the drying stage (in the laboratory environment); that is, $\epsilon_{28 \text{ days}} = 0\%$ and $t_{28 \text{ days}} = 0$.

Figure 9a shows the curves for ϵ_{basic} (only for the laboratory environment) and indicates that at $t = 90$ days, CM50 and CM100 were located in the expansion zone, while the others, CM10, CM20, CM30 and NAT, were in the shrinkage zone. This behavior can be understood as a continuation of the tendency explained before (a curing period in a curing chamber), supporting the assumption that the laboratory conditions do not affect the specimens (at least for $40 < t < 50$ days).

At this time, however, CM50 and CM100 exhibited an "interruption" in their expansive processes, then starting a new trend that was not increasing and instead constant (i.e., horizontal). The curves for all of the other CMs and for NAT tend toward shrinkage values, with CM10 and CM20 being the steepest curves. Based on this information, the behavior of the CM could be significantly affected by a desiccation process starting from $t > 50$ days.

Curves for ϵ_{total} are shown in Figure 9b. In this figure, all of the CM and NAT cases show remarkable and similar deformation values. The observed behavior can be summarized by mentioning that at the beginning of the new environmental conditions (a low RH and a high temperature), all of the specimens suffer drastic shrinkage deformations (max $\epsilon_{\text{total}} = 0.1081\%$ for CM10 between $0 < t < 30$ days). Water loss from the CM porous networks that reduces the interstitial tension is most likely the cause of this shrinking behavior.

During the period between $40 < t < 50$ days, the majority of the curves exhibit a constant linear tendency of no deformation, with exception of CM20, which is the only specimen where deformation continues. This behavior can be explained by noting that in this timeframe, the effect of the laboratory environment compensates for CM deformation and limits the availability of water for extraction.

From the difference between ϵ_{total} and ϵ_{basic} , it is possible to obtain the shrinking due to drying (ϵ_{drying}) (see Figure 10). Here, CM50 and CM100 for $t = 90$ days are the specimens with the highest deformations ($\epsilon_{\text{drying}} = 0.0986\%$ and 0.1141%), which were 24% and 44% higher than those of NAT. Similar values (43%) were also reported for mortars with 100% ceramic sand (at $t = 80$ days) (J. Silva et al., 2010). Regarding CM10, CM20 and CM30, the observed values were similar to the values exhibited by NAT (absolute differences of only 0.0084%, 0.0054%, and 0.0089%). In other works, similar deformation values were reported ($t = 56$ days) for mortars containing 10% and 20% recycled sand (Bektas et al., 2009).

The behavior of the first set (CM50 and CM100) can be explained by their more porous networks, which are interconnected and open. These networks exhibit reduced pressures because of the presence of water inside them, allowing water to evaporate when the specimens are exposed to more extreme conditions of temperature and humidity.

On the other hand, the rest of the samples (CM10, CM20, and

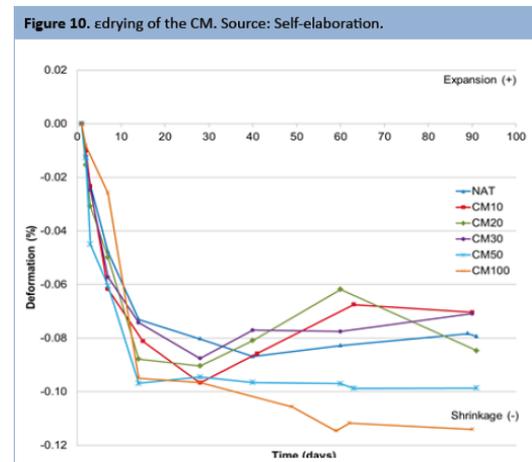
CM30), containing "equivalent" porous networks, exhibited "stability" towards deformation once the available water was depleted at the environmental conditions that the specimens were exposed to. A complementary hypothesis explaining the behavior of the CMs is attributed to the high water requirement of the CMs and to an elevated absorption by the CA, which facilitates water extraction in dry environments (Wang & Tian, 2009) and, in extreme conditions, induces cracking (Bektas et al., 2009) (Vegas et al., 2009).

Conclusions

Based upon the results obtained in this work, the following conclusions can be reached: Due to the higher absorption exhibited by CA, the CMs need a higher amount of water to achieve equivalent workabilities to make them adequate to use, especially if they are initially mixed with dry sand.

The CMs exhibited compression and flexion strengths smaller than those of NAT ($t = 90$ days); of the CMs, CM20 showed the highest compression strength (30.54 MPa), while CM30 had the highest value of flexible strength (8.55 MPa). Such decreases in resistance does not imply that they should not be used but rather be considered as feasible alternatives for applications with reduced mechanical requirements.

CM10, CM20, and CM30 ($t = 90$ days) exhibit a drying behavior similar to that of NAT, with a difference of only 0.01%, implying that these reduced CA percentages could lead to deformations in the CM, which is the opposite case for elevated CA substitution percentages. In summary, we can conclude that CM10, CM20 and CM30 have demonstrated the capacity to achieve shrinkage levels and compression and flexible strengths that are acceptable to be considered as feasible alternatives consistent with environmental conservation.



Acknowledgements

The authors thank CONACYT for its doctoral scholarship program, the Polytechnic Higher School of Building Construction of Barcelona-UPC, the Department of Architectonic Constructions II-EPSEB-UPC, the School of Engineering Mochis-UAS and, finally, the program of Young Doctors-UAS.

References

- Barluenga, G., & Hernández-Olivares, F. (2004). Experimental approach to the use of recycled materials in mortar and concrete for architectural experimental applications. In E. Vázquez, C. F. Hendriks, & G. M. T. Janssen (Eds.), *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures* (pp. 403–411). RILEM Publications SARL.
- Bektas, F., Wang, K., & Ceylan, H. (2009). Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability. *Construction and Building Materials*, 23(5), 1909–1914. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.09.006
- Cabrera Álvarez, J. L., Urrutia, F., Lecusay, D., & Fernández, A. (1997). Morteros de albañilería con escombros de demolición. *Materiales de Construcción*, 47(246), 43–48.
- Calvo Pérez, B., Parra y Alfaro, J.-L., Astudillo Matilla, B., Sanabria Zapata, C. M., & Carretón Moreno, R. (2002). Áridos Reciclados para Hormigones y Morteros. *Caracterización Mineralógica y Química*. ingenierosdeminas.org. Retrieved from <http://ingenierosdeminas.org/documentos/06-Materiales primas de interes industrial-3.pdf>
- Corinaldesi, V. (2009). Mechanical behavior of masonry assemblages manufactured with recycled-aggregate mortars. *Cement and Concrete Composites*, 31(7), 505–510. doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.05.003
- Corinaldesi, V. (2012). Environmentally-friendly bedding mortars for repair of historical buildings. *Construction and Building Materials*, 35, 778–784. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.04.131
- Corinaldesi, V., Giugliolini, M., & Moriconi, G. (2002). Use of rubble from building demolition in mortars. *Waste Management*, 22(8), 893–899. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12423051>
- Dapena, E., Alaejos, P., Lobet, A., & Pérez, D. (2011). Effect of Recycled Sand Content on Characteristics of Mortars and Concretes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(4), 414–422. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000183.
- Echevarría Caballero, M., Sanabria Zapata, C. M., & Parra y Alfaro, J. L. (2005). Fabricación de morteros con árido reciclado. *Ingeopres: Actualidad Técnica de Ingeniería Civil, Minería, Geología Y Medio Ambiente*, (141), 26–28. Retrieved from <http://europa.sim.ucm.es/compludoc/AA?articuloId=424089>
- Gómez-Soberón, J. M. V. (2003). Relationship Between Gas Adsorption and the Shrinkage and Creep of Recycled Aggregate Concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*, 25(2). doi:10.1520/CCA10442J
- Gómez-Soberón, J. M. V. (2002). Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate - An experimental study. *Cement and Concrete Research*, 32(8), 1301–1311. doi:10.1016/S0008-8846(02)00795-0
- Gutiérrez Moreno, J. M., Mungaray Moctezuma, A., & Hallack Alegría, M. (2015). Reuse of Hydraulic Concrete Waste as a New Material in Construction Procedures: a Sustainable Alternative in Northwest Mexico. *Revista de La Construcción*, 14(2), 51–57. doi:10.4067/S0718-915X2015000200007
- Jiménez, J. R., Ayuso, J., López, M., Fernández, J. M., & Brito, J. de. (2013). Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. *Construction and Building Materials*, 40, 679–690. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.11.036
- Kumavat, H. R., & Sonawane, Y. N. (2013). Feasibility Study of Partial Replacement of Cement and Sand in Mortar by Brick Waste Material. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 2(4), 17–20.
- Lee, S.-T. (2009). Influence of recycled fine aggregates on the resistance of mortars to magnesium sulfate attack. *Waste Management*, 29(8), 2385–2391. doi:10.1016/j.wasman.2009.04.002
- Lehmann, S. (2011). Optimizing Urban Material Flows and Waste Streams in Urban Development through Principles of Zero Waste and Sustainable Consumption. *Sustainability*, 3(1), 155–183. doi:10.3390/su3010155
- Lopes Lima, P. R., & Batista Leite, M. (2012). Influence of CDW Recycled Aggregate on Drying Shrinkage of Mortar. *Open Journal of Civil Engineering*, 2(2), 53–57. doi:10.4236/ojce.2012.22009
- Miranda, L. F. R., & Selmo, S. M. S. (2006). CDW recycled aggregate renderings: Part I – Analysis of the effect of materials finer than 75µm on mortar properties. *Construction and Building Materials*, 20(9), 615–624. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.02.025
- Parra y Alfaro, J. L., Astudillo Matilla, B., Carretón Moreno, R., Castilla Gómez, J., Sanabria Zapata, C. M., & Antuña Bernardo, E. (2006). Áridos reciclados para hormigones y morteros. *Boletín Geológico Y Minero*, 117(4), 763–772. Retrieved from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2264832>
- Pereira-de-Oliveira, L. A., Castro-Gomes, J. P., & Santos, P. M. S. (2012). The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components. *Construction and Building Materials*, 31, 197–203. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.12.110
- Sales, A., & Rodrigues de Souza, F. (2009). Concretes and mortars recycled with water treatment sludge and construction and demolition rubble. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2362–2370. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.11.001
- Shui, Z., Xuan, D., Wan, H., & Cao, B. (2008). Rehydration reactivity of recycled mortar from concrete waste experienced to thermal treatment. *Construction and Building Materials*, 22(8), 1723–1729. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.05.012
- Silva, J., Brito, J. de, & Veiga, R. (2009). Incorporation of fine ceramics in mortars. *Construction and Building Materials*, 23(1), 556–564. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.10.014
- Silva, J., Brito, J. de, & Veiga, R. (2010). Recycled Red-Clay Ceramic Construction and Demolition Waste for Mortars Production. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(3), 236–244. doi:10.1061/ASCE0899-1561?2010?22:3?236?
- Silva, M. A. G., Silva, Z. C. G., & Simão, J. (2007). Petrographic and mechanical aspects of accelerated ageing of polymeric mortars. *Cement and Concrete Composites*, 29(2), 146–156. doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.08.003
- Tam, V. W. Y., Tam, C. M., & Le, K. N. (2007). Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1), 82–101. doi:10.1016/j.resconrec.2006.05.012
- Tertre, J. I. (2007). Gestión de residuos de construcción y demoliciones. Áridos reciclados. *Informes de La Construcción*, 59(505), 81–87. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10261/4990>
- Vegas, I., Azkarate, I., Juarro, A., & Frías, M. (2009). Diseño y prestaciones de morteros de albañilería elaborados con áridos reciclados procedentes de escombros de hormigón. *Materiales de Construcción*, 59(295), 5–18. doi:10.3989/mc.2009.44207
- Wang, G., & Tian, B. (2009). Effect of Waste Ceramic Polishing Powder on the Properties of Cement Mortars. In *Energy and Environment Technology, 2009. ICEET '09. International Conference on* (pp. 101–104). IEEE. doi:10.1109/ICEET.2009.31

Figure 7. a) Flexural strength of CM with respect to age, b) Evolution of hydration with the age of CM based on the flexural strength. Source: Self-elaboration.

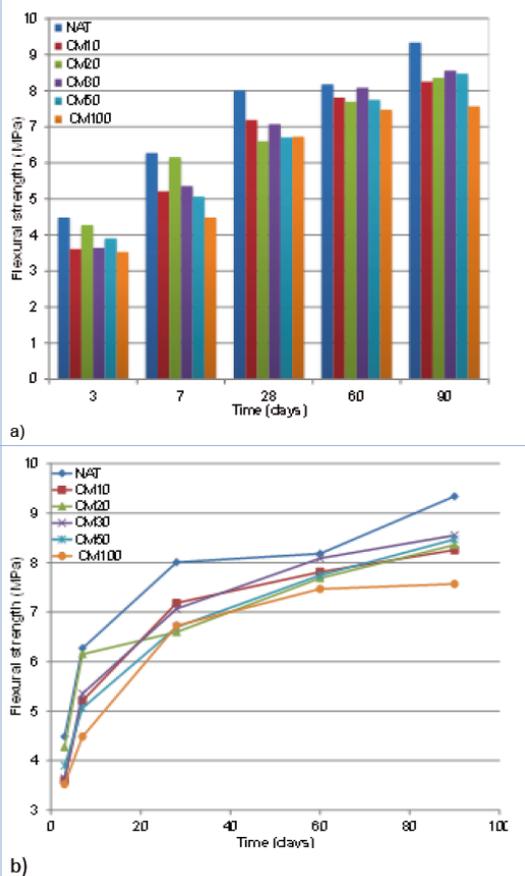


Figure 8. a) ebasic, b) etotal of the CM. Source: Self-elaboration.

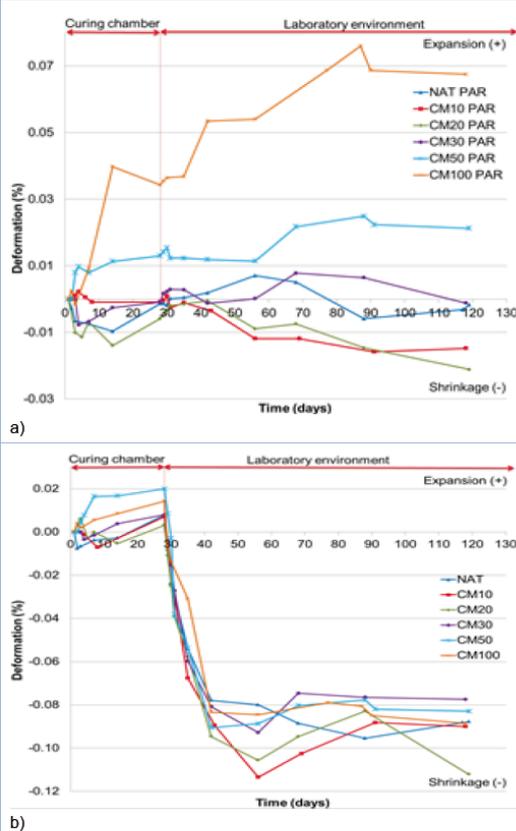
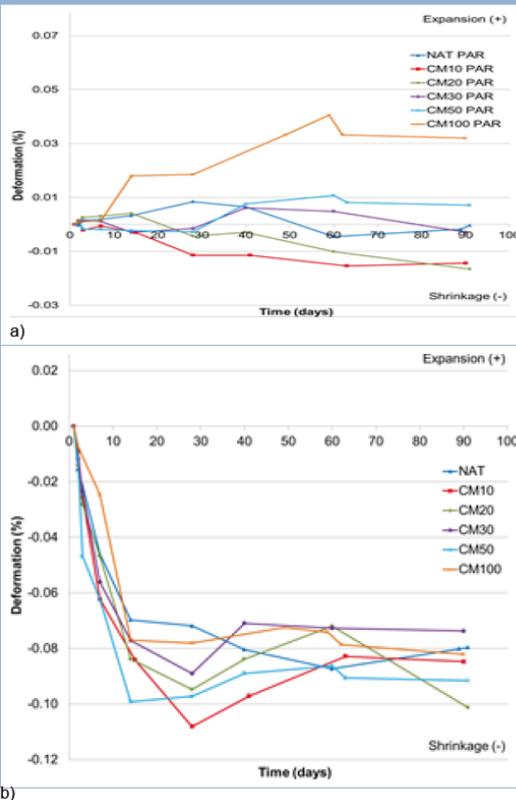


Figure 9. a) ebasic, b) etotal for the CM in laboratory environment. Source: Self-elaboration.



Anexo 2

Mechanical and Basic Deformation Properties of Mortar with Recycled Glass as a Fine Aggregate Replacement

Francisca Guadalupe Cabrera-Covarrubias, Jose Manuel Gomez-Soberon, Jorge Luis Almaral-Sanchez, Susana Paola Arredondo-Rea, Jose Miguel Mendivil-Escalante

Int J Civ Eng (2016). <https://doi.org/10.1007/s40999-016-0071-9>

ATENCIÓN ;

Las páginas 126 a 140 de la tesis, que contienen el artículo mencionado, deben consultarse en el web del editor

Anexo 3

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

<http://dx.doi.org/10.14482/inde.35.1.8949>

Propiedades en estado fresco de morteros con árido reciclado de hormigón y efecto de la relación c/a

Properties in fresh state of mortars with recycled aggregate concrete and effect of c/a relation

Francisca Guadalupe Cabrera-Covarrubias*

José Manuel Gómez-Soberón**

Universidad Politécnica de Cataluña

Jorge Luis Almaral-Sánchez***

Susana Paola Arredondo-Rea****

Universidad Autónoma de Sinaloa

María Consolación Gómez-Soberón*****

Universidad Autónoma Metropolitana

José Miguel Mendivil-Escalante*****

*Universidad Autónoma de Sinaloa**

* Auxiliar de investigación y aspirante a doctora en Ingeniería Civil. Maestra en Ciencias de los Materiales, Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona (ETSECCPB), Barcelona, España. francisca.guadalupe.cabrera@estudiant.upc.edu

** Profesor e investigador tiempo completo. Doctor en Ingeniería de la Construcción. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona (EPSEB), Departamento de Construcciones Arquitectónicas II, Barcelona, España. josemanuel.gomez@upc.edu

*** Profesor e investigador tiempo completo. Doctor en Ciencias de los Materiales. Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS), Facultad de Ingeniería Mochis (FIM), Los Mochis, México. jalmaral@uas.edu.mx

**** Profesora e investigadora tiempo completo. Doctora en Ciencias de los Materiales. Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS), Facultad de Ingeniería Mochis (FIM), Los Mochis, México. paola.arredondo@uas.edu.mx

***** Profesora e investigadora tiempo completo. Doctora en Ingeniería Sísmica. Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), Facultad de Ingeniería, Departamento de Materiales, Ciudad de México. cgomez@correo.azc.uam.mx

***** Auxiliar de investigador y aspirante a doctor. Maestro en Ciencias de la Ingeniería. Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS), Facultad de Ingeniería Mochis (FIM), Los Mochis, México. josemiguelmendivil@hotmail.com

Correspondencia: José Manuel Gómez Soberón. Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona, España. Av. Doctor Marañón 44-50, 08028. Tel: +34 934016242.

Resumen

Los residuos de construcción y demolición se han convertido en un problema urbano que resulta complejo y de un alto coste de gestión. Por este motivo, en la actualidad se está innovando en legislación medioambiental para fomentar diferentes actividades que lo mitiguen; siendo el reciclado una de las más aptas (faculta su reinsertión como material de segunda generación para su nuevo uso en la construcción). En esta dirección se han realizado varios estudios de morteros en los que los residuos sustituyen diferentes porcentajes de los áridos naturales, a falta de una legislación propia que marque pautas de combinación. Sin embargo, poco se ha indagado en el comportamiento de su estado en fresco, el cual es vinculado con sus propiedades en estado endurecido a posteriori. En esta investigación se han realizado ensayos de propiedades en estado fresco (consistencia, densidad y contenido de aire) de morteros que contienen diferentes porcentajes de sustitución de áridos naturales, remplazados por áridos de hormigón reciclado (10, 20, 30, 50 y 100 %) a diferentes relaciones de cemento/arena (1:3.25, 1:4 y 1:4.74). Los resultados obtenidos muestran que los morteros con áridos reciclados reportan menor densidad, necesitan mayor cantidad de agua para lograr la consistencia requerida y presentan mayor contenido de aire que los morteros de referencia, sin sustitución de áridos reciclados.

Palabras clave: consistencia de mortero reciclado, contenido de aire en mortero reciclado, densidad de mortero reciclado, relación arena/cemento en mortero reciclado, residuos de hormigón.

Abstract

Construction and Demolition Residues have become a complex-to-manage and expensive urban problem, so currently an environmental legislation is innovated in order to promote activities to mitigate it being the recycling one of the more accurate (it empowers the reintegration as second generation material for new use in construction). Considering the previous comments, some studies with mortars have been developed, where the natural aggregates are replaced by different percentages of residues, since there are not legislation or regulation that propose them. However, there are few investigations about the behavior of these concretes in fresh state, linked them with their properties in the posteriori hardened state. In this investigation, tests of properties in fresh condition (consistency, density and content of air) of mortars containing different percentages of recycled concrete aggregates as substitution of natural aggregates (10, 20, 30, 50 and 100%) and with different cement/sand rates (1:3.25, 1:4 and 1:4.74), have been realized. The results obtained show that mortars with recycled aggregates present a lower density, need more quantity of water to achieve the required consistency, and have higher air content than the reference mortars.

Keywords: cement/sand relation in recycled mortar, consistency in recycled mortar, content of air in recycled mortar, density in recycled mortar, waste of concrete.

Fecha de recepción: 26 de noviembre de 2015
Fecha de aceptación: 25 de agosto de 2016

Francisca Guadalupe Cabrera, José Manuel Gómez, Jorge Luis Almaral, Susana Paola Arredondo, María Consolación Gómez, José Miguel Mendivil

INTRODUCCIÓN

El término residuos de construcción y demolición (RCD) refiere a los residuos procedentes de infraestructuras, edificaciones nuevas y de la demolición de viviendas y locales [1]. Factores como la industrialización intensa, las nuevas tecnologías, el crecimiento demográfico, la emigración a los centros urbanos y la diversificación del uso de los bienes y servicios ocasionan que dichos recursos se conviertan en un problema urbano costoso y complejo de gestionar [2], [3], puesto que su disposición irregular provoca incremento en los gastos públicos y la degradación del medio ambiente urbano, que finalmente se convierte en la causa de problemas en salud pública [4].

A diferencia de países como Dinamarca, Países Bajos o Bélgica, que llegan a alcanzar porcentajes de reciclaje superiores al 75 %, otros países como España (17 % [5]) e Italia (10 % [6]) reciclan solo pequeñas cantidades de sus RCD, teniendo su mayoría como destino final el vertedero. Esto indica que, aun teniendo el conocimiento y la tecnología que evidencian sus bondades, siguen sin ser aplicados y sin un documento normativo obligatorio [5]. Por tanto, el uso factible de estos materiales es una propuesta de investigación actual, cuyo objetivo se direcciona a alcanzar una sostenibilidad adecuada [7], y posibilitar así la reinserción de los RCD en un ciclo productivo como un material de segunda generación, factible de utilizarse en la industria de la construcción [8].

Diversas investigaciones han estudiado aplicaciones de estos materiales, incluyéndoles previo procesado adecuado, como áridos en morteros y hormigones que sustituyen parcial o totalmente a los áridos naturales [9]. En lo que respecta a los morteros, esta aplicación es un potencial aprovechamiento de la fracción fina de los RCD procedentes de hormigón reciclado; ya que a diferencia del hormigón estructural (Anexo 15 del EHE-08 [10]), que permite su uso con contenidos de hasta un 20 % (en hormigones de resistencia característica específica (f_{ck}) < 40 MPa), en morteros no existe antecedente de legislación o normativa que los asimile. Cuando estos morteros reciclados se equipan con morteros con arena natural, no se llega a detectar diferencias significativas en cuanto a sus prestaciones mecánicas, pudiéndose, por tanto, afirmar que dichos materiales podrían ser también aptos para su uso [11], [12]. Sin embargo, poco se ha indagado acerca de las propiedades iniciales (estado fresco) que incluyan resultados de variables

PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO DE MORTEROS CON ÁRIDO RECICLADO
DE HORMIGÓN Y EFECTO DE LA RELACIÓN C/A

factibles de influir en propiedades futuras en estado endurecido. Es por ello que en esta investigación se establecen y analizan las propiedades en estado fresco (consistencia, densidad y contenido de aire) de los morteros con árido reciclado de hormigón (CoRM), mediante el remplazo del árido natural (NA) por diferentes porcentajes de árido reciclado de hormigón (RCA), así como también su posible afectación por diferentes relaciones de cemento/arena (c/a).

Antecedentes

Se han realizado estudios sobre propiedades en estado fresco de diferentes CoRM, que han registrado comportamientos muy variables [6]. Sin embargo, en estas solo se han analizado algunas pruebas de forma aislada. En cuanto a la consistencia, se ha establecido que la trabajabilidad, tanto del mortero natural (NAM) como de los CoRM, tiene similar comportamiento a instantes posteriores a su mezclado, aunque los CoRM tienen una menor capacidad de conservarla después de un lapso aproximado de diez minutos de su mezclado, atribuido al mayor porcentaje de absorción que presenta el RCA [13]. Para lograr igualdad en esta propiedad, en algunas investigaciones se optó por el incremento de la cantidad de agua de mezclado (considerando la absorción de los RCA) [6], [11], [14], [15]. Sin embargo, en algunos estudios esto no queda esclarecido en su totalidad, por: a) para los CoRM con una relación de agua/cemento, $a/c=0.35$, se mantiene la consistencia de forma adecuada, pero para una $a/c=0.55$ las mezclas presentan valores superiores a las especificados por la normativa [16]; y b) el incremento de porcentaje de RCA puede llegar a incidir en una menor cantidad de agua necesaria; estos materiales pueden llegar a conferir una mejora de su trabajabilidad, al llenar los huecos que ocuparía el agua, por partículas finas del RCA (efecto de "llenado"), siendo que el tamaño, forma y textura de las partículas son relevantes en esta propiedad [2].

De igual forma, no existe acuerdo en cuanto a las variables que influyen en el comportamiento a la densidad de los CoRM, debido a: 1) se considera que su densidad disminuye a medida que se incrementa el porcentaje de sustitución de NA por RCA, atribuido a la menor densidad del propio RCA con respecto de la del NA [11]; y 2) se opina, en contra de lo anterior, que esta se incrementa (incluso con partículas de RCA de menor densidad que el NA) por el efecto de "llenado" (huecos no ocupados por el NA que son

Francisca Guadalupe Cabrera, José Manuel Gómez, Jorge Luis Almaral, Susana Paola Arredondo, María Consolación Gómez, José Miguel Mendivil

ocupados por partículas finas <0.149 mm de RCA), el cual se maximiza a medida que el remplazo se incrementa, lo cual vuelve al mortero más compacto [2].

Por último, para la propiedad de contenido de aire en los CoRM no se ha encontrado información previa.

MATERIALES

Los áridos utilizados en este estudio fueron: un RCA facilitado por una empresa local autorizada por la Agencia de Residuos de Cataluña para el reciclaje de residuos de la construcción, en el que se incluían tamaños de partículas de entre 0 a 20 mm (requirió seccionarlo por el tamiz N° 4 (4.75 mm) para segregarlo en las fracciones fina y gruesa); y un NA adquirido de una empresa local comercializadora de áridos para la construcción, constituido por tamaños de partículas de entre 0 a 4 mm. Además, como aglutinante para fabricar los morteros se utilizó un cemento comercial tipo CEMI 42.5 N/SR (UNE EN 197-1:2011 [17]) de uso habitual en el sector y agua proveniente de grifo. Con estos materiales se fabricaron los diferentes CoRM de estudio y se contrastaron con el mortero de referencia con solo áridos naturales (NAM).

Debido a que las curvas granulométricas de los áridos no se ubicaron dentro de los límites de especificación (ASTM C144 [18]), se realizó un ajuste de sus perfiles para su corrección; buscando, de esta forma, hacerlos más equiparables y aptos para la fabricación de los morteros. Para lo anterior, en cada árido por separado se seccionó el material en dos partes mediante el tamiz N° 30 (0.59 mm), practicándose diferentes combinaciones de las partes y buscando como objetivo de homogenización las que produjesen la máxima compacidad. Para el caso del RCA, la combinación óptima se alcanzó en $60 \% > \text{tamiz N}^\circ 30 > 40 \%$, mientras que para el NA se alcanzó en $50 \% > \text{tamiz N}^\circ 30 > 50 \%$. En la figura 1 se muestran los perfiles granulométricos de ambos áridos con y sin el ajuste anterior.

PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO DE MORTEROS CON ÁRIDO RECICLADO DE HORMIGÓN Y EFECTO DE LA RELACIÓN C/A

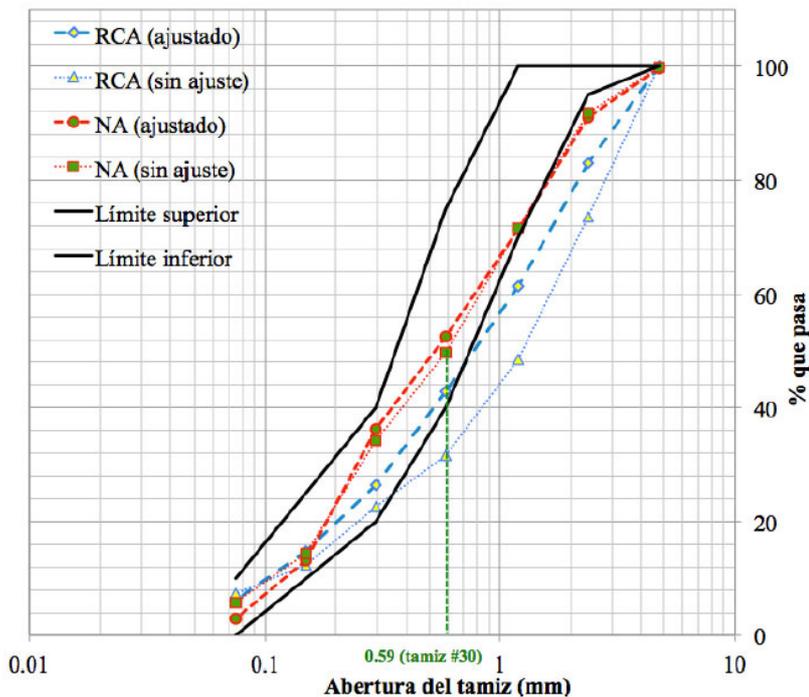


Figura 1. Granulometrías de los áridos

En la tabla 1 se indican las propiedades físicas de los áridos utilizados, obtenidas con base en las normas ASTM C128, C136 y C117 [19], [20], [21]. Por lo que respecta a la densidad, en esta tabla se observa que para el RCA tanto D_{OD} como D_{SSD} son menores que la del NA (diferencias de 392 y 261 kg/m^3); en cuanto a el coeficiente de absorción, el del RCA es notoriamente mayor que el del NA (diferencia del 6.3 %), como también lo es el contenido de partículas menor que 75 μm . Por último, el módulo de finura del RCA es mayor.

Tabla 1. Propiedades físicas de los áridos

Propiedad	NA	RCA
D_{OD} (Kg/m^3) *	2581.6	2189.7
D_{SSD} (Kg/m^3) **	2623.6	2362.6
Coficiente de absorción (%)	1.6	7.9
Módulo de finura	2.4	2.7
Partículas tamaño <75- μm (%)	2.9	6.2

*Densidad en estado seco. **Densidad en húmedo superficialmente seco.

Francisca Guadalupe Cabrera, José Manuel Gómez, Jorge Luis Almaral, Susana Paola Arredondo, María Consolación Gómez, José Miguel Mendivil

METODOLOGÍA

Preparación de las mezclas

Las proporciones de las mezclas en estudio se muestran en la tabla 2. El acuerdo de nomenclaturas adoptado para los CoRM fue: CoRM-d.dd-xx; donde d.dd = c/a (1:3.25, 1:4 y 1:4.75), y xx = % de RCA en sustitución del NA en peso (10, 20, 30, 50 y 100 %). Los morteros de referencia (con 100 % de NA) para cada c/a se nombraron como: NAM-3.25, NAM-4.00 y NAM-4.75. Todas las mezclas fueron diseñadas con una relación a/c inicial = 0.50; las características y proporciones reportadas son las necesarias para obtener 1 dm³ de cada una de las mezclas de este estudio, tomando como guía lo acordado en la norma ASTM C109 [22].

Tabla 2. Dosificación de materiales

Clasificación y proporciones de la mezcla	a/c inicial	Cemento (g)	NA*		RCA*	
			< tamiz 30 (g)	> tamiz 30 (g)	< tamiz 30 (g)	> tamiz 30 (g)
NAM-3.25	0.5	480	781	781	0	0
CoRM-3.25-10		477	697	697	62	93
CoRM-3.25-20		447	581	581	116	174
CoRM-3.25-30		448	510	510	175	262
CoRM-3.25-50		464	377	377	302	453
CoRM-3.25-100		397	0	0	516	774
NAM-4.00		400	800	800	0	0
CoRM-4-10		397	714	714	63	95
CoRM-4-20		380	608	608	122	182
CoRM-4-30		377	528	528	181	272
CoRM-4-50		382	382	382	306	459
CoRM-4-100		395	0	0	632	948
NAM-4.75		342	811	811	0	0
CoRM-4.75-10		330	705	705	63	94
CoRM-4.75-20		327	622	622	124	187
CoRM-4.75-30		326	542	542	186	279
CoRM-4.75-50		323	383	383	306	460
CoRM-4.75-100		383	0	0	728	1091

*Condición seca.

La secuencia de mezclado incluyó diversos procesos. Primero, el agua resultante de la a/c inicial se utilizó para realizar una pre-saturación de los áridos durante un minuto (restricción de pérdida del agua de hidratación por movilidad a posteriori). Después se incorporó y mezcló a velocidad media durante 60 segundos el cemento junto con los áridos en el recipiente de amasado de la mezcladora (Mod. E93, marca Matest). A continuación se mezcló a velocidad alta durante 30 segundos y posterior reposo de la mezcla por 90 segundos más. Finalmente se mezcló por 60 segundos más a velocidad alta. Concluido el proceso de mezclado, se realizaron los ensayos en estado fresco (consistencia, densidad y contenido de aire) que conforman el estudio.

Consistencia

Para la consistencia, su arreglo experimental, en acuerdo con la ASTM C230 [23], se constituye por una mesa de sacudidas (ver figura 2a) dispuesta con una placa superior circular rígida y sustentada en el centro por un soporte, de forma que se permita una caída libre de la placa y reciba ésta un golpe al llegar al final del recorrido. Con lo anterior se provoca que la mezcla, dispuesta sobre la parte superior de ésta, se extienda en horizontal de forma libre. Para lograr normalizar todas las mezclas se buscó una fluidez constante, adquiriéndose ésta cuando tuviesen una fluidez de $110 \pm 5 \%$ posterior a aplicar 25 caídas en un periodo de 15 segundos (establecido en la ASTM C109 [22]). Dicha fluidez se determina mediante la relación entre el promedio de dos diámetros perpendiculares (d_1 y d_2 en la figura 2a) que forma la mezcla después de la extensión inducida y el diámetro del molde inicial (figura 2b). Cuando la mezcla no cumple con este requerimiento, se procede a incrementar (o reducir) la cantidad de agua en pequeñas porciones hasta lograr la fluidez establecida.

Francisca Guadalupe Cabrera, José Manuel Gómez, Jorge Luis Almaral, Susana Paola Arredondo, María Consolación Gómez, José Miguel Mendivil

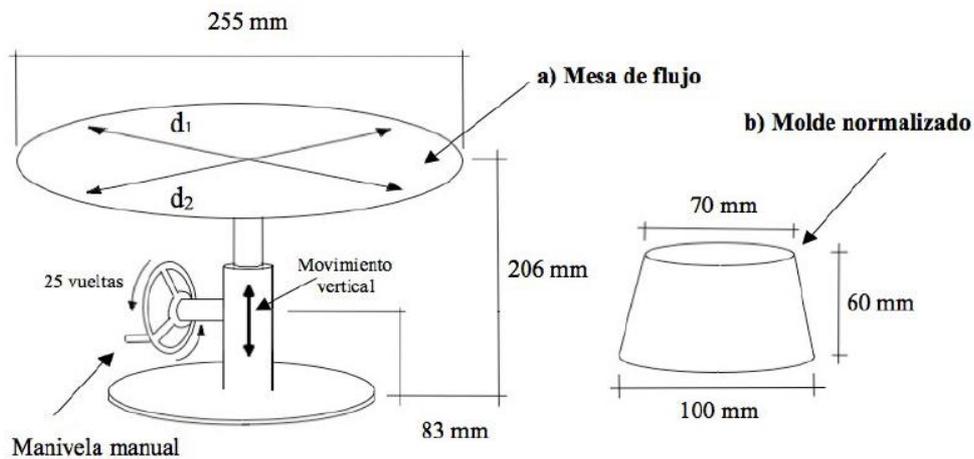


Figura 2. a) Mesa de flujo, b) Molde

Densidad

El procedimiento ASTM C185 [24] consiste en llenar de mortero (tres capas de igual espesor y apisonando 20 veces en cada una) un recipiente cilíndrico normalizado con capacidad de un litro (figura 3a). Enrasado el molde, se pesa, descontándole la tara (figura 3b). La densidad de los morteros se obtiene aplicando la fórmula (1).



Figura 3. a) Molde normalizado y pisón, b) Pesado en báscula

PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO DE MORTEROS CON ÁRIDO RECICLADO
DE HORMIGÓN Y EFECTO DE LA RELACIÓN C/A

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1)$$

Donde ρ = Densidad (g/cm³); M = Masa (g); V = Volumen (cm³).

Contenido de aire

El procedimiento se basa en el uso del llamado “Medidor B” ASTM C231 [25], el cual utiliza un recipiente regulado de un litro de capacidad y un medidor de aire normalizado (Luftgehaltsprüfer marca TESTING, figura 4a). El principio que rige la prueba se basa en la Ley de Boyle (figura 4b), que establece que la presión de un gas en un recipiente cerrado es inversamente proporcional al volumen del recipiente a una temperatura constante [26]; por lo que si el equipo es capaz de igualar un volumen conocido de aire y presión dentro de una cámara cerrada, el volumen desconocido es referido como el aire dentro del mortero.

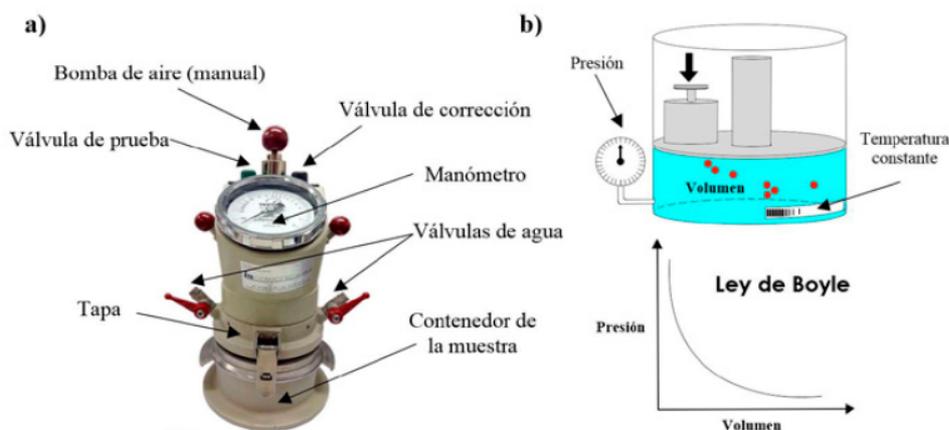


Figura 4. a) Medidor B de aire, b) Principio del comportamiento (Ley de Boyle)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Consistencia

En la figura 5 se muestran las cantidades de agua requeridas para cada mortero después de haberse realizado el ensayo de consistencia. Las barras en

Francisca Guadalupe Cabrera, José Manuel Gómez, Jorge Luis Almaral, Susana Paola Arredondo, María Consolación Gómez, José Miguel Mendivil

tono oscuro corresponden a la cantidad de agua necesaria referida en una dosificación por peso. En este caso, todas las mezclas contienen la misma cantidad de cemento, considerado como el necesario para obtener 1 dm³ de cada mortero de NAM (para cada una de las relaciones c/a). Las barras en tono claro indican la cantidad de agua necesaria para obtener 1 dm³ de cada una de las mezclas, tanto los NAM como los CoRM (dosificación en volumen). A partir de estos resultados se establecen las siguientes relaciones:

- Al considerar la dosificación por peso (barras en tono oscuro), el uso o presencia de RCA en los CoRM demanda una mayor cantidad de agua necesaria para alcanzar la condición de consistencia establecida en la normativa; este incremento en la demanda de agua tiene una correlación directa con el incremento del porcentaje de RCA en los CoRM, y presenta su valor máximo en los CoRM-d.dd-100.
- En cuanto a las diferentes relaciones c/a estudiadas, se observa un comportamiento similar (el efecto de c/a parece no ser significativo), a excepción de las mezclas CoRM-d.dd-100, que sí presentan un incremento directo y sensiblemente mayor para CoRM-4.75-100.
- Cuando se establecen las cantidades de agua para obtener el mismo volumen en los diferentes CoRM, se observa que los requerimientos de agua son sensiblemente mayores que en los NAM, con aumentos en promedio del del 6.49, 3.20 y 5.36 % (para las tres diferentes familias de NAM, respectivamente). Esto permite establecer una tendencia de incremento de necesidad de agua a mayor relación c/a, siendo la mezcla CoRM-4.75-100 la que alcanza la mayor demanda (20.86 % respecto al NAM-4.75).

PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO DE MORTEROS CON ÁRIDO RECICLADO DE HORMIGÓN Y EFECTO DE LA RELACIÓN C/A

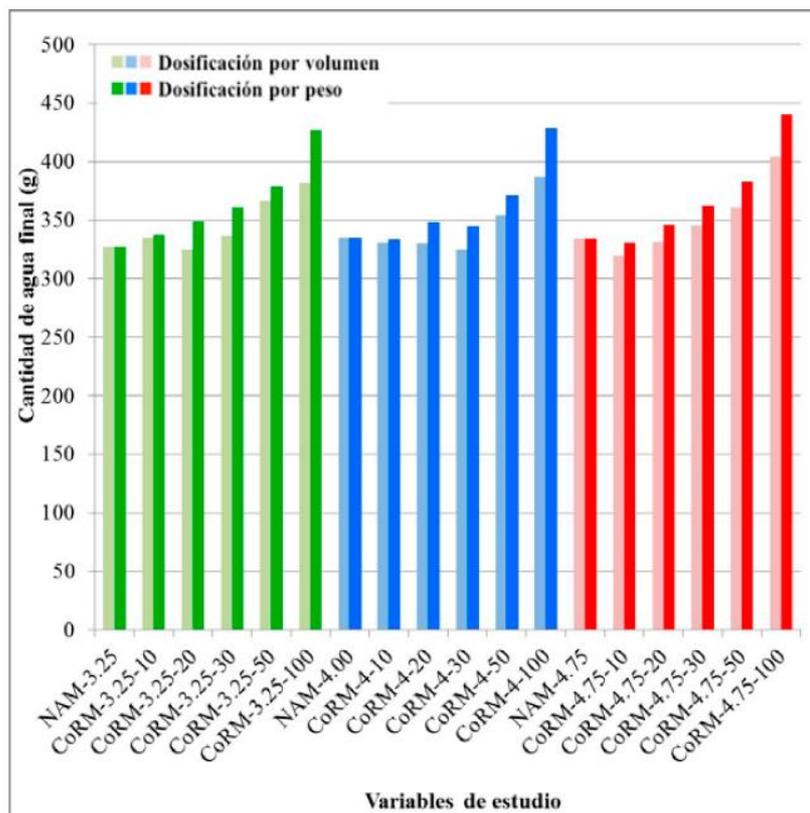


Figura 5. Cantidad de agua necesaria para los CoRM

A partir de lo anterior se deduce que el comportamiento en el incremento de la cantidad de agua necesaria para alcanzar la consistencia normalizada de los CoRM puede ser atribuida al mayor coeficiente de absorción que presenta el RCA con respecto al NA (ver tabla 1), aumentando esta a medida que el contenido de RCA se incrementa en los CoRM.

En cuanto a la menor cantidad de agua necesaria para fabricar 1 dm^3 (dosificación por volumen) presentado en algunas muestras (barras en tono claro, iniciando en el CoRM-d.dd-20 o CoRM-d.dd-30) y comparándolas con las de dosificación por peso, el decremento de las primeras es atribuible a la menor densidad del RCA, que ocasiona la necesidad de una menor cantidad de agua para lograr el mismo volumen.

Un comportamiento similar, en cuanto a la mayor demanda de agua (en general), se ha establecido en estudios previos, necesitando incrementos

Francisca Guadalupe Cabrera, José Manuel Gómez, Jorge Luis Almaral, Susana Paola Arredondo, María Consolación Gómez, José Miguel Mendivil

del 30 y 19 % cuando se utilizó (como RCA) un árido proveniente de una mezcla con diversos escombros (72 % de hormigón) o a residuos de elementos de hormigón prefabricados, respectivamente [6]. También, en un estudio similar, en el que se realizaron diferentes contenidos de remplazo, se indicó que la cantidad de agua necesaria por peso aumenta al incrementarse el porcentaje del RCA (incremento del 67 % para un CoRM-d.dd-100) [11], y del 33 % en el estudio de Moriconi *et al.* [27]. De igual forma, para un CoRM-4.0-50 y CoRM-8.0-50 se reportaron incrementos del 16 y 20 %, respectivamente, en relación con sus NAM [15]. En todas estas investigaciones, este efecto fue atribuido al mayor porcentaje de absorción que tenía el RCA utilizado (en comparación con el NA).

A partir de los resultados anteriores, en la figura 6 se presentan las diferentes relaciones a/c finales de todos los morteros estudiados (mezclas a las que se les ha llevado a alcanzar la consistencia normalizada). En esta figura se puede observar que la relación a/c aumenta al incrementar el porcentaje de RCA en las mezclas (causado por el mayor coeficiente de absorción que presenta el RCA con respecto al NA), y que esto es más notorio con porcentajes de RCA elevados. Un efecto semejante se observa al relacionarse con el incremento de la relación c/a, puesto que mayores contenidos de RCA se suscitan en dichas mezclas. El CoRM-4.75-100 contiene mayor contenido de RCA y, por tanto, una mayor relación a/c (igual a 1.3); mientras que el CoRM-4-100 y el CoRM-3.25-100 presentan valores más bajos de a/c (1.1 y 0.9, respectivamente). Por tanto, las relaciones en cuanto al efecto del contenido de RCA, así como de la relación c/a, son consecuencia directa de las hipótesis y relaciones antes establecidas y expuestas en la figura 5. De conformidad con lo anterior, en investigaciones previas también se han reportado incrementos en la relación a/c con respecto a sus respectivos NAM: 0.78 y 0.71, comparado con respecto al 0.6 [6], 0.6 con respecto al 0.5 [27] y de 0.71 con respecto al 0.52 [28]; todo ellos comparados con la relación a/c de sus respectivos NAM.

PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO DE MORTEROS CON ÁRIDO RECICLADO DE HORMIGÓN Y EFECTO DE LA RELACIÓN C/A

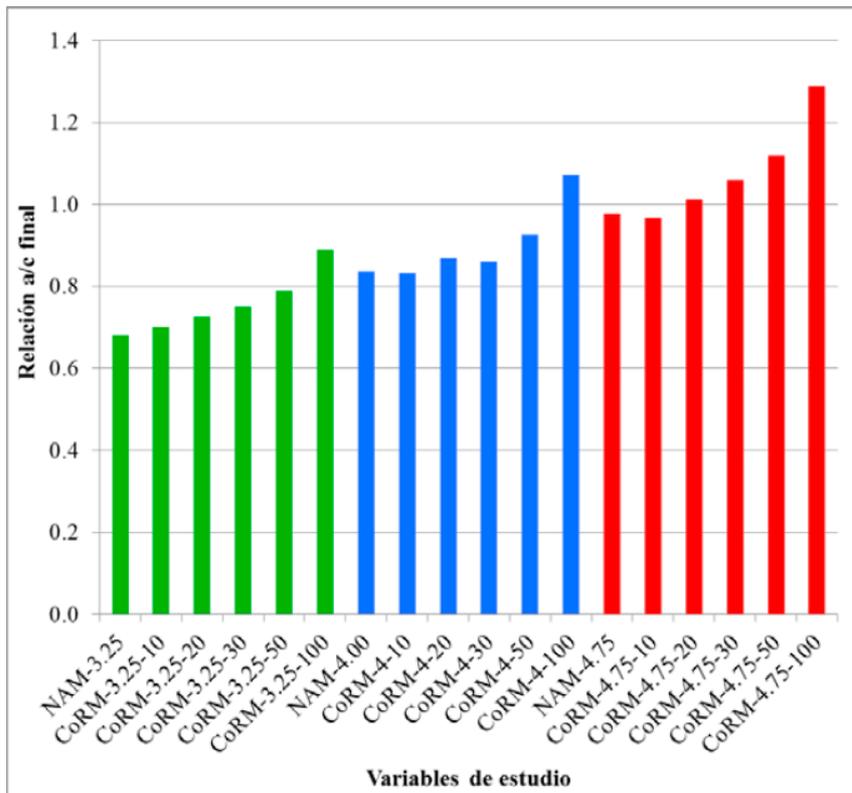


Figura 6. Relación a/c final de los CoRM

Densidad

Los resultados de las densidades para los CoRM estudiados se presentan en la figura 7; en esta se pueden observar dos tendencias axiomáticas (en ambos casos rige una relación de tipo inversa entre ellas):

- La densidad de los CoRM disminuye de forma inversa y proporcional al incremento del porcentaje de RCA (hasta CoRM-d.dd-50), y esta disminución llega a ser del 3 % en promedio con respecto a sus respectivos NAM; para el caso de CoRM-d.dd-100, la diferencia es más notable, con decrementos que llegan a ser del 5 % con respecto a sus NAM.
- El incremento de la relación c/a provoca una reducción en la densidad de los CoRM. En esta investigación, para la familia de mezclas

Francisca Guadalupe Cabrera, José Manuel Gómez, Jorge Luis Almaral, Susana Paola Arredondo, María Consolación Gómez, José Miguel Mendivil

de CoRM-4.0-XX y CoRM-4.75-XX se obtuvieron menores diferencias entre ellas; sin embargo, si se comparan con la familia de mezclas CoRM-3.25-XX, los valores se distancian bastante más.

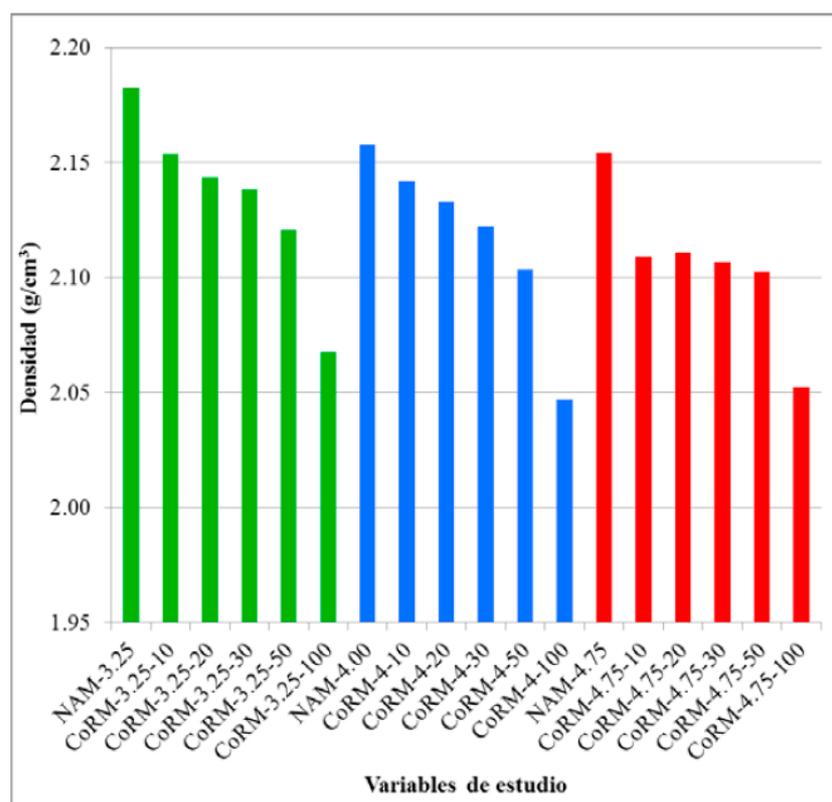


Figura 7. Densidad de los diferentes CoRM estudiados

Las anteriores observaciones se imputan a la menor densidad que tiene el RCA con respecto a la del NA (ver tabla 1); esto es, el incremento del contenido del RCA en los CoRM ocasiona reducciones de densidad en los CoRM de forma proporcional al mismo. Esta misma argumentación es aplicable para el caso de la relación c/a, ya que a mayor relación de c/a mayor es el contenido de RCA dentro de los CoRM, y por lo tanto menor es la densidad del mortero. Los anteriores resultados se ajustan también a lo obtenidos por otros investigadores [11], en donde los CoRM presentaron menor densidad que los NAM; en específico, las densidades se atenuaron a medida que se aumentó el porcentaje de remplazo de RCA (23 % menos para los morteros

PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO DE MORTEROS CON ÁRIDO RECICLADO
DE HORMIGÓN Y EFECTO DE LA RELACIÓN C/A

CoRM-d.dd-100). Este dato fue atribuido a la baja densidad del RCA utilizado en la investigación.

Contenido de aire

En la figura 8 se presentan los resultados del contenido de aire obtenidos para los CoRM estudiados; del gráfico se pueden desprender las siguientes observaciones:

- El contenido de aire en los NAM es menor que el reportado por los CoRM con contenidos de RCA menores al 50 % (CoRM-d.dd-50), sin embargo, para los morteros CoRM-d.dd-100 el contenido de aire es menor que los morteros de NAM de referencia.
- El contenido de aire disminuye a medida que el porcentaje de RCA en los CoRM se incrementa; estableciéndose menores diferencias en los CoRM con porcentajes bajos (hasta el 30 %).
- Para los CoRM-3.25-XX y CoRM-4.0-XX, los resultados de contenidos de aire son muy similares (ambos entre 4.5 y 3.6 % en promedio general); sin embargo, para CoRM-4.75-XX la variabilidad de los mismos se incrementa (valores entre el 5.2 y 2.9 % en promedio general), presentando valores similares para las familias de morteros CoRM-d.dd-20 y CoRM-d.dd-30.

Francisca Guadalupe Cabrera, José Manuel Gómez, Jorge Luis Almaral, Susana Paola Arredondo, María Consolación Gómez, José Miguel Mendivil

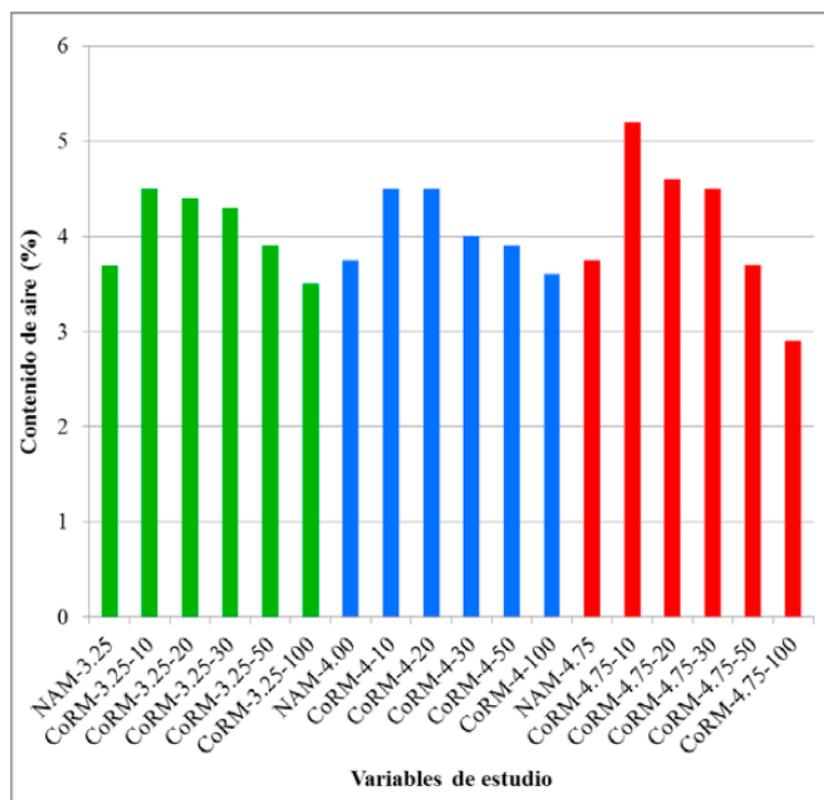


Figura 8. Contenido de aire para los diferentes CoRM

A partir de estas observaciones, y haciendo énfasis en la primera, se puede afirmar que el comportamiento presentado por los CoRM puede ser atribuido a la baja densidad en fresco de los mismos con respecto a los NAM (ver figura 7); siendo los primeros capaces de contener una mayor cantidad de huecos con aire (además de su propia baja densidad) debido a la forma angulosa propia de sus partículas [29]. En cuanto a la segunda observación, ésta se atribuye a la mayor cantidad de partículas de tamaños pequeños (<75 μm) (ver tabla 1) presente en los CoRM, logrando llenar éstas a los vacíos entre las partículas de mayor tamaño - óptimo acomodo entre ellas, mayor compactación, y por tanto, reducción del contenido de aire –; siendo más notorio (menor contenido de aire) cuanto mayor es el porcentaje de sustitución. Por último, las deducciones indicadas tienen igual validez para la tercera de las observaciones realizadas; para la primera, los porcentajes de sustitución presentan similares comportamientos, y en el segundo caso, CoRM-4.75-XX contiene mayor cantidad de RCA.

PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO DE MORTEROS CON ÁRIDO RECICLADO
DE HORMIGÓN Y EFECTO DE LA RELACIÓN C/A

Las anteriores deducciones y resultados al respecto de contenidos de aire en los morteros no se han podido equiparar con estudios previos al no encontrarse precedentes.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados presentados se puede hacer mención de las siguientes conclusiones formuladas a partir de la investigación experimental realizada:

El incremento en el porcentaje de reemplazo de RCA por NA provocará mayor demanda de agua para alcanzar la consistencia normalizada, siendo más notorio para reemplazos del 100 %; con igual validez para reemplazos del 100 % y con una mayor relación c/a (en este estudio $c/a = 1:4.75$).

La densidad de los CoRM disminuye de forma inversa y proporcional al aumento en el porcentaje de sustitución de RCA, y así mismo cuando se incrementa la relación c/a. En este estudio las densidades de porcentajes de sustitución (hasta 50 % de RCA) en los morteros con $c/a = 1:4.75$ son menores; sin embargo, para reemplazos del 100 % y para las tres relaciones c/a las densidades resultan ser notablemente bajas.

El contenido de aire disminuye cuanto mayor es el reemplazo de RCA por NA, pero aumenta cuando mayor es la relación c/a en los CoRM.

Variaciones tanto en los contenidos de RCA en los CoRM como en las relaciones c/a repercutirán en las propiedades en estado fresco de los mismos; siendo más sensible su variabilidad por el efecto del porcentaje de sustitución de RCA que por la propia c/a.

Se evidencia que en el estado en fresco de los CoRM, el contenido de RCA y de su relación c/a son causantes de afectación o influencia; por lo cual es previsible que estas variables puedan también causar cambios en el estado endurecido, lo cual requiere ampliar y continuar con estas investigaciones.

REFERENCIAS

- [1] BOE. (2015, Nov 7). "Real Decreto 105/2008, de 1° de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición",

Francisca Guadalupe Cabrera, José Manuel Gómez, Jorge Luis Almaral, Susana Paola Arredondo, María Consolación Gómez, José Miguel Mendivil

- BOE n° 38, de 13 de febrero de 2008, 2008. [En línea]. Disponible en: <http://www.boe.es/boe/dias/2008/02/13/pdfs/A07724-07730.pdf>.
- [2] M. Braga, J. De Brito, and R. Veiga, "Incorporation of fine concrete aggregates in mortars", *Constr. Build. Mater.*, vol. 36, pp. 960-968, 2012. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.06.
- [3] S.-T. Lee, "Influence of recycled fine aggregates on the resistance of mortars to magnesium sulfate attack", *Waste Manag.*, vol. 29, n° 8, pp. 2385-2391, 2009. Doi:10.1016/j.wasman.2009.04.002.
- [4] A. Sales and F. Rodrigues de Souza, "Concretes and mortars recycled with water treatment sludge and construction and demolition rubble", *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, n° 6, pp. 2362-2370, 2009. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.11.001.
- [5] CEDEX (2015, Nov 7). "Residuos de Construcción y Demolición," Ficha Técnica 4.1, 2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/0AF8BEF6-2BE2-4456-AE0C-7181B3A2975B/119974/RESIDUOSDECONSTRUCCIONYDEMOLICION1.pdf>.
- [6] V. Corinaldesi and G. Moriconi, "Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate", *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, n° 1, pp. 289-294, 2009. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.12.006.
- [7] G. Barluenga and F. Hernández-Olivares, "Experimental approach to the use of recycled materials in mortar and concrete for architectural experimental applications", in *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures*, 2004, n° 1, pp. 403-411.
- [8] B. Calvo Pérez, J.-L. Parra y Alfaro, B. Astudillo Matilla, C. M. Sanabria Zapata y R. Carretón Moreno, "Áridos Reciclados para Hormigones y Morteros. Caracterización Mineralógica y Química", 2002. [En línea]. Disponible en: <http://ingenierosdeminas.org/documentos/06-Materias%20primas%20de%20interes%20industrial.-3.pdf>
- [9] G. Valdés Vidal, Ó. J. Reyes-Ortiz y G. González Peñuela, "Aplicación de los residuos de hormigón en materiales de construcción," *Ing. y Desarro.*, vol. 29, n° 1, pp. 17-33, 2011.
- [10] BOE (2016, Mar 28). "Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)", *BOE* n° 203, de 22 de agosto de 2008, 2008. [En línea]. Disponible en: http://www.fomento.es/nr/rdonlyres/e20dff7-fd75-4803-8ca4-025064bb1c40/68186/1820103_2008.pdf.
- [11] I. Vegas, I. Azkarate, A. Juarrero y M. Frías, "Diseño y prestaciones de morteros de albañilería elaborados con áridos reciclados procedentes de escombros de hormigón", *Mater. Construcción*, vol. 59, n° 295, pp. 5-18, 2009. Doi:10.3989/mc.2009.44207.

PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO DE MORTEROS CON ÁRIDO RECICLADO
DE HORMIGÓN Y EFECTO DE LA RELACIÓN C/A

- [12] J. L. Parra y Alfaro, B. Astudillo Matilla, R. Carretón Moreno, J. Castilla Gómez, C. M. Sanabria Zapata y E. Antuña Bernardo, "Áridos reciclados para hormigones y morteros", *Boletín Geológico y Min.*, vol. 117, n° 4, pp. 763-772, 2006.
- [13] Á. M. Hincapié Henao y E. A. Aguja López, "Agregado reciclado para morteros", *Rev. Univ. EAFIT*, vol. 39, n° 132, pp. 76-89, 2003.
- [14] V. Corinaldesi, M. Giuggiolini, and G. Moriconi, "Use of rubble from building demolition in mortars", *Waste Manag.*, vol. 22, n° 8, pp. 893-899, 2002. Doi:10.1016/S0956-053X(02)00087-9.
- [15] P. R. Lopes Lima and M. Batista Leite, "Influence of CDW Recycled Aggregate on Drying Shrinkage of Mortar", *Open J. Civ. Eng.*, vol. 2, n° 2, pp. 53-57, 2012. Doi:10.4236/ojce.2012.22009.
- [16] C.-C. Fan, R. Huang, H. Hwang, and S.-J. Chao, "The Effects of Different Fine Recycled Concrete Aggregates on the Properties of Mortar", *Materials (Basel)*, vol. 8, n° 5, pp. 2658-2672, 2015. Doi:10.3390/ma8052658.
- [17] AENOR, UNE-EN 197-1. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes. Madrid, 2011, p. 40.
- [18] *ASTM International*, C144-99. Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar. West Conshohocken, PA., 1999, p. 2. Doi:10.1520/C0144-99.
- [19] *ASTM International*, C128-04a. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption. West Conshohocken, PA., 2004, p. 6. Doi:10.1520/C0128-04a.
- [20] *ASTM International*, C136-06. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. West Conshohocken, PA., 2006, p. 5. Doi:10.1520/C0136-06.
- [21] *ASTM International*, C117-95. Standard Test Method for Materials Finer than 75- μm (N°. 200) Sieve in Mineral. West Conshohocken, PA., 1995, p. 4. Doi:10.1520/C0117-95.
- [22] *ASTM International*, ASTM C109-05. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars. West Conshohocken, PA., 2005, p. 9. Doi:10.1520/C0109_C0109M-05
- [23] *ASTM International*, C230/C230M-03. Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement. West Conshohocken, PA., 2003, p. 7. Doi:10.1520/C0230_C0230M-03.
- [24] *ASTM International*, C185-99. Standard Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar. West Conshohocken, PA., 2001, p. 3. Doi:10.1520/C0185-99.

Francisca Guadalupe Cabrera, José Manuel Gómez, Jorge Luis Almaral, Susana Paola
Arredondo, María Consolación Gómez, José Miguel Mendivil

- [25] *ASTM International*, C231-08b. Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method. West Conshohocken, PA., 2008, p. 9. Doi:10.1520/C0231-08.
- [26] Educaplus.org. (2015, Dic 30). *Ley de Boyle*, Leyes de los gases, 2013. [En línea]. Disponible en: http://www.educaplus.org/gases/ley_boyle.html.
- [27] G. Moriconi, V. Corinaldesi, and R. Antonucci, "Environmentally-friendly mortars: a way to improve bond between mortar and brick", *Mater. Struct.*, vol. 36, n° 264, pp. 702-708, 2003. Doi:10.1007/BF02479505.
- [28] V. Corinaldesi, "Mechanical behavior of masonry assemblages manufactured with recycled-aggregate mortars", *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, n° 7, pp. 505-510, Aug. 2009. Doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.05.003.
- [29] F. G. Cabrera-Covarrubias, J. M. Gómez-Soberón, J. L. Almaral-Sánchez, R. Corral-Higuera, A. Navarro-Ezquerria, and M. Tous-Coll, "Characterization of three recycled materials for alternative use of mortars", *Int. J. Sustain. Mater. Process. ECO-Efficient - IJSMPE*, vol. 1, n° 3, pp. 13-17, 2014. Doi:10.15224/978-1-63248-020-0-25.

Barcelona, España, 2017