

Desempenho do concreto com adições pozolânicas e agregado reciclado

H. Gurdián¹, P. Garcés¹ , E. Zornoza¹ , E. García Alcocel¹ 

* Autor de Contato: pedro.garces@ua.es

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i3.542>

Recepção: 18/06/2021 | Aceitação: 04/08/2021 | Publicação: 01/09/2021

RESUMO

As propriedades mecânicas e de durabilidade de concreto com baixo impacto ambiental são avaliadas com substituições de cimento por subprodutos industriais (35% cinzas volantes e 15% catalisador de craqueamento catalítico) e de agregados graúdos por agregados reciclados (20% e 100%). Os concretos estudados foram submetidos a ensaios de caracterização mecânica, porosidade, permeabilidade ao ar e nível de penetração do íon cloreto. Os resultados obtidos mostram que as propriedades mecânicas são reduzidas com o aumento das proporções de agregado reciclado e de resíduos usados como substituição na matriz cimentícia, enquanto as propriedades de durabilidade são afetadas apenas pelo aumento na porcentagem de agregados reciclados. Todos os concretos estudados são adequados para uso como concreto estrutural.

Palavras-chave: agregado reciclado; resíduo de catalisador do craqueamento de petróleo; cinzas volantes; concreto; propriedades mecânicas; durabilidade.

Citar como: Gurdián, H., Garcés, P., Zornoza, E., García Alcoce, E. (2021), “Desempenho do concreto com adições pozolânicas e agregado reciclado”, Revista ALCONPAT, 11 (3), pp. 17 – 30, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i3.542>

¹ Dpto. de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante, Alicante, España.

² Dpto. de Construcciones Arquitectónicas, Universidad de Alicante, Alicante, España.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autora H. Gurdián contribuiu com a execução do prefeito parte do trabalho experimental, assim como com a redação e revisão deste trabalho. O autor P. Garcés contribuiu com a supervisão, direção e redução de este trabalho (33%). O autor E. Zornoza contribuiu com a supervisão, direção e redução deste trabalho (33%). La autora E. García Alcocel contribuiu com a supervisão, direção e redação deste trabalho (33%).

Licença Creative Commons

Copyright (2021) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no segundo número do ano 2022, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do primeiro número do ano de 2022.

Durability of concrete with pozzolanic admixtures and recycled aggregates

ABSTRACT

Mechanical and durability properties of concrete with a reduced environmental impact have been evaluated. This approach consist of replacing 50% of Portland cement by fly ash (35%) and spent catalytic cracking catalyst (15%), and also substituting a 20% and 100% of natural coarse aggregates by recycled aggregates. The performance of the prepared concrete consisted of mechanical tests, porosity, air permeability and chloride penetration. The obtained results show that the mechanical performance are significantly reduced in concretes with recycled aggregates and the pozzolanic binder, but durability-related properties are only affected by the use of recycled aggregates. Nevertheless, all the tested formulations are suitable for their use as structural concretes.

Keywords: recycled aggregate; spent catalytic cracking catalyst; fly ash; concrete; mechanical properties; durability.

Comportamiento de hormigones con adiciones puzolánicas y árido reciclado

RESUMEN

Se evalúan las propiedades mecánicas y de durabilidad de hormigones de bajo impacto ambiental con sustituciones de cemento por subproductos industriales (35% cenizas volantes y 15% catalizador de craqueo catalítico) y de áridos gruesos por áridos reciclados (20% y 100%). Los hormigones estudiados se han sometido a ensayos de caracterización mecánica, porosidad, permeabilidad al aire y nivel de penetración del ion cloruro. Los resultados obtenidos muestran que las propiedades mecánicas se ven reducidas con el incremento en las proporciones de árido reciclado y de los residuos utilizados como sustitución en la matriz cementante, mientras que las propiedades de durabilidad se ven únicamente afectadas por el aumento en el porcentaje de áridos reciclados. Todos los hormigones estudiados son aptos para ser utilizados como hormigón estructural.

Palabras clave: árido reciclado; residuo de catalizador del craqueo del petróleo; ceniza volante; hormigón; propiedades mecánicas; durabilidad.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por materiais para uso na construção civil fez com que a indústria direcionasse seus esforços para a reciclagem e reutilização de materiais pétreos e outros resíduos derivados da própria indústria. Nesse sentido, o foco principal desta pesquisa foi a substituição de agregado natural por agregado reciclado e de cimento Portland por subprodutos industriais em diferentes concretos, a fim de demonstrar sua viabilidade de ser utilizado na fabricação de concretos estruturais. Isso permitiria minimizar os impactos das pedreiras e dos lixões. Para isso, inúmeros autores têm investigado a influência de materiais pozolânicos nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto, demonstrando que esses materiais podem oferecer melhorias significativas em suas propriedades (Hooton, 2015, Paris et al., 2016, Yin et al., 2018). Um dos materiais suplementares que tem gerado mais pesquisas em sua caracterização como material pozolânico são as cinzas volantes. Em geral, o uso de cinzas volantes é considerado viável devido às suas altas propriedades pozolânicas, sendo suas vantagens perceptíveis sobre as propriedades mecânicas e durabilidade a longo prazo do concreto (Bijen, 1996, Herath et al., 2020). Outro material suplementar que tem gerado grande interesse é o resíduo do catalisador de craqueamento de petróleo (FCC). Diferentes trabalhos têm mostrado que esse resíduo pode levar a melhorias na resistência à compressão de 20-30% no curto prazo, e sua influência significativamente positiva sobre a durabilidade do concreto, o que o coloca como um substituto efetivo para o cimento, em um nível equivalente a outras pozolanas mais usadas, como metacaulim e a sílica ativa (García de Lomas et al., 2016, Garcés et al., 2011, Borrachero et al., 2021).

Por outro lado, inúmeros trabalhos de pesquisa têm sido realizados com o objetivo de caracterizar o efeito do uso de agregados de concreto reciclado sobre as características resistentes e de durabilidade do concreto (Chaofeng et al., 2021, Hoai-Bao et al. 2020).

Nos últimos anos, várias investigações foram realizadas nas quais foram utilizados materiais suplementares e a substituição parcial ou total de agregados por agregados reciclados tem sido utilizada (Corinaldesi e Moriconi, 2009, Sim e Park, 2011, Kou, 2011). Assim, Corinaldesi e Moriconi analisaram concretos feitos inteiramente de agregados reciclados, grossos e finos e substituições de cimento Portland por cinzas volantes e sílica ativa, e descobriram que propriedades ideais podem ser obtidas desses concretos se percentuais de substituição forem estudados e planejados corretamente.

No entanto, estudos que combinam cinzas volantes e resíduos de FCC como materiais pozolânicos em substituição ao cimento Portland dificilmente podem ser encontrados na matriz cimentícia de concretos reciclados (Payá et al., 2016, Zornoza et al., 2008).

Esta pesquisa tem como objetivo avaliar as propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos de baixo impacto ambiental que combinam substituições de 20% e 100% de agregados naturais por agregado reciclado e 50% de cimento Portland por materiais pozolânicos (35% de cinzas volantes e 15% de catalisador de craqueamento catalítico).

2. MATERIAIS E PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

Dois tipos de matrizes cimentícias têm sido utilizadas para o preparo dos corpos-de-prova: uma composta inteiramente por cimento Portland (CP); e uma matriz alternativa (MA) composta por 50% de CP, 35% de cinzas volantes (CV) e 15% de catalisador de craqueamento catalítico (FCC). O cimento usado foi Portland tipo CEM I 52,5 R designado de acordo com a Norma Europeia UNE-EN 197-1: 2000. As CV usadas como substituição do cimento no concreto vêm da Holcim Espanha e foram usados conforme fornecidos, sem aplicar qualquer tratamento antes do uso. O FCC foi fornecido pela BP Oil Espanha (Castellón). A composição química do cimento e das

pozolanas utilizadas, obtidas por fluorescência de raios-X, são apresentadas na Tabela 1. Dois tipos de agregado graúdo foram utilizados na fabricação de concreto: agregado de natureza calcária (AN), de britagem, e agregado reciclado (AR), de demolição e britagem de resíduos de concreto em massa, ambos fornecidos pela Holcim Morteros S.A. O fornecedor certifica os seguintes percentuais de impurezas presentes nos agregados reciclados: Argilas < 5%, partículas leves < 1%, asfalto < 1%, outras impurezas < 1%; cumprindo assim os limites estabelecidos na Instrução Espanhola para Concreto Estrutural (EHE-08) sobre as propriedades dos agregados reciclados para o concreto. A areia utilizada na confecção dos tubos de ensaio é areia calcária de trituração da pedreira Fontcalent (Alicante), fornecida pela empresa Holcim Morteros S.A. As propriedades dos agregados e da areia utilizados nas misturas e suas curvas granulométricas são apresentadas na Tabela 2 e na Figura 1, respectivamente. Como aditivo, foi utilizado um superplasticificante Sikament 200R, isento de cloretos e que permite a obtenção de concretos muito fluidos, mesmo em climas quentes.

Tabela 1. Composição química do cimento e pozolanas

| % | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | Fe ₂ O ₃ | SO ₃ | Na ₂ O | K ₂ O | P.F.* | S.D.* | Densidade (g/cm ³) |
|-----|-------|------------------|--------------------------------|------|--------------------------------|-----------------|-------------------|------------------|-------|-------|--------------------------------|
| CP | 62,87 | 20,21 | 4,94 | 1,05 | 2,85 | 3,37 | 0,10 | 0,95 | 2,34 | 1,32 | 3,1 |
| FCC | 0,11 | 46,04 | 47,47 | 0,17 | 0,58 | 0,02 | 0,30 | 0,02 | 1,50 | 3,79 | 2,7 |
| CV | 9,83 | 40,94 | 24,65 | 1,59 | 13,59 | 1,60 | 0,34 | 1,40 | 2,44 | 3,62 | 2,8 |

*P.F.: Perda ao fogo. S.D.: Sem determinar.

Tabela 2. Propriedades gerais dos agregados.

| Propriedade | Norma | AN | AR | Areia |
|-----------------------|---------------|------|------|-------|
| Módulo granulométrico | UNE-EN 933-1 | 8,3 | 8,0 | 3,1 |
| Densidade aparente | UNE-EN 1097-6 | 2700 | 2490 | 2690 |
| Absorção de água | UNE-EN 1097-6 | 0,6 | 4,5 | 0,6 |
| Abrasão Los Ángeles | UNE-EN 1097-2 | 21,1 | 30,3 | - |

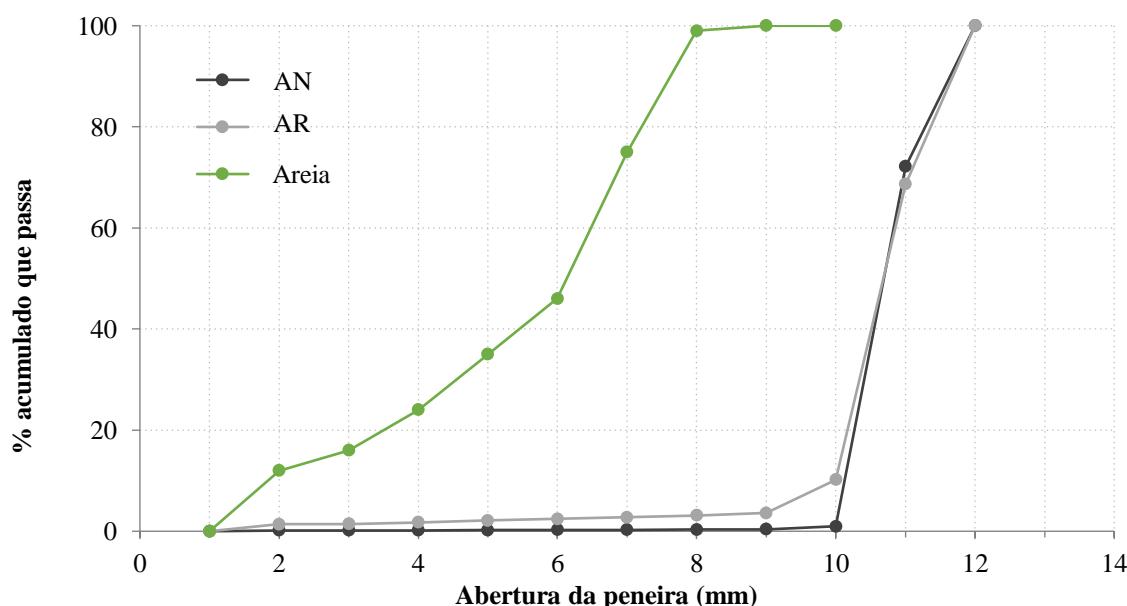


Figura 1. Granulometria dos agregados utilizados.

2.2 Procedimento experimental

Seis diferentes composições foram elaboradas (Tabela 3) a fim de avaliar a influência que agregados reciclados e materiais cimentícios complementares (CV e FCC) têm nas propriedades de durabilidade do concreto:

- 0% AR-CP, como concreto de referência, composto inteiramente de agregado natural e CEM I 52,5 R
- 0% AR-MA, composto de agregado natural e a matriz cimentícia alternativa
- 20% AR- CP, com substituições de 20% do agregado natural por agregado reciclado e CEM I 52,5 R
- 20% AR-MA, com substituições de 20% do agregado natural por agregado reciclado e a matriz cimentícia alternativa
- 100% AR- CP, composto inteiramente de agregado reciclado e CEM I 52,5 R
- 100% AR-MA, também chamado de concreto verde, feito com agregado reciclado e a matriz cimentícia alternativa

Para poder comparar os diferentes concretos entre si, as substituições de agregado natural por agregado reciclado foram feitas em volume. A relação água / cimento efetiva de 0,50 permanece constante. Isso é obtido pela adição da água de absorção do agregado à água total de mistura por 10 minutos, o tempo que dura o processo de mistura. O valor de abatimento, obtido pelo método do cone de Abrams (UNE-EN 12350-2: 2009), permanece constante em todos os casos com a utilização de aditivo, o que permite partir da mesma trabalhabilidade em todos os concretos.

Um total de 60 corpos de prova cilíndricos de Ø150x300 mm foram moldados para realização dos ensaios de resistência à compressão e permeabilidade ao ar aos 28 e 365 dias; e 6 corpos de prova cilíndricos de Ø100x250 mm para os ensaios de resistência à penetração de cloretos aos 28 dias. As amostras foram confeccionadas de acordo com o procedimento descrito na norma ASTM C192 / C192M-07. A água de mistura é adicionada em duas etapas; adiciona-se 1/3 com os agregados graúdos e o restante após a introdução da areia e do cimento, reservando um pouco para adicionar o aditivo no final. O tempo de mistura é de 10 minutos. Depois de moldados, os corpos de-prova foram curados em câmara úmida (95% UR, 23 °C) até o momento do ensaio.

Tabela 3. Traços utilizados neste trabalho.

| | 0% AR-CP | 0% AR-MP | 20% AR-CP | 20% AR-MA | 100% AR-CP | 100% AR-MA |
|---|----------|----------|-----------|-----------|------------|------------|
| CP (kg/m³) | 380 | 190 | 380 | 190 | 380 | 190 |
| CV (kg/m³) | 0 | 133 | 0 | 133 | 0 | 133 |
| FCC (kg/m³) | 0 | 57 | 0 | 57 | 0 | 57 |
| a_{total} (kg/m³) | 195 | 195 | 200 | 200 | 216 | 216 |
| a_{ef} (kg/m³) | 187 | 187 | 187 | 187 | 187 | 187 |
| Areia (kg/m³) | 934 | 934 | 934 | 934 | 934 | 934 |
| AN (kg/m³) | 981 | 981 | 785 | 785 | 0 | 0 |
| AR (kg/m³) | 0 | 0 | 173 | 173 | 865 | 865 |
| Aditivo* (%) | 1,6 | 1,8 | 1,6 | 1,8 | 1,6 | 1,6 |
| Consistência (mm) | 100 | 100 | 90 | 90 | 95 | 100 |

* A quantidade de aditivo é considerada como uma porcentagem da quantidade de material cimentício. a_{total} é a quantidade total de água usada na mistura. a_{ef}: é a diferença entre a água total presente no concreto fresco e a água absorvida pelos agregados. Intervém na reação de hidratação

do cimento e na trabalhabilidade do concreto.

2.2.1 Resistência a compressão

Para cada dosagem, quatro corpos de prova cilíndricos de Ø150x300mm foram utilizados para ensaios de resistência à compressão aos 28 e 365 dias, seguindo o procedimento descrito pela norma UNE-EN 12390-3: 2009.

2.2.2 Porosidade

A porosidade acessível à água do concreto endurecido é obtida em (1), seguindo a norma ASTM C642-13.

$$\% \text{ Porosidade} = \frac{P_{sat} - P_{seco}}{P_{sat} - P_{sum}} \times 100(1)$$

O peso saturado é obtido saturando a vácuo um pedaço de cada um dos corpos de prova sob compressão, seguindo a norma ASTM C3652-05 por ser o método mais adequado de acordo com o estudo comparativo realizado por Safiuddin e Hearn (Safiuddin e Hearn, 2005) sobre as diferentes técnicas de saturação do concreto. Uma bomba é conectada ao dessecador e um vácuo é realizado por 3 h. Após esse tempo, a torneira da água destilada é aberta e o vácuo continua por mais uma hora. A bomba é parada e o vácuo é mantido por 20 ± 2 horas. As amostras são retiradas e pesadas em balança hidrostática e superficialmente secas. Então, elas foram secas a 110°C por 24 h, deixando-as esfriar e o peso seco é obtido.

2.2.3 Permeabilidade ao ar

Os ensaios de permeabilidade ao ar são realizados aos 28 e 365 dias em seções centrais de corpos de prova cilíndricos de Ø150mm que foram cortados com altura de 50mm. Como método de condicionamento proposto por Antón et al. (Antón et al., 2013), que permite atingir uma umidade interior específica no interior do corpo de prova, garantindo assim que os seis concretos estudados estejam com o mesmo grau de saturação (65% neste caso) para poderem ser comparados entre si. O procedimento consiste, em primeiro lugar, na obtenção da capacidade de absorção do concreto a ser ensaiado de acordo com a norma ASTM C642-13. Conhecendo a absorção, é possível determinar a massa do corpo de prova correspondente a um determinado grau de saturação. Os corpos de prova são então saturados com água destilada sob vácuo, de acordo com a norma ASTM C3652-05. O próximo passo é proteger as superfícies laterais dos tubos de ensaio com fita isolante para evitar a formação de gradientes de umidade nos mesmos e são secos a 50°C até que o grau de saturação desejado seja alcançado. A secagem a 50°C minimiza as modificações microestruturais pela exposição a temperaturas elevadas. Quando os corpos de prova atingem o grau de saturação (GS) desejado, são selados com filme de polietileno impermeável ao vapor de água, o que garante a estanqueidade, e são reintroduzidos na estufa a 50°C por 7 dias no caso dos concretos estudados. Isso é feito para redistribuir a umidade no interior do concreto, conforme trabalho desenvolvido por Parrott (Parrot, 1994).

O coeficiente de permeabilidade ao ar (kT) nos concretos com GS de 65% é obtido com o equipamento Torrent Permeability Test de Proceq. Esse equipamento é composto por uma célula com dupla câmara de vácuo e um regulador de pressão que garante que o ar flua no ângulo correto da superfície para sua câmara interna (ver Figura 2). Isso permite o cálculo do kT por meio de um ensaio rápido e não destrutivo que pode ser realizado tanto em laboratório quanto in loco. As medições são feitas em 3 amostras em ambos os lados para cada dosagem estudada.

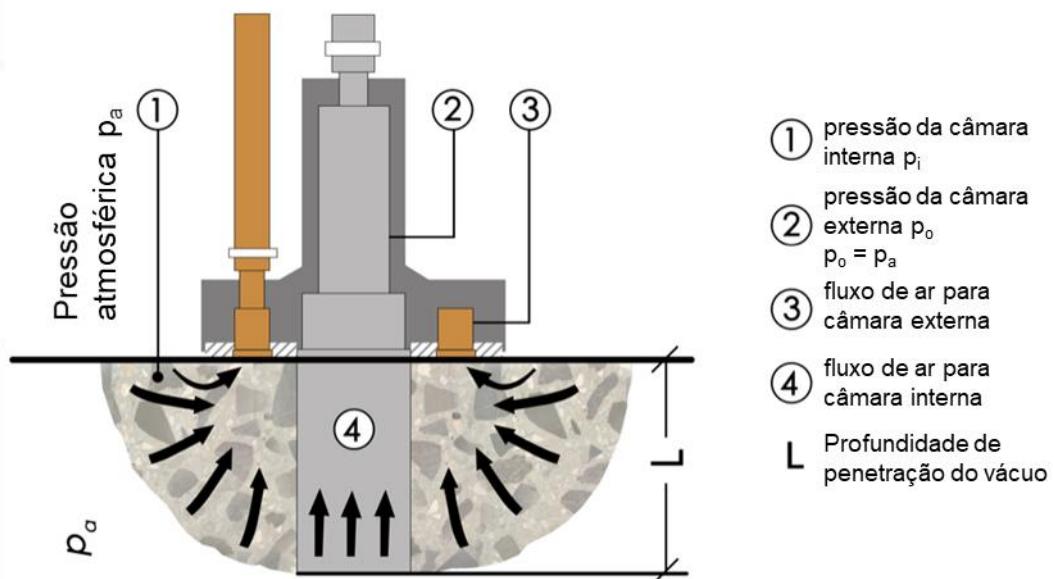


Figura 2. Ensaio de permeabilidade com o equipamento Torrent Permeability Test e o diagrama operacional do equipamento.

2.2.4 Resistência à penetração de cloreto

Um método acelerado baseado na migração de cloreto por campo elétrico é usado seguindo o Nordic Standard NT Build 492 que permite uma avaliação aproximada comparativa da resistência à penetração de cloreto. O ensaio é realizado em corpos de prova de Ø100x50mm saturados em solução saturada de Ca(OH)₂, seguindo o procedimento descrito na norma. Neste procedimento, um potencial elétrico externo é aplicado axialmente através da amostra que força os íons cloreto a migrar para a amostra, conforme mostrado na Figura 3. Após um certo tempo de ensaio, o corpo de prova graduado e uma solução de nitrato de prata são pulverizados em umas das seções recém-divididas. A profundidade de penetração do cloreto pode ser medida a partir da formação do precipitado de nitrato de prata da cor branca e com esta profundidade de penetração o coeficiente de migração do cloreto em estado não estacionário (D_{nssm}) é calculado, através da seguinte fórmula simplificada (2)

$$D_{nssm} = \frac{0.0239 (273 + T)L}{(U - 2)t} \left(x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}} \right) \quad (2)$$

onde U é o valor absoluto da tensão aplicada, em volts; T é o valor médio da temperatura da solução anódica em °C, medida no início e no final do ensaio; L é a espessura da amostra em mm; x_d é o valor médio da frente de penetração em mm; t é a duração do ensaio em horas.

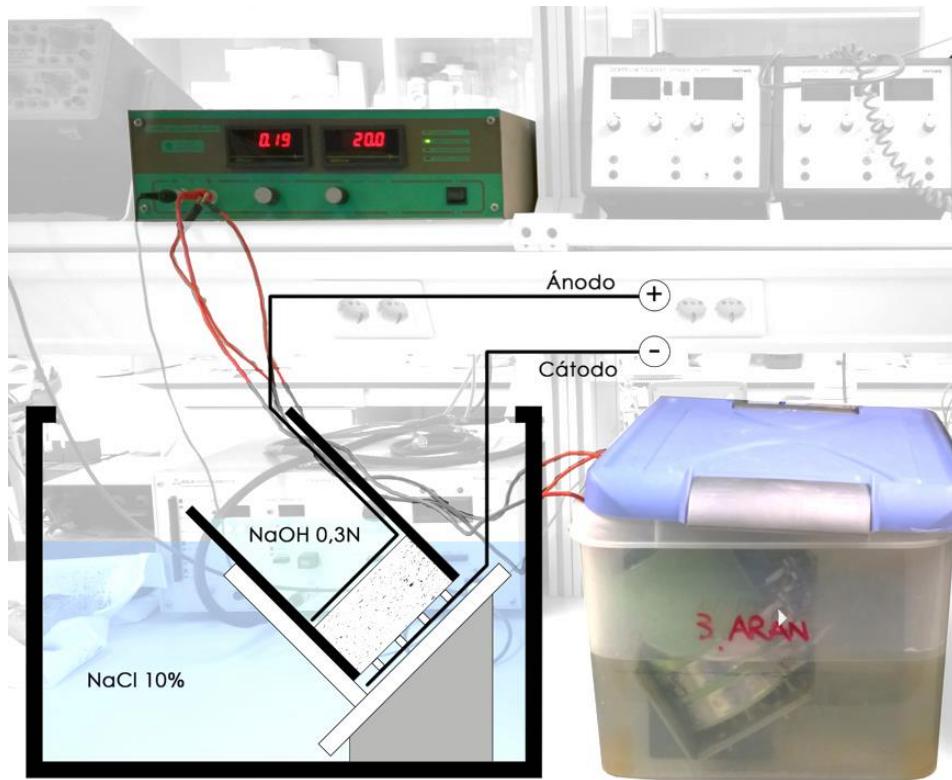


Figura 3. Migração de cloreto no concreto. Esquema de ensaio de acordo com o padrão NT Build 492.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com relação à caracterização mecânica dos concretos, o valor médio de quatro corpos de prova foi utilizado para a análise da resistência à compressão. A Figura 4 mostra os valores obtidos para resistência à compressão, onde a porcentagem expressa, seguida de AR, refere-se à quantidade de agregado reciclado presente na mistura; CP, refere-se à matriz cimentícia composta por CEM I 52,5 R; e MA à matriz cimentícia alternativa (35% de cinzas volantes, 15% de catalisador de craqueamento catalítico e 50% de CP). De forma geral, observa-se que todos os concretos ultrapassam os limites estabelecidos pela EHE-08 para serem utilizados como concreto estrutural (25 MPa) e como concreto em zonas atmosféricas expostas a meio marinho (30 MPa), embora seja notável que os valores de resistência à compressão são menores em todos os concretos em relação ao padrão (0% AR-CP), tanto aos 28 quanto aos 365 dias. Os resultados mostram que à medida que aumenta a percentagem de substituição do agregado natural por agregado reciclado, ocorre uma diminuição da resistência, coincidindo com os resultados obtidos por outros autores (Hansen, 1992, Poon, 2004, Etxebarria et al., 2007, Corinaldesi, 2010). Isso acontece tanto no concreto com o CP quanto nos feitos com o MA. O uso de agregados reciclados afeta esta propriedade devido à sua maior porosidade e ao fraco comportamento da microestrutura devido à existência de diferentes zonas de interface, pois além da junção pasta-agregado que o agregado reciclado apresenta, surge outra zona de contato a pasta de agregado reciclado e a nova pasta.

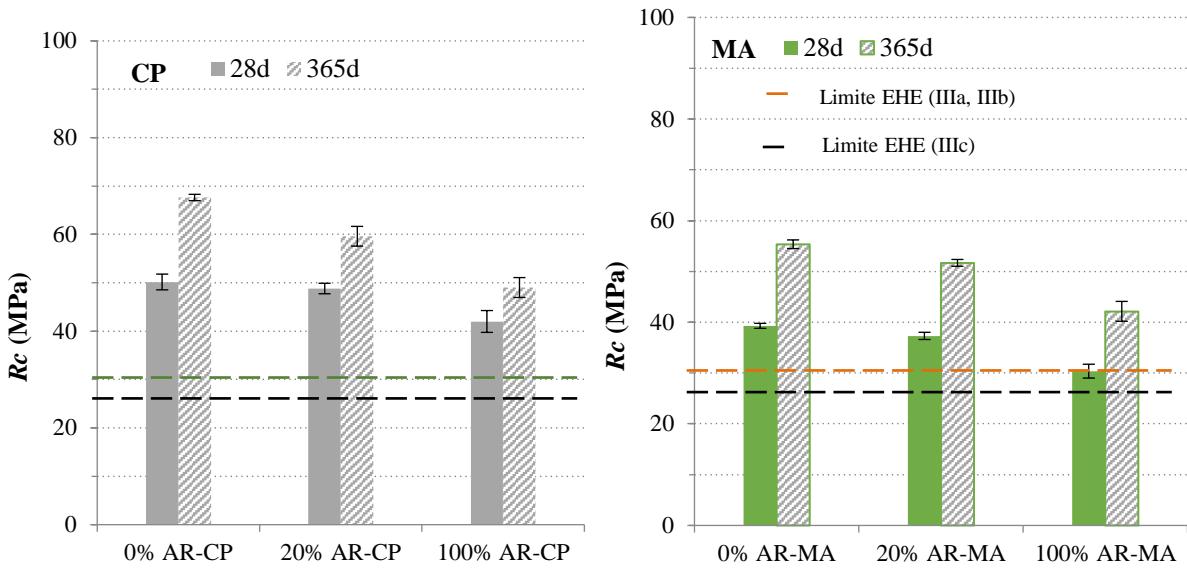


Figura 4. Valores de resistência à compressão aos 28 e 365 dias para os diferentes concretos estudados.

Nas diferentes percentagens de substituição de AN por AR (0%, 20% e 100%) fica claro que a resistência dos concretos com CP é maior do que aqueles feitos com MA (Safiuddin e Hearn, 2005), desde a contribuição destes materiais pozolânicos para a resistência à compressão é mais relevante a longo prazo. Observa-se também que aos 365 dias a resistência à compressão aumenta em todos os casos, sendo este aumento mais significativo naqueles concretos com 0% e 20% de substituição do NA por AR feito com a matriz cimentícia alternativa (0% AR-MA e 20% AR-MA), com um aumento de 25% em relação à resistência de 28 dias em ambos os casos.

Em relação à porosidade (Figura 5), ela aumenta à medida que aumenta a substituição de AN por AR (Chaofeng et al., 2021, Kou et al., 2011). Esse aumento se deve em grande parte à maior porosidade do agregado reciclado (Etxebarria et al., 2006). É claramente observável nos resultados aos 28 dias que os concretos mais porosos são aqueles com substituição total do agregado natural por reciclagem (100% AR-CP e 100% AR-MA) e que a porosidade permanece praticamente constante em ambos os casos, sem importar a matriz cimentícia.

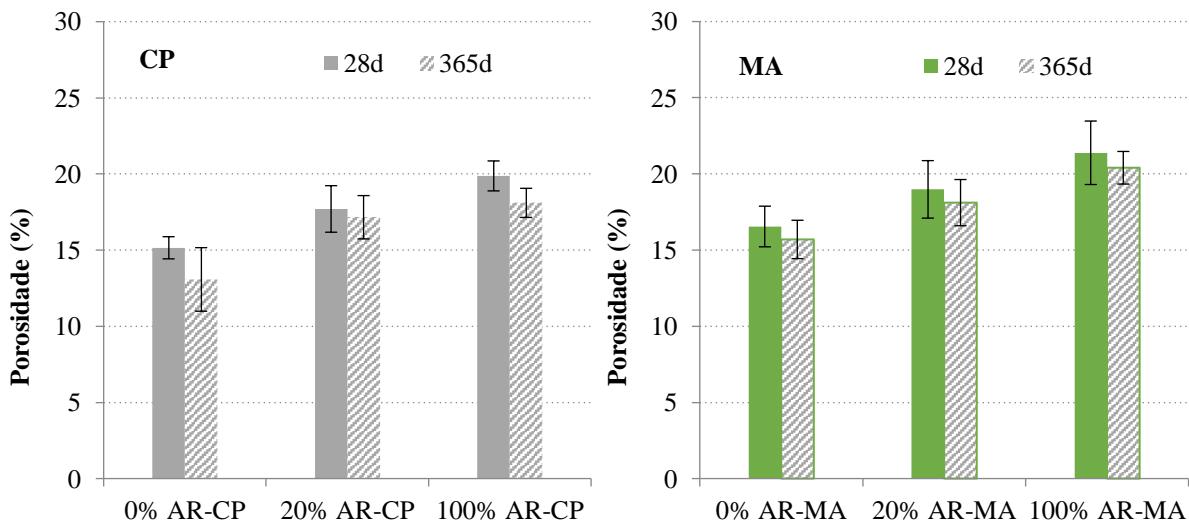


Figura 5. Valores de porosidade aos 28 e 365 dias nos concretos estudados.

No caso dos concretos com substituições de 20% e 0% do NA por RA, este é inferior aos anteriores e observa-se uma relação aparente entre porosidade e matriz cimentícia, pois, embora diminua, os maiores valores são observados para concretos com matriz alternativa (20% AR-MA e 0% AR-MA). Aos 365 dias, a porosidade diminui nos concretos com apenas um tipo de agregado, natural ou reciclado (substituições de 0% e 100%) e nenhum aumento significativo é observado naqueles com combinação de agregados (20% AR-CP e 20 % AR-MA). Isso se deve ao maior desenvolvimento completo das reações de hidratação, com a consequente diminuição da porosidade capilar. Nessa idade, também se observa que a porosidade aumenta à medida que aumenta a quantidade de agregado reciclado na mistura e que, para o mesmo percentual de substituição, o valor é maior nos concretos feitos com a matriz alternativa, mesmo naqueles com 100% substituições.

A Figura 6 mostra os valores do coeficiente de migração de cloretos obtidos no concreto curado por 28 dias e medido de acordo com o NT Build-492.

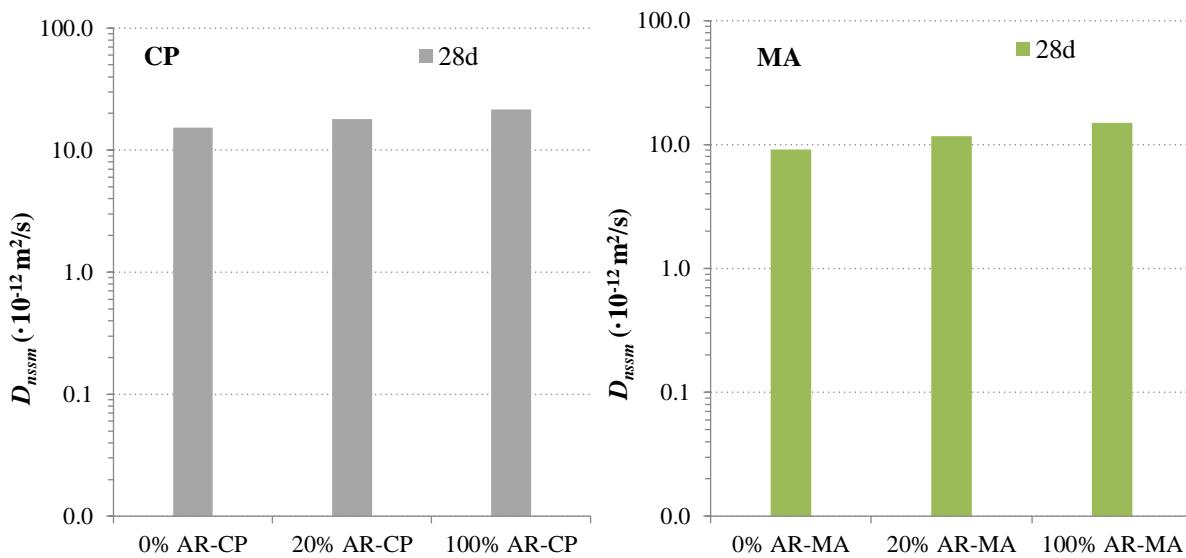


Figura 6. Coeficiente de migração de cloretos em 28 dias.

O gráfico mostra que ocorre um aumento no coeficiente de migração à medida que aumenta a quantidade de RA nas misturas, independente do tipo de matriz cimentícia utilizada, devido à maior porosidade do RA, coincidindo com o que foi encontrado por Kou e Poon (Kou e Poon, 2010) e Kou et al. (Kou et al., 2011). O coeficiente de migração é menor em todos os concretos com MA, podendo-se afirmar que a presença de CV e FCC na matriz cimentícia leva a melhorias importantes na estrutura porosa, tanto para o concreto com AR quanto com AN. Nos casos em que não há substituições de agregado reciclado (0%), o coeficiente de migração aumenta quando a matriz é composta apenas por CP, o que significa que a matriz alternativa combinada com agregado natural (0% AR-MA), se comporta de maneira uniforme melhor do que o padrão (0% AR-CP).

O coeficiente de permeabilidade ao ar do concreto (kT) foi obtido pelo método Torrent (Torrent, 1999), permitindo que a qualidade do revestimento seja classificada em boa ($0,01 < kT < 0,1$), normal ($0,1 < kT < 1$) e ruim ($kT > 1$).

Os resultados obtidos são apresentados na Figura 7. Estes representam o valor médio de três amostras para cada tipo de concreto.

Em termos gerais, os resultados obtidos indicam que a permeabilidade ao ar tende a aumentar com o grau de substituição dos agregados em ambas as matrizes cimentícias. Além disso, pode-se observar que a matriz alternativa apresenta maior resistência ao oxigênio do que a matriz cimentícia, ambos curto e longo prazo. Esse comportamento se deve ao fato de uma parte dos CVs

que não reagem atuarem como preenchedores na matriz alternativa. Porém, todos os concretos apresentam coeficientes de permeabilidade ao ar menores que 1, portanto, enquadram-se na classificação “normal”, tanto aos 28 quanto aos 365 dias.

Em relação aos resultados obtidos aos 28 dias, em concreto com matriz de CP, a substituição de 20% e 100% do agregado produz aumentos na permeabilidade de 27% e 25% em relação ao padrão; enquanto no concreto com matriz MA os acréscimos são de 15% e 13% em relação ao seu padrão. Aos 365 dias, a tendência para todos os concretos é a mesma, ou seja, o coeficiente de permeabilidade tende a aumentar com a quantidade de agregado reciclado na mistura.

Em relação à evolução desta propriedade, observa-se que os valores de permeabilidade de todos os concretos diminuem com o tempo de cura, devido ao desenvolvimento completo da microestrutura.

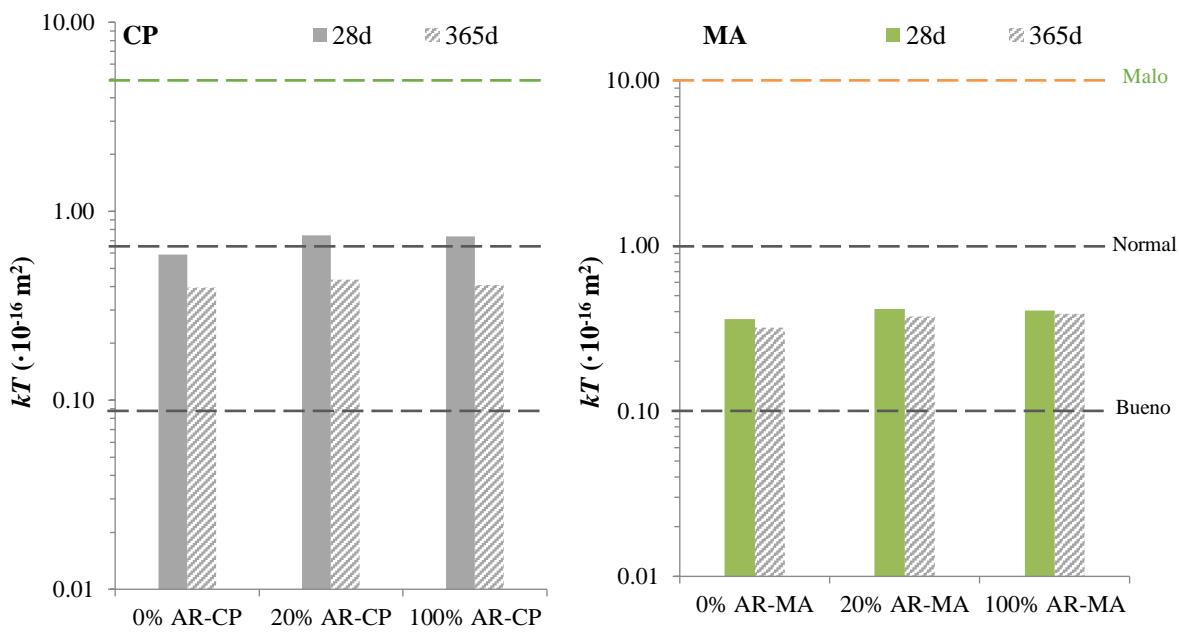


Figura 7 - Coeficientes de permeabilidade ao ar em 28 e 365 dias.

Os resultados desta investigação indicam que todas as alterações aplicadas aos concretos no que diz respeito ao padrão (substituições de AN por AR e de CP por MA) reduzem o seu comportamento mecânico. Isso se deve, no caso de substituições de agregados, à alta porosidade do agregado reciclado e aos percentuais de substituição; enquanto no caso da matriz cimentante, isso é atribuído ao alto grau de substituição do CP por CV e FCC, o que pode limitar o desenvolvimento da reação pozolânica. Em relação à porosidade, duas tendências são observadas: a porosidade depende da matriz cimentícia quando as substituições de AR são baixas; e quando essas substituições são altas, prevalece a influência da porosidade do agregado sobre a porosidade total do concreto.

Em termos de durabilidade, os resultados obtidos pelos ensaios de permeabilidade ao ar e migração de cloretos mostram que os concretos com matriz alternativa são os que apresentam maior resistência ao ataque de agentes agressivos externos; comportando-se ainda melhor do que o concreto padrão. A sua eficácia contra o ataque de agentes externos está associada à redução da porosidade produzida pelas adições pozolânicas utilizadas (CV e FCC). No entanto, esses resultados não podem ser conclusivos em uma idade precoce, por isso precisam ser complementados com dados de longo prazo que permitam o desenvolvimento completo da microestrutura.

Além dos valores de porosidade estudados, é detectada a presença de outros fatores que influenciam na permeabilidade e resistência à passagem de cloretos dos concretos, como a influência do

tamanho e conectividade dos poros, cujo estudo será realizado através de ensaios de porosimetria de intrusão de mercúrio (PIM). Além disso, o estudo da influência da interface matriz-árido na migração de cloretos por meio da técnica de difração de raios X (DRX) será estudado em profundidade a fim de determinar a existência do sal de Friedel.

Pode-se afirmar que, embora existam variações nas propriedades dos concretos estudados que dependem do tipo de substituição (agregado ou matriz), todos são adequados para serem utilizados como concreto estrutural, uma vez que ultrapassam os limites estabelecidos pelo EHE.

4. CONCLUSÕES

Uma vez avaliada a influência da substituição parcial do cimento por adições (CV e FCC) e dos agregados naturais com agregados reciclados nas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade do concreto, podem-se estabelecer as seguintes conclusões:

- 1.- Todas as mudanças aplicadas aos concretos no que diz respeito ao padrão (substituições de AN por AR e de CP por MA) reduzem seu comportamento mecânico.
- 2.- A porosidade depende da matriz cimentícia quando as substituições de AR são baixas; e quando essas substituições são altas, prevalece a influência da porosidade do agregado sobre a porosidade total do concreto.
- 3.- Concretos com matriz alternativa são os que apresentam maior resistência ao ataque de agentes agressivos externos; comportando-se ainda melhor do que o concreto padrão.
- 4.- Pode-se afirmar que, embora existam variações nas propriedades dos concretos estudados que dependem do tipo de substituição (agregado ou matriz), todos são adequados para serem utilizados como concreto estrutural desde que excedam os limites estabelecidos pelo EHE.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antón, C., Climent, M. A., de Vera, G., Sánchez, I., Andrade, C. (2013), *An improved procedure for obtaining and maintaining well characterized partial water saturation states on concrete samples to be used for mass transport tests*. Materials and Structures, 46, 1389–1400. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9981-4>
- Borrachero, M. V., Payá, J., Monzó, J., Soriano, L., Tashima, M. M. (2021), *Inorganic binders from petrochemical industry waste: The case of fluid catalytic cracking catalyst residue*. Waste and Byproducts in Cement-Based Materials (Innovative Sustainable Materials for a Circular Economy), Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Pages 283-334. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820549-5.00003-6>
- Chaofeng, L., Zhedong, C., Huixia, W., Jianzhuang, X., Yuming, Z., Zhiming, M. (2021), “*Chloride transport and induced steel corrosion in recycled aggregateconcrete: A review*”. Construction and Building Materials, vol 282, 122547. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122547>
- Corinaldesi, V. (2010), “*Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates*”. Construction and Building Materials, 24 (9), pp. 1616-1620. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.031>
- Corinaldesi, V., Moriconi, G. (2009), “*Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete*”. Construction and Building Materials, 23 (8), pp. 2869-2876. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.004>
- Garcés, P., Glasser, F.P., Brew, D.R.M., Zornoza, E., Payá, J. (2011), “*Pozzolanic activity of a spent fluid catalytic cracking catalyst residue*”. Advances in Cement Research, vol. 23, pp. 1-7. <https://doi.org/10.1680/adcr.9.00036>
- García de Lomas, M., Sánchez de Rojas, M.I., Frías, M., Mújika, R. (2006), “*Comportamiento Desempenho do concreto com adições pozolânicas e agregado reciclado*” Gurdián, H., Garcés, P., Zornoza, E., García Alcoce, E.

- científico-técnico de los cementos portland elaborados con catalizadores FCC. Aplicación de la norma vigente". Monografía Materiales, No. 412, editado por el CSIC, Madrid, pags. 46.
- Bijen, J. "Benefits of slag and fly ash". Construction and Building Materials, 1996, 10 (5), pp. 309-314. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00014-3](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00014-3)
- Etxeberria, Vázquez, M. E., Marí, A. 2006, "Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete". Magazine of Concrete Research, 58 (10), pp. 683-690. <https://doi.org/10.1680/macr.2006.58.10.683>
- Etxeberria, M., Marí, A. R., Vázquez, E. (2007), "Recycled aggregate concrete as structural material". Materials and Structures, vol. 40, pp. 529-541. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9161-5>
- Hansen, T. C. (1986), *Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985*. Materials and Structures 19, 201–246. <https://doi.org/10.1007/BF02472036>
- Herath, C., Gunasekara, C., Law, D. W., Setunge, S. (2020), "Performance of high-volume fly ash concrete incorporating additives: A systematic literature review". Construction and Building Materials, vol. 258, 365606. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.365606>
- Hoai-Bao, L., Quoc-Bao, B. (2020), "Recycled aggregate concretes - A state-of-the-art from the microstructure to the structural performance". Construction and Building Materials, Vol. 257, 119522. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119522>
- Hooton, R. D. (2015), "Current developments and future needs in standards for cementitious materials". Cement and Concrete Research, vol. 78, pp. 165–177. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.022>
- Kou, S.; Poon, C. (2010), "Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates". Cement and Concrete Composites, 32 (8), pp. 649-654. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.05.003>
- Kou, S., Poon, C., Agrela, F. (2011), "Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures". Cement and Concrete Composites, 33 (8), pp. 788-795. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.05.009>
- Kou, S., Poon, C., Etxeberria, M. (2011), "Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete". Cement and Concrete Composites, 33 (2), pp. 286-291. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.10.003>
- Paris, J. M., Roessler, J. G., Ferraro, C. C., DeFord, H. D., Townsend, T. G. (2016), "A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete". Journal of Cleaner Production, vol. 121, pp.1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.013>
- Poon, C. S. Shui, Z. H., Lam, L., Fok, H., Kou, S. C. (2004), "Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete". Cement and Concrete Research, 34 (1), pp. 31-36. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00186-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00186-8)
- Safiuddin, M.; Hearn, N. (2005), "Comparison of ASTM saturation techniques for measuring the permeable porosity of concrete". Cement and Concrete Research, 35 (5), pp. 1008-1013. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.017>
- Sim, J., Park, C. 2011, "Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate". Waste Management, 31 (11), pp. 2352-2360. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.06.014>
- Soriano, L., Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M.V., Tashima, M.M. (2016), "High strength mortars using ordinary Portland cement–fly ash–fluid catalytic cracking catalyst residue ternary system (OPC/FA/FCC)". Construction and Building Materials, Volume 106, pp. 228-235. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.111>
- Torrent, R. J. (1999). *Un método rápido y no-destructivo para medir la permeabilidad al aire del*

- hormigón. Materiales de Construcción, 49 (254), 51–56.
<https://doi.org/10.3989/mc.1999.v49.i254.450>
- Yin, K., Ahamed, A., Lisak, G. (2018), “*Environmental perspectives of recycling various combustion ashes in cement production – A review*”. Waste Management, vol.78 pp. 401–416.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.012>
- Zornoza, E., Payá, J. Garcés, P. (2008), “*Carbonation rate and reinforcing steel corrosion rate of OPC/FC3R/FA mortars under accelerated conditions*”. Advances in Cement Research, 20 (1), pp. 15-22. <https://doi.org/10.1680/adcr.2007.00008>