

Comportamento mecânico de betões sustentáveis produzidos com água salgada e agregados reciclados

Lena Kravchanka; Pedro Matias
CCPI, CINAMIL, Academia Militar
Academia Militar
Lisboa, Portugal
lena.kravchanka@exercito.pt;
matias.pjsg@exercito.pt

Jorge de Brito; Miguel Bravo
CERIS, IST-UL
Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
Lisboa, Portugal
jorge.brito@tecnico.ulisboa.pt;
miguelnbravo@tecnico.ulisboa.pt

Resumo — Este artigo visa expor a análise da viabilidade da utilização de água do mar em betões, tanto na composição como na cura, em detrimento de água potável. Pretende-se também avaliar o comportamento mecânico de betões produzidos com diferentes percentagens de substituição de agregados naturais (AN) grossos por agregados reciclados (AR) grossos (0%, 50% e 100%).

Na maioria dos ensaios, a utilização simultânea de AR e água do mar, tanto na composição como na cura, provoca perdas significativas no desempenho. Porém, ao incorporar AR e água do mar no betão, observou-se uma tendência de melhoria na resistência à abrasão, quando comparado com o betão de referência.

Palavras-chave — Betão; Sustentabilidade; Água do mar; Agregados reciclados.

I. INTRODUÇÃO

De acordo com o Conselho Nacional da Água, a Terra é constituída por 70% de água, sendo que apenas 7% dessa água é potável. A água potável é um dos recursos mais preciosos da Terra e, tendo em vista o seu elevado consumo, é um grande desafio aprender a poupá-la devido à sua escassez em muitas partes do mundo. Assim sendo, é fundamental encontrar fontes alternativas, de modo a economizar este recurso. A substituição da água potável por água do mar na composição do betão poderá ser uma solução benéfica para futuras construções, não só reduzindo os custos de construção, mas também a emissão de CO₂.

A acumulação de resíduos da construção e demolição (RCD) nos aterros também causa grandes preocupações ambientais. Assim, o uso de agregados reciclados (AR) grossos, como alternativa aos agregados naturais (AN) grossos, permite mitigar o consumo de energia e a poluição ambiental.

O betão é o material de construção mais utilizado em todo o mundo, sendo acompanhado de enormes emissões de carbono e impactes negativos no meio ambiente. Neste contexto, para reduzir o consumo de energia e economizar recursos naturais, obtendo um betão mais “verde”, o uso de água do mar e de AR grossos torna-se uma opção promissora, permitindo também um alívio na crise de recursos e no custo da construção, principalmente nas zonas costeiras e insulares.

O presente estudo visa analisar a viabilidade da substituição de água potável por água do mar e de agregados naturais por agregados reciclados em betões.

II. ESTADO DA ARTE SOBRE ÁGUA DO MAR EM BETÕES

O valor do pH da água do mar varia entre 7,4 e 8,4, sendo que a corrosão dos varões de aço ocorre para pH abaixo de 11 [1]. A água do mar contém principalmente iões de cloreto, sódio, magnésio, cálcio e potássio, em que o principal sal é o cloreto de sódio (aproximadamente 88%) [2].

As características da água do mar dependem do local de recolha [3]. Em comparação com a água potável, a água do mar contém teores de sal muito elevados, representados pelos altos teores de iões de cloreto (Cl^-), iões de sulfato (SO_4^{2-}) e catiões de sódio (K^+) [4][5][6].

É proibido o uso de água do mar em estruturas de betão armado, ao contrário do que se verifica em betão não estrutural [7]. A água do mar pode ser incorporada em vários elementos de betão não armado, incluindo blocos de betão, pavimentos ou betões leves, onde o reforço não é necessário. Nos últimos anos, foram desenvolvidos reforços não sujeitos a corrosão, como, por exemplo, fibras de carbono, aço inoxidável e armaduras revestidas com resina epóxida. Uma opção de uso mais acessível dentro dos Polímetros Reforçados com Fibra é a Fibra de Vidro [8]. Esta fornece uma solução atrativa que pode substituir o uso do aço como material de reforço e resolver os problemas de durabilidade em estruturas de betão armado que contenham água do mar.

III. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

De acordo com a Eurostat, a população mundial e a conseqüente necessidade de infraestruturas se encontram em expansão, o que leva a um aumento significativo dos RCD. A elevada quantidade de RCD descartados todos os anos e o baixo nível de reciclagem são duas grandes preocupações económicas e ambientais da atualidade, sendo imperativo evitar a abertura de novos aterros [6].

Os RCD são gerados sempre que um edifício, uma estrada, uma ponte, uma estrutura industrial ou uma instalação fabril são construídos, reparados, reabilitados ou demolidos. Estes são materiais altamente heterogêneos, compostos por uma ampla

gama de materiais, como betão, asfalto, madeira, gesso cartonado, cimento, vidro, plástico, metal, materiais isolantes, carpetes, materiais de cobertura e outros materiais similares produzidos. A composição destes materiais depende fortemente da sua localidade de origem [9][10].

O material à base da argila apresenta elevada rugosidade, enquanto os resíduos de asfalto e betão são mais arredondados [10]. As características do betão com AR são afetadas pela forma das partículas de AR [11]. As formas mais angulosas dos AR reduzem a compacidade dos betões [12].

Os RCD têm sido utilizados em diferentes aplicações, como fundações, pavimentos, estabilizantes do solo e substitutos parciais / totais dos AN grossos na produção de betão [13]. As possíveis utilizações de AR como material são em bases rodoviárias e sub-bases e referem que essas utilizações têm consequências positivas, tanto ambientais (redução da extração dos recursos naturais, menores emissões de CO₂ e menor armazenamento em aterros) como económicas (menores custos de transporte e energia). Assim, o uso de RCD tem um impacto ambiental muito menor do que a utilização de AN [14][15].

Os AR têm maior absorção de água do que os AN. Esta característica tem aumentado a aceitação destes materiais na construção de estradas e em alguns parques de estacionamento onde as águas superficiais permanecem por muito tempo [16].

Quando a água que os AR absorvem não é compensada, a trabalhabilidade dos betões diminui comparativamente aos AN. Isto acontece devido ao facto de os AR absorverem a água livre da amassadura, que tinha como função lubrificar a mistura e conferir plasticidade ao betão [17][18].

A rugosidade e a forma das partículas de AR também diminui a trabalhabilidade [19]. Quanto maior for a percentagem de AR existentes na mistura do betão, maior terá que ser a relação A/C efetiva, de modo a obter a mesma trabalhabilidade [19][20].

A utilização destes materiais não só ajuda a criar um ambiente livre de resíduos, como também traz benefícios económicos. Algumas utilizações propostas para os RCD são: bancos de assento dos parques, paredes internas pré-fabricadas, floreiras, postes elétricos e outros que não necessitam de alta resistência do betão.

Os RCD têm uma textura áspera/granular, devido ao esmagamento do material original, e mais rugosa, causada por vários ciclos de reciclagem [21]. As partículas de betão presentes nos AR de RCD, que correspondem normalmente ao principal constituinte dos RCD, têm maior porosidade do que os AN, por causa da argamassa porosa aderida à superfície e da sua maior angularidade, ficando o ar preso nas superfícies do agregado. Assim, é necessária uma maior quantidade de água (ou energia) para a compactação devido ao atrito entre as partículas [22][23]. As propriedades mais prejudiciais dos AR de RCD, quando comparados aos AN, são a densidade, a absorção de água e o teor das partículas contaminantes, em particular o gesso, que pode levar a possíveis pressões de expansão devido ao ataque interno dos sulfatos [10][24][25].

Os RCD podem conter poluentes orgânicos persistentes. A composição e as propriedades de lixiviação também são relevantes do ponto de vista ambiental. A lixiviação dos

poluentes pode afetar o solo subjacente e potencialmente as águas subterrâneas, com efeitos tóxicos no ecossistema e potenciais consequências para a saúde humana através da exposição indireta, além de potencial deterioração dos recursos da água potável [26].

IV. PROGRAMA EXPERIMENTAL

A. Materiais

Nestes ensaio, foi utilizada água do mar proveniente de Ericeira e AR oriundos da central de reciclagem Vimajas. Foi realizada uma análise composicional dos AR, através de uma análise visual (Fig. 1).

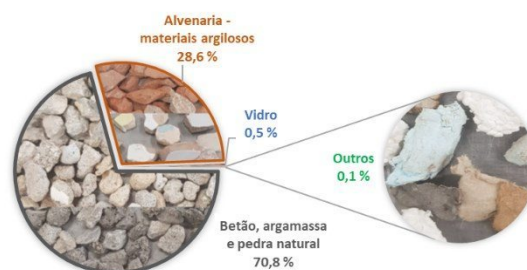


Figura 1. Composição dos RCD oriundos da central de reciclagem Vimajas

Estes agregados foram peneirados de acordo com a seguintes granulometrias: 4-5,6 mm; 5,6-8 mm; 8-11,2 mm; 11,2-16 mm e, por fim, 16-22,4 mm. Os AN utilizados foram areia fina (0-2 mm), areia grossa (2-4 mm), brita 1 (9,5 e 19 mm) e brita 2 (19-22 mm). O ligante utilizado nos betões produzidos foi o CEM I 42,5 R. Para obter a trabalhabilidade desejada em todos os betões produzidos, foi utilizado um superplastificante SikaPlast-717.

B. Composição

A classe de consistência (trabalhabilidade) utilizada na produção de todos os betões foi a S3 (100-150 mm), de modo a permitir uma correta comparação entre eles.

TABELA 1. CONSTITUIÇÃO DOS BETÕES PRODUZIDOS

Tipo de betão	Agregados reciclados grossos (%)	Água do mar na composição	Água do mar na cura	
P-CP-0	0	-	-	Betões sem água do mar
P-CP-50	50	-	-	
P-CP-100	100	-	-	
S-CP-0	0	✓	-	Betões com água do mar na composição
S-CP-50	50	✓	-	
S-CP-100	100	✓	-	
P-CS-0	0	-	✓	Betões com água do mar na cura
P-CS-50	50	-	✓	
P-CS-100	100	-	✓	
S-CS-0	0	✓	✓	Betões com água do mar na composição e na cura
S-CS-50	50	✓	✓	
S-CS-100	100	✓	✓	

Foi necessário ajustar a relação A/C dos betões produzidos, de modo a obter uma trabalhabilidade semelhante. Foram produzidas 12 composições de betão (Tabela 1).

C. Ensaio

Os ensaios realizados aos agregados foram: análise granulométrica - NP EN 933-1 (2000) e NP EN 933-2 (1999); baridade - NP EN 1097-3 (2003); massa volúmica e absorção de água - NP EN 1097-6 (2003) e desgaste de Los Angeles - LNEC E 237 (1970). Os ensaios realizados no estado fresco do betão foram: abaixamento do cone de Abrams - NP EN 12350 - 2 (2002) e massa volúmica no estado fresco NP EN 12350 - 6 (2002). Por fim, os ensaios realizados no estado endurecido do betão foram: resistência à compressão - NP EN 12390-3 (2003); resistência à tração (por compressão diametral) - NP EN 12390-6 (2003); módulo de elasticidade - LNEC E 397 (1993) e resistência à abrasão - DIN 52108 (2010).

V. ANÁLISE DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

A. Ensaio ao betão no estado fresco

A caracterização dos betões no estado fresco foi realizada recorrendo a dois ensaios: abaixamento do cone de Abrams e massa volúmica. Os resultados obtidos podem ser consultados na Tabela 2.

TABELA 2. RESULTADOS DOS ENSAIOS AO BETÃO NO ESTADO FRESCO

Tipo de betão	Abaixamento do cone de Abrams (mm)	Massa volúmica (kg/m ³)	Relação A/C total
P-0	150	2334,9	0,55
P-50	119	2282,1	0,59
P-100	110	2184,7	0,63
S-0	115	2285,5	0,58
S-50	120	2267,6	0,62
S-100	105	2173,2	0,66

B. Ensaio ao betão no estado endurecido

A caracterização mecânica dos betões no estado endurecido realizou-se segundo os seguintes ensaios: resistência à compressão em cubos, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, velocidade de propagação de ultrassons e resistência à abrasão. De modo a facilitar a análise dos resultados obtidos, os mesmos estão reproduzidos na Tabela 3 e 4.

TABELA 3. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS BETÕES NO ESTADO ENDURECIDO

Tipo de betão	Resistência à compressão a 7 dias (MPa)	Resistência à compressão a 28 dias (MPa)	Resistência à compressão a 91 dias (MPa)	Resistência à tração a 28 dias (MPa)
P-CP-0	37,3	44,3	51,0	3,7
P-CP-50	-19%	-9%	-9%	-29%
P-CP-100	-34%	-33%	-19%	-40%
S-CP-0	-4%	-4%	-3%	-22%
S-CP-50	-17%	-10%	-17%	-30%
S-CP-100	-31%	-26%	-24%	-46%
P-CS-0	-1%	-3%	0%	-7%
P-CS-50	-21%	-11%	-11%	-34%
P-CS-100	-37%	-34%	-26%	-52%
S-CS-0	-9%	-6%	-6%	-27%
S-CS-50	-16%	-12%	-14%	-38%
S-CS-100	-40%	-34%	-25%	-41%

TABELA 4. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS BETÕES NO ESTADO ENDURECIDO

Tipo de betão	Módulo de elasticidade a 28 dias (GPa)	Ultrassons a 28 dias (m/s)	Ultrassons a 91 dias (m/s)	Resistência à abrasão - perda de massa (%)
P-CP-0	40,7	4935,8	5014,5	4,6
P-CP-50	-23%	-3%	-3%	9%
P-CP-100	-36%	-10%	-13%	22%
S-CP-0	-4%	-1%	1%	7%
S-CP-50	-24%	-2%	-4%	8%
S-CP-100	-40%	-7%	-14%	17%
P-CS-0	-1%	-1%	-1%	-15%
P-CS-50	-21%	-1%	-3%	9%
P-CS-100	-39%	-8%	-12%	17%
S-CS-0	-5%	-1%	0%	6%
S-CS-50	-24%	-2%	-3%	5%
S-CS-100	-42%	-10%	-14%	11%

VI. CONCLUSÕES

Os resultados experimentais permitiram retirar as seguintes conclusões:

- Ao contrário dos AN, os AR apresentam menor baridade e massa volúmica. Este facto deve-se à natureza porosa de alguns AR, tais como o tijolo, o azulejo, entre outros materiais argilosos presentes nos AR. Em relação à absorção de água por parte dos AR, esta é mais elevada em comparação aos AN, também devido à maior porosidade dos AR. Por último, a resistência à fragmentação dos AR é menor, em comparação à dos AN, devido ao facto de a argamassa aderida a estes ter uma menor resistência ao desgaste;

- Para se obter uma trabalhabilidade constante, foi necessário ajustar a relação A/C à medida que a percentagem de AR aumentava. No entanto, manteve-se sempre a relação A/C efetiva. Pelo contrário, foi necessário aumentar a relação A/C efetiva com a substituição de água potável por água do mar, o que é atribuído à presença de grandes quantidade de cloreto de sódio contidos na água do mar que aceleram a hidratação do cimento. Relativamente ao ensaio de massa volúmica no estado fresco, a massa volúmica dos betões com AR é menor do que a dos betões com AN, devido ao facto de os AR terem uma menor massa volúmica do que os AN grossos. Também é verificado que a utilização de água do mar na produção de betão não tem um efeito significativo na massa volúmica fresca. A maior relação de A/C efetiva dos betões com água do mar faz diminuir a proporção de agregados introduzidos nas misturas, o que reduz ligeiramente a massa volúmica das misturas;

- Para qualquer idade, à medida que a taxa de substituição de AN por AR aumenta, a resistência à compressão diminui. Este resultado é uma consequência de um maior desgaste do ensaio de Los Angeles dos AR face aos AN. Aos 7 dias de idade, os betões com cura em água potável e água do mar na composição apresentam uma resistência à compressão menor do que era esperado segundo a literatura. A resistência tende a aumentar com a idade e a diminuir com o aumento da taxa de substituição de agregados. Nos betões com água potável na composição, a cura com água do mar diminui a resistência à compressão em

todas as idades e para qualquer taxa de substituição de agregados. Porém, em betões com taxa de substituição de 50% de AN por AR, verifica-se que a cura com água do mar aumenta a resistência à compressão aos 7 e 91 dias. A cura do betão com água do mar em betões com 0 e 50% de AR e água potável na composição faz aumentar a resistência à compressão. A diminuição da resistência à compressão nos betões com água do mar deve-se à formação de gesso, uma vez que esta causa pressões expansivas.

- A resistência à tração tende a diminuir com o aumento da taxa de substituição de AN por AR. Isto deve-se ao elevado teor de AR cerâmicos presentes nos RCD. Esta diminuição ainda é mais acentuada com o uso de água do mar na composição. Nos betões com água do mar na composição e 100% de AR, a cura em água do mar melhorou a resistência à tração, em comparação com a cura com água potável.

- À medida que a percentagem de AR aumenta, o módulo de elasticidade diminui. Isto deve-se ao facto de os AR apresentarem uma massa volúmica menor do que os AN. O módulo de elasticidade varia muito pouco com o tipo de cura, mas diminui com a utilização de água do mar na composição do betão. Esta diminuição deve-se a fissuras internas do betão originadas por íões de cloreto presentes na água do mar. A maior diminuição do módulo de elasticidade ocorre nos betões com 100% de AR e com água do mar na composição e na cura.

- A velocidade de propagação dos ultrassons aumenta com a idade e diminui com o aumento da taxa de substituição de AN por AR. O betão com 100% de AR e água do mar na composição, apresenta a maior redução na velocidade de propagação dos ultrassons a 91 dias.

- A resistência à abrasão aumenta com a taxa de substituição de AN por AR em todos os betões, isto pode ser justificado pela elevada aderência entre a pasta de cimento e os AR. Ao incorporar AR e água do mar no betão, também se observou uma tendência de melhoria na resistência à abrasão.

Concluindo assim que a água do mar pode ser usada em betão simples e betão armado permanentemente submerso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] Gani, M.S.J. (1997). *Cement and concrete*. 1st ed. England: Chapman and Hills, 49-169.
- [2] Wegian, F. M. (2010). *Effect of seawater for mixing and curing on structural concrete*. The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering, 3(4), 235-243.
- [3] Guo, M., Hu, B., Xing, F., Zhou, X., Sun, M., Sui, L. e Zhou, Y. (2020). *Characterization of the mechanical properties of eco-friendly concrete made with untreated sea sand and seawater based on statistical analysis*. Construction and Building Materials, 234, 117339.
- [4] Newman, K. (1968). *Aspects of workability, strength, shrinkage and creep, sea dredged aggregates for concrete*. In Proceedings of a Symposium, Sand and Gravel Association of Great Britain, Buckinghamshire.
- [5] Kucche, K. J., Jamkar, S. S. e Sadgir, P. A. (2015). *Quality of water for making concrete: a review of literature*. International Journal of Scientific and Research Publications, 5(1), 1-10.
- [6] Etxeberria, M., Gonzalez-Corominas, A. e Pardo, P. (2016). *Influence of seawater and blast furnace cement employment on recycled aggregate concretes' properties*. Construction and Building Materials, 115, 496-505.
- [7] Katano, K., Takeda, N., Ishizeki, Y. e Iriya, K. (2013). *Properties and application of concrete made with sea water and un-washed sea sand*. In Proceedings of Third International conference on Sustainable Construction Materials and Technologies.
- [8] Xiao, J., Qiang, C., Nanni, A. e Zhang, K. (2017). *Use of sea-sand and seawater in concrete construction: Current status and future opportunities*. Construction and Building Materials, 155, 1101-1111.
- [9] Kumar, R. (2017). *Influence of recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste (CDW) on abrasion resistance of pavement concrete*. Construction and Building Materials, 142, 248-255.
- [10] Medina, C., Zhu, W., Howind, T., de Rojas, M. I. S. e Frías, M. (2014). *Influence of mixed recycled aggregate on the physical – mechanical properties of recycled concrete*. Journal of cleaner production, 68, 216-225.
- [11] Galloway, J. (1994). *Grading, shape, and surface properties*. Philadelphia: ASTM Special Technical Publication, 169C, 401-410.
- [12] Evangelista, L. e Brito, J. de (2007) - *Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates*. Cement and Concrete Composites, 29(5), 397-401.
- [13] Oikonomou, N. D. (2005). *Recycled concrete aggregates*. Cement and concrete composites, 27(2), 315-318.
- [14] Jiménez, J. R., Ayuso, J., Galvín, A. P., López, M. e Agrela, F. (2012). *Use of mixed recycled aggregates with a low embodied energy from non-selected CDW in unpaved rural roads*. Construction and Building Materials, 34, 34-43.
- [15] Tabsh, S. W. e Abdelfatah, A. S. (2009). *Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete*. Construction and building materials, 23(2), 1163-1167.
- [16] Abera, S. A. (2022). *Analytical study on properties of concrete materials incorporating recycled aggregates from construction and demolition waste*. Materials Today: Proceedings, 52, 2172-2183.
- [17] Hansen, T. (1986) - *Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945-1985*. Materials and Structures, 19(3), 201-246.
- [18] Brito, J. de e Robles, R. (2010) - *Recycled aggregate concrete (RAC) methodology for estimating its long-term properties*. Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, 17(6), 449-462.
- [19] Bravo, M., De Brito, J., Pontes, J. e Evangelista, L. (2015) - *Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants*. Journal of cleaner production, 99, 59-74.
- [20] Pereira, L. (2002) - *Reciclagem de resíduos de construção e demolição: aplicação à Zona Norte de Portugal*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães.
- [21] Silva, R. V., De Brito, J. e Dhir, R. K. (2018). *Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: A review*. Construction and Building Materials, 178, 19-31.
- [22] Behera, M., Bhattacharyya, S. K., Minocha, A. K., Deoliya, R. e Maiti, S. (2014). *Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review*. Construction and building materials, 68, 501-516.
- [23] Etxeberria, M., Vázquez, E., Mari, A. e Barra, M. (2007). *Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete*. Cement and concrete research, 37(5), 735-742.
- [24] Agrela, F., De Juan, M. S., Ayuso, J., Galdes, V. L. e Jiménez, J. R. (2011). *Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete*. Construction and Building Materials, 25(10), 3950-3955.
- [25] Martín-Morales, M., Zamorano, M., Ruiz-Moyano, A. e Valverde-Espinosa, I. (2011). *Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08*. Construction and building materials, 25(2), 742-748.
- [26] Butera, S., Christensen, T. H. e Astrup, T. F. (2014). *Composition and leaching of construction and demolition waste: inorganic elements and organic compounds*. Journal of hazardous materials, 276, 302-311.