

BETÃO COM A INCORPORAÇÃO DE AGREGADO RECICLADO ARG 6,3/12,5: SUSTENTABILIDADE, VIABILIDADE TÉCNICA E INOVAÇÃO

Joana Pereira ¹
Gonçalo Henriques ²
Manuel Vieira ³

¹ Concretope - Fabrica De Betão Pronto, S.A., Almada, Portugal

² Construções Pragosa, S.A., Leiria, Portugal

³ LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal

Autor correspondente: goncalo.henriques@pragosa.pt

Palavras-chave

Instruções; Prefabricação; Betão [Máximo de 6 palavras-chaves com a primeira letra em maiúscula, as palavras devem estar separadas com “;”]

Resumo

A incorporação de agregados reciclados (AR) em betões estruturais é uma via concreta para operacionalizar a economia circular na construção, reduzindo a extração de recursos naturais e o envio de resíduos de construção e demolição (RCD) para aterro. Este artigo sintetiza e discute a evidência técnica disponível para o agregado reciclado ARG 6,3/12,5 da Eco Impact (Pragosa) – com marcação CE e apto a substituir a fração 6,3/12,5 do agregado natural em betões simples e armados – com base no Documento de Aplicação LNEC DA-143 (2024) e no Relatório LNEC 415/2023. Mostra-se que o ARG 6,3/12,5 cumpre os requisitos da NP EN 12620 e da Especificação LNEC E471 (classe ARB1), apresentando propriedades físicas, químicas e mecânicas compatíveis com o uso estrutural. Em composições estudadas pelo LNEC, a substituição do agregado natural grosso 6,3/12,5 por ARG 6,3/12,5 pode reduzir a resistência à compressão de 1 até 2 classes consoante a classe do betão e a remessa do AR; a resistência à difusão de cloretos manteve-se globalmente equivalente para classes XS, ao passo que a resistência à carbonatação justificou, em classes XC2–XC4, aumentos de recobrimento de 5/10/15 mm para garantir 50 anos de vida útil..pdf).pdf) Do ponto de vista ambiental, a literatura europeia indica que o aprovisionamento de AR tende a ter menor pegada de carbono do que o de agregados naturais, e que incorporações moderadas (≈20–30%) viabilizam reduções líquidas de CO₂ sempre que a distância de transporte do AR seja menor do que a do agregado natural e que o desenho de mistura evite aumentos relevantes de cimento. A produção industrial do ARG 6,3/12,5 é certificada (ISO 9001/14001 e CPR), assegurando rastreabilidade, controlo e escalabilidade.

1. INTRODUÇÃO

A transição para um ambiente construído sustentável exige desmaterializar e recircular fluxos: reduzir a extração de agregados naturais (AN), valorizar os resíduos de construção e demolição (RCD) e aumentar o teor de materiais reciclados nos produtos de construção. No contexto europeu, esta estratégia é reforçada pelo Pacto Ecológico Europeu, pelo Plano de Ação para a Economia Circular e pela Onda de Renovação, num cenário em que os RCD representam cerca de 36% de todos os resíduos gerados na UE-27, sendo a fração mineral (betão, argamassas e pedra) a mais significativa [3].

No domínio específico do betão, os agregados reciclados grossos (ARG) provenientes de resíduos de betão apresentam desempenho técnico compatível com incorporações moderadas em betões estruturais de classes baixa a média, desde que cumpram a norma EN 12620/NP EN 12620, as especificações nacionais (por exemplo, LNEC E471) e que o projeto e a dosagem considerem as diferenças relativamente aos agregados naturais [3].

Em Portugal, o LNEC avaliou o agregado reciclado ARG 6,3/12,5, produzido pela Eco Impact (Pragosa), e emitiu o Documento de Aplicação (DA-143) com parecer favorável para a sua utilização em betões simples ou armados, sob condições definidas e com marcação CE [1].

O presente artigo descreve e discute a experiência com o ARG 6,3/12,5, abordando:

- no Capítulo 2, a metodologia de estudo, incluindo enquadramento normativo, caracterização do material e composições experimentais;
- no Capítulo 3, os resultados experimentais relativos à conformidade, resistência mecânica e durabilidade;
- no Capítulo 4, a análise crítica da viabilidade técnica e das boas práticas de projeto e dosagem;
- no Capítulo 5, as implicações ambientais em termos de pegada de carbono;
- no Capítulo 6, as principais conclusões e recomendações para aplicação em obra.

2. METODOLOGIA

2.1. PRODUTO E ENQUADRAMENTO NORMATIVO

O agregado reciclado ARG 6,3/12,5 é produzido pela empresa ECO IMPACT, S.A., do grupo Pragosa, a partir do processamento de resíduos de betão provenientes de obras de construção, reconstrução, ampliação, alteração, conservação e demolição, bem como da derrocada de edificações. Este material destina-se à substituição parcial ou total da fração 6,3/12,5 do agregado grosso natural no fabrico de betões simples ou armados, desempenhando funções equivalentes às dos agregados britados de origem natural [1].

O ARG 6,3/12,5 cumpre os requisitos da NP EN 12620:2002+A1:2010 e da Especificação LNEC E471, sendo classificado como resíduo não perigoso. O produto é colocado no mercado com marcação CE, acompanhada das informações previstas no Anexo ZA da norma referida, e está abrangido pelo Regulamento (UE) 305/2011 (Certificado CPF n.º 1515-CPR-0266) [4][5][19].

O Documento de Aplicação LNEC DA-143 define as condições de produção, armazenamento e aplicação do ARG 6,3/12,5, incluindo os requisitos para controlo interno e externo da qualidade. A produção deve garantir a manutenção das características essenciais que permitem a aposição da marcação CE, através da implementação de um sistema de Controlo da Produção em Fábrica (CPF). O documento estabelece ainda as condições de armazenagem, que incluem a formação de pilhas com dimensões controladas (base entre 6 e 10 m, altura entre 3,5 e 5 m), assegurando distâncias de segurança para circulação de equipamentos e proteção contra precipitação [1].

2.2. CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO RECICLADO

De acordo com o Relatório LNEC 415/2023, foram caracterizadas quatro remessas de ARG, abrangendo propriedades geométricas, físicas, químicas e mecânicas, em conformidade com as normas aplicáveis [2]. Os ensaios incluíram:

- Granulometria (NP EN 933-1) [11];
- Classificação de constituintes (NP EN 933-11) [12];
- Forma das partículas – índice de achatamento (NP EN 933-3) [13];
- Resistência à fragmentação – Los Angeles (NP EN 1097-2) [14];
- Massa volúmica e absorção de água (NP EN 1097-6) [15];
- Estabilidade volumétrica (NP EN 1367-4) [16];
- Reatividade álcalis-sílica (ASTM C1260) [18];
- Teores de cloretos, sulfatos, enxofre total e álcalis;

- Contaminantes orgânicos;
- Ensaio de lixiviação (EN 12457-4) [17].

Os resultados confirmaram a conformidade do ARG com a classe ARB1 da Especificação LNEC E471, permitindo a sua utilização em betões estruturais, desde que respeitadas as condições definidas no DA-143 [2][5].

2.3. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE BETÕES COM ARG

Foram estudadas duas composições de referência com agregados naturais, representativas das classes C50/60 (tipo A) e C25/30 (tipo B). A Brita 1 (6,3/12,5 mm) foi substituída por ARG em teores de 20%, 50% e 100%, em massa, mantendo constante o volume ocupado por esta fração [3].

As composições foram ajustadas para manter a consistência e a relação água/ligante, utilizando adjuvantes MasterEase 3550 e MasterPozzolith 7004. As características das composições, granulometrias e teores de adjuvantes encontram-se nos Quadros 4.1 a 4.4 do Relatório LNEC 415/2023 [3].

O programa experimental incluiu:

- Resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias (EN 12390-3) [9];
- Coeficiente de migração de cloretos (LNEC E463), para betões tipo A (classe XS) [8];
- Resistência à carbonatação acelerada (EN 12390-12), para betões tipo B (classe XC), com estimativa de recobrimentos mínimos para 50 anos de vida útil, segundo LNEC E465 [7][10].

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1. CONFORMIDADE DO ARG 6,3/12,5

Os agregados reciclados ensaiados cumpriram integralmente os requisitos da Especificação LNEC E471, enquadrando-se na classe ARB1. Isto inclui:

- Granulometria dentro dos limites definidos;
- Índice de achatamento e resistência à fragmentação (Los Angeles) compatíveis com a classe;
- Absorção de água $\leq 7\%$;
- Teores de cloretos, sulfatos e enxofre total abaixo dos limites normativos;
- Ausência de contaminantes orgânicos significativos [2][5].

3.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A substituição da Brita 1 por ARG influenciou a resistência à compressão aos 28 dias, com variações dependentes do teor de ARG e da remessa:

- Betões tipo A (C50/60): reduções até duas classes; em remessas de melhor qualidade, a redução foi nula ou marginal (ex.: A20/A50/A100 com 4.ª remessa) [2].

- Betões tipo B (C25/30): reduções até uma classe; por exemplo, B100 (2.ª remessa) $\approx$ C20/25 [2].

Nota: Em alguns casos, teores elevados ($\geq 50\%$) não implicaram perda significativa, evidenciando a importância da qualidade do ARG e da otimização da dosagem.

3.3. DURABILIDADE (CLORETOS E CARBONATAÇÃO)

Difusão de cloretos (classes XS): não se observaram diferenças relevantes entre betões de referência e com ARG, mantendo-se o desempenho dentro da dispersão experimental [2][8].

- Carbonatação (classes XC): verificou-se aumento da profundidade com o teor de ARG, exigindo incrementos de recobrimento nominal para garantir 50 anos de vida útil:
 - +5 mm (XC2),
 - +10 mm (XC3),
 - +15 mm (XC4), face ao betão de referência [2][6][7].

Importante: As composições tipo B não cumprem a relação água/ligante máxima para XC3–XC4 (LNEC E464), pelo que a sua aplicação direta nestas classes não é admissível sem ajustes [6].

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Viabilidade técnica. A evidência confirma a aptidão ao uso do ARG 6,3/12,5 para substituir a fração 6,3/12,5 do AN, desde que cumpridas as condições do DA-143 e da regulamentação aplicável [1][4][5].

Mecanismos. A argamassa aderida típica dos AR eleva a porosidade/absorção e pode reduzir o módulo de elasticidade e a resistência, sobretudo em betões de classe superior. Isto explica a maior sensibilidade das misturas tipo A (C50/60) e a necessidade de incorporações moderadas quando a meta é manter classes resistentes elevadas [2][5].

Boas práticas de dosagem/projeto.

- Dosagem: gerir a água absorvida (pré-saturação do AR ou correção da água efetiva), privilegiar adjuvantes para manter abatimento, e otimizar a granulometria do esqueleto (B2/B1/ARG) com A/L conforme LNEC E464 [2][6].
- Projeto: em XC, verificar recobrimentos por LNEC E465 e, quando aplicável, preferir teores moderados ($\sim 20\text{--}30\%$) de ARG; em XS, a equivalência de difusão de cloretos permite manter especificações convencionais, desde que a A/L cumpra a E464 [7][8][6].

Envelope recomendado.

- Pré-fabricação e betão pronto em XC1/XC2 e XS1/XS2, com teores $\approx 20\text{--}30\%$ de ARG como ponto ótimo técnico-ambiental; teores superiores requerem provas prévias (projeto-específico) [2][3][6][8].
- XC3/XC4: ajustar recobrimentos e A/L; ponderar teores inferiores de ARG ou melhoria da qualidade do ARG (triagem seletiva/beneficiação) [2][6][7].

5. REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂

A literatura europeia (JRC) evidencia que a produção/fornecimento de AR tende a ter menor pegada que a de AN britado, por processos menos intensivos e cadeias logísticas mais curtas (CDW/AR geralmente próximos de centros urbanos). Todavia, os ganhos ao nível do betão dependem de: i) distâncias e modos de transporte (camião/navio), ii) ajustes de dosagem (evitar aumentos relevantes de cimento) e iii) classe de resistência/exposição [3].

Condições típicas para reduções líquidas de CO₂ (≈10–30%):

- Teores moderados (≈20–30%) de ARG;
- Transporte do AR ≤ transporte do AN (km-ton mais baixos);
- Manutenção do teor de cimento (ou aumento marginal, compensado por adjuvantes) [3].

Em síntese, a incorporação moderada e inteligente do ARG 6,3/12,5 é coerente com metas de descarbonização e com os referenciais de compra pública ecológica, devendo os ganhos ser validados por ACV em cada projeto [3].

6. REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂

- Conformidade e aptidão: o ARG 6,3/12,5 cumpre a LNEC E471/NP EN 12620 (classe ARB1) e dispõe de DA-143 com marcação CE e CPF certificados (ISO 9001/14001) [1][4][5].
- Desempenho mecânico: reduções controladas de resistência (até duas classes em C50/60; uma classe em C25/30), dependentes do teor e da remessa de ARG; há casos com redução nula em remessas de melhor qualidade [2].
- Durabilidade: equivalência nos ensaios de difusão de cloretos (XS); carbonatação mais rápida em XC, mitigável por recobrimentos +5/+10/+15 mm (XC2/3/4) e A/L conforme LNEC E464 [2][6][7][8].
- Prática recomendada: teores de 20–30% de ARG, gestão da água de absorção, uso de adjuvantes, verificação de recobrimentos por E465, e provas prévias quando se pretendem teores superiores ou classes ambientais mais severas [2][6][7][8].
- Ambiente: reduções de CO₂ são realistas e quantificáveis em cenários com logística favorável ao AR e sem aumento significativo de cimento; ganhos projeto-dependentes [3].

Agradecimentos

[Use o estilo “Texto” no texto dos agradecimentos. Use esta secção para referir bolsas, projetos, financiamento, etc. Caso não seja aplicável deve remover esta secção]

Referências

Documentos técnicos

- [1] LNEC, DA-143 — ARG 6,3/12,5 – *Agregados Reciclados Grossos. Documento de Aplicação*, Lisboa, 2024.
- [2] LNEC, Relatório 415/2023 — *Agregados Reciclados em Betões. Estudo para a emissão de um Documento de Aplicação*, Lisboa, 2023.
- [3] Pacheco, J.; de Brito, J.; Lamperti Tornaghi, M., Use of recycled aggregates in concrete: opportunities for upscaling in Europe, EUR 31667 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023.

Normas e especificações

- [4] NP EN 12620:2002+A1:2010, *Agregados para betão*.
- [5] LNEC E471 (2009), *Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos*.
- [6] LNEC E464, *Betões. Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais*.
- [7] LNEC E465, *Betões. Metodologia para estimar as propriedades de desempenho do betão que permitem satisfazer a vida útil de projecto de estruturas de betão armado ou pré-esforçado sob as exposições ambientais XC e XS*.
- [8] LNEC E463, *Betões. Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não*

estacionário.

[9] EN 12390-3, *Ensaio do betão endurecido — Parte 3: Resistência à compressão*.

[10] EN 12390-12, *Ensaio do betão endurecido — Parte 12: Determinação da resistência à carbonatação do betão — Método de carbonatação acelerada*.

[11] NP EN 933-1, *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados — Parte 1: Análise granulométrica*.

[12] NP EN 933-11, *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados — Parte 11: Classificação de constituintes de agregados grossos reciclados*.

[13] NP EN 933-3, *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados — Parte 3: Índice de achatamento*.

[14] NP EN 1097-2, *Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados — Parte 2: Determinação da resistência à fragmentação (Los Angeles)*.

[15] NP EN 1097-6, *Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados — Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água*.

[16] NP EN 1367-4, *Ensaio das propriedades térmicas e de meteorização dos agregados — Parte 4: Determinação da retracção por secagem*.

[17] EN 12457-4, *Characterisation of waste. Leaching — One stage batch test at liquid to solid ratio of 10 l/kg for materials with particle size below 10 mm*.

[18] ASTM C1260, *Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)*.

[19] Regulamento (UE) 305/2011 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 9 de Março de 2011 (Regulamento dos Produtos de Construção — CPR).