VARIABILIDADE NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS: DESAFIOS PARA APLICAÇÕES ESTRUTURAIS

Variability in compressive strength of concretes with recycled aggregates: challenges for structural applications

Bruno Lucas de Miranda
Universidade do Estado de Minas Gerais | João Monlevade, MG | bruno.0693388@discente.uemg.br

Juscelina Rosiane Ferreira
Universidade do Estado de Minas Gerais | João Monlevade, MG | juscelina.ferreira@uemg.br

Wilson Geraldo Batista
Universidade do Estado de Minas Gerais | João Monlevade, MG | wilson.batista@uemg.br

Joziane Aparecida Ribeiro
Universidade do Estado de Minas Gerais | João Monlevade, MG | joziane.0693624@discente.uemg.br

Vitória Isadora Frade Reis
Universidade do Estado de Minas Gerais | João Monlevade, MG | vitoria.0694227@discente.uemg.br

Resumo

Buscando-se contribuir com o reaproveitamento de resíduos da construção e demolição, este trabalho avaliou a variabilidade da resistência à compressão de concretos, para aplicações estruturais, produzidos com agregados reciclados. Os métodos adotados incluíram a caracterização dos agregados reciclados e naturais e a realização de estudo experimental comparando concretos de referência (com agregados naturais) e concretos reciclados (com Agregado Reciclado de Concreto), nos quais os agregados miúdos e graúdos naturais foram substituídos em proporções em massa de 0%, 12,5%, 25%, 50% e 100%. Os resultados demonstraram elevada variabilidade nos resultados de resistência à compressão dos concretos com agregados reciclados, com desvio padrão de 6,5 MPa e COV de 24,9%. Apenas 36% dos corpos de prova alcançaram a resistência f_{ck} mínima do concreto estrutural de 20 MPa. No geral, os resultados indicam que o desempenho do concreto depende da uniformidade dos resultados, fundamental para a confiabilidade e segurança em aplicações estruturais.

Palavras-chave: Concreto reciclado; Concreto Estrutural; Resíduo de construção e demolição; Resistência à compressão característica.

ABSTRACT

Aiming to contribute to the reuse of construction and demolition waste, this study evaluated the variability of the compressive strength of concretes for structural applications produced with recycled aggregates. The methods adopted included the characterization of recycled and natural aggregates and the performance of an experimental study comparing reference concretes (with natural aggregates) and recycled concretes (with Recycled Concrete Aggregate), in which the natural fine and coarse aggregates were replaced in mass proportions of 0%, 12.5%, 25%, 50% and 100%. The results demonstrated high variability in the compressive strength results of concretes with recycled aggregates, with a standard deviation of 6.5 MPa and COV of 24.9%. Only 36% of the test specimens reached the minimum f_{ck} strength of structural concrete of 20 MPa. Overall, the results indicate that concrete performance depends on the uniformity of the results, which is essential for reliability and safety in structural applications.

Keywords: Recycled concrete; Structural concrete; Construction and demolition waste; Specified concrete strength.

1. INTRODUÇÃO

A substituição do agregado natural por agregado reciclado, em argamassas e concretos, tem se mostrado uma alternativa sustentável, que contribui para a preservação do meio ambiente. O agregado reciclado é o material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção e demolição, com características técnicas para aplicação em obras de engenharia (ABNT NBR 15116, 2021). Os agregados reciclados possuem propriedades diferentes dos agregados naturais como maior taxa de absorção de água, textura áspera, forma lamelar e menor massa específica (Malta, Silva, Gonçalves, 2013; Neno, Brito e Veiga, 2014; Silva Neto e Leite, 2018; Calcado *et al.,* 2019; Mora-Ortiz *et al.,* 2020; Liu et al., 2021; Rosado *et al.,* 2022; Gerin *et al.,* 2019) características que influenciam diretamente nas propriedades do concreto, especialmente no caso de concreto estrutural, exigindo um elevado controle de qualidade.

O concreto estrutural é o concreto aplicado em elementos estruturais, e conforme NBR 6118 (ABNT, 2023) deve apresentar resistência característica à compressão (f_{ck}) igual ou superior a 20 MPa. Apesar da NBR 15116 (ABNT, 2021) permitir a utilização agregados reciclados em concretos estruturais, sua aplicação ainda enfrenta muitos desafios, pois as características diferenciadas dos agregados reciclados influenciam diretamente nas propriedades do concreto, especialmente na resistência mecânica.

O objetivo desse estudo foi analisar a variabilidade da resistência à compressão, visando a produção de concreto estrutural, com substituições do agregado convencional por Agregado Reciclado de Concreto (ARCO), em teores acima de 20%.

2. METODOLOGIA

Para a caracterização dos agregados miúdos foram realizados os ensaios de granulometria (ABNT NBR 17054:2022), absorção de água (ABNT NBR 16916:2021), massa unitária e índice de vazios (ABNT NBR 16972:2021). Para os agregados graúdos, além dos ensaios citados, foram realizados o índice de forma (ABNT NBR 7809:2019) e resistência a abrasão Los Angeles (ABNT NBR 16974:2022).

Para avaliar a variabilidade na resistência à compressão do concreto, foram fabricados o concreto de referência com agregados naturais e os concretos com agregado reciclado do tipo ARCO com substituições, em massa, do agregado convencional iguais a 12,5%, 25%, 50% e 100%. O material utilizado para produção da areia e brita reciclada foi proveniente da britagem de Corpos de Prova (CPs) de concreto descartados no laboratório do Centro Tecnológico da UEMG. Os materiais utilizados para a produção dos concretos foram: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V ARI), areia natural quartzosa, brita de gnaisse, areia e brita recicladas na mesma granulometria dos agregados naturais.

Para se alcançar o f_{ck} mínimo do concreto estrutural de 20 MPa, considerou-se desvio padrão (SD) de 4 MPa (condição de preparo A), obtendo-se a resistência média (f_{cjm}) aos 28 dias igual a 26,6 MPa e o coeficiente de variação (COV) igual a 15% (ABNT NBR 12655, 2022). Foi utilizado o traço proposto por Leite e Costa (2014), previsto para atingir resistência à compressão de 25 MPa, aos 28 dias, sendo as proporções em massa iguais a 1:2,94:2,97:0,63:0,005 (cimento:areia:brita:água:plastificante). Houve uma pequena variação na relação entre água e cimento (a/c), sendo que alguns concretos ficaram com a/c=0,69. Para os concretos 01, 03, 06, e 09 foram produzidos 7 CPs de cada traço (4 CPs com a/c=0,63 e 3 CPs com a/c=0,69). Para os outros concretos foi utilizada apenas a/c=0,69, sendo produzidos 3 CPs de cada traço.

Para cada traço foi utilizado 2149,7g de cimento. A quantidade dos outros materiais e as proporções em massa utilizadas para a produção dos concretos são apresentadas na Tabela 1. A título de exemplificação, o concreto nº 2 (C25AR0BR) foi produzido com 25% de areia reciclada (75% de areia natural) e 0% de brita reciclada (100% de brita natural).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta as curvas granulométricas da areia natural e da brita natural, bem como as curvas da areia e brita reciclada e as zonas de utilização para o agregado miúdo, especificadas na NBR 7211 (ABNT, 2022). A dimensão máxima característica do agregado miúdo é 4,75mm e o módulo de finura é 2,95, o que enquadra essa areia na zona utilizável superior. Para o agregado graúdo a dimensão máxima característica é 19mm e o módulo de finura é 6,57, o que enquadra a brita na zona granulométrica 9,5/25.

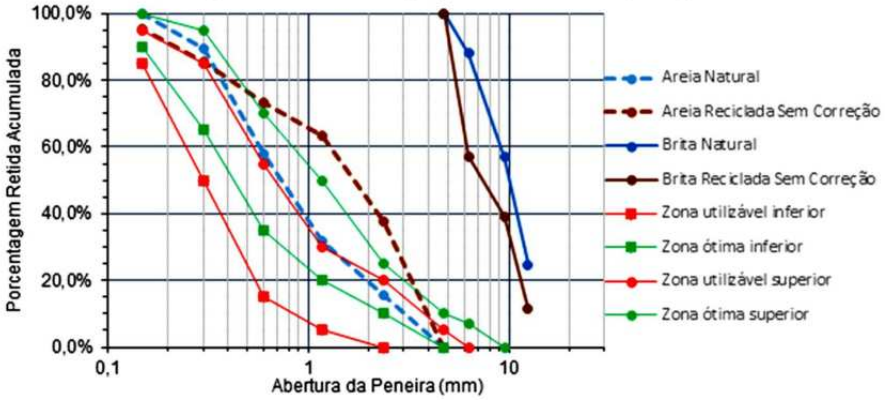
Tabela 1: Dosagens de agregados e água para a produção dos concretos.

Concreto	Nomenclatura	Areia Natural		Brita Natural		Areia Reciclada		Brita Reciclada		% global (areia + brita)	Água (ml)
		(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)		
01	CAR0BR-REF	100	6320,1	100	6384,6	0	0,00	0	0,00	0	1483,3 (1348,3)*
02	C25AR0BR	75	4740,1	100	6384,6	25	1580,0	0	0,00	12,5	1483,3
03	C0AR25BR	100	6320,1	75	4788,5	0	0,0	25	1596,1	12,5	1483,3 (1348,3)*
04	C50AR0BR	50	3160,5	100	6384,6	50	3160,5	0	0,00	25	1483,3
05	C25AR25BR	75	4740,1	75	4788,5	25	1580,0	25	1596,1	25	1483,3
06	C0AR50BR	100	6320,1	50	3192,3	0	0,0	50	3192,3	25	1483,3 (1348,3)*
07	C100AR0BR	0	0,00	100	6384,6	100	6384,6	0	0,00	50	1483,3
08	C50AR50BR	50	3160,5	50	3192,3	50	3160,5	50	3192,3	50	1483,3
09	C0AR100BR	100	6320,1	0	0,0	0	0,0	100	6384,6	50	1483,3 (1348,3)*
10	C100AR100BR	0	0,0	0	0,0	100	6384,6	100	6384,6	100	1483,3

*Relação a/c = 0,63

Observa-se que a granulometria da areia natural está situada dentro das zonas ótimas inferior e superior, conforme previsto na NBR 7211 (ABNT, 2022). Deste modo, a granulometria da areia reciclada foi corrigida para manter a mesma granulometria da areia natural. Manter uma granulometria adequada é importante para assegurar a qualidade e a performance do concreto, pois influencia diretamente na trabalhabilidade, e na sua resistência final.

Figura 1: Curvas granulométrica dos agregados utilizados na produção dos concretos



A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização realizados nos agregados. Observa-se que, conforme esperado, a massa unitária dos agregados naturais foi superior à dos agregados. Isso ocorre, em grande parte, devido à menor porosidade dos agregados naturais. O índice de vazios está relacionado à compacidade dos agregados. Dessa forma, agregados com menor índice de vazios, apresentam um maior empacotamento entre as partículas, ou seja, as partículas menores preenchem os vazios entre as partículas maiores, resultando em uma estrutura mais densa. O maior índice de vazios apresentado pelos agregados reciclados se deve principalmente, ao formato lamelar dos mesmos, conforme evidenciado no índice de forma (I) do agregado natural, cujo valor foi igual a 1,12, que caracteriza um agregado que se aproxima do formato cúbico (I =1,00) e o índice de forma do agregado reciclado foi igual a 2,22 mais próximo do formato lamelar (I=3,00). O índice de resistência à abrasão e ao impacto Los Angeles do agregado graúdo reciclado apresentou um valor consideravelmente superior em comparação com o agregado graúdo natural, embora ambos estejam dentro do limite estabelecido pela NBR 7211, de 50 %, em massa, do material. Esse resultado indica uma menor resistência do agregado reciclado, uma característica prevista devido à presença significativa de argamassa envolvendo as partículas.

Tabela 2: Resultados dos ensaios de caracterização realizados nos agregados.

Agregado	Origem	Massa Unitária (g/cm³)	Índice de Vazios (%)	Absorção de água (%)	Índice de forma	Resistência à abrasão Los Angeles (%)
Miúdo	Natural	1,49	33,58	1,41	-	-
Miúdo	Reciclado	1,38	39,02	4,60	-	-
Graúdo	Natural	1,40	44,86	1,00	1,12	37,6
Graúdo	Reciclado	1,29	51,54	6,74	2,22	48,2

Fonte: autoria própria.

Os CPs foram rompidos com idade de 21, 28, 33 e 34 dias. Apesar das diferentes idades de ruptura, os resultados foram analisados conjuntamente, uma vez que foi utilizado CPV ARI para a confecção do concreto, que conforme NBR 16697 (ABNT, 2018) atinge 100% da resistência com 14 dias e mantém o ganho de

resistência aproximadamente constante a partir dessa data. A Tabela 3 apresenta as estatísticas dos resultados de resistência à compressão dos concretos analisados.

Tabela 3: Estatísticas dos resultados de resistência à compressão dos concretos analisados.

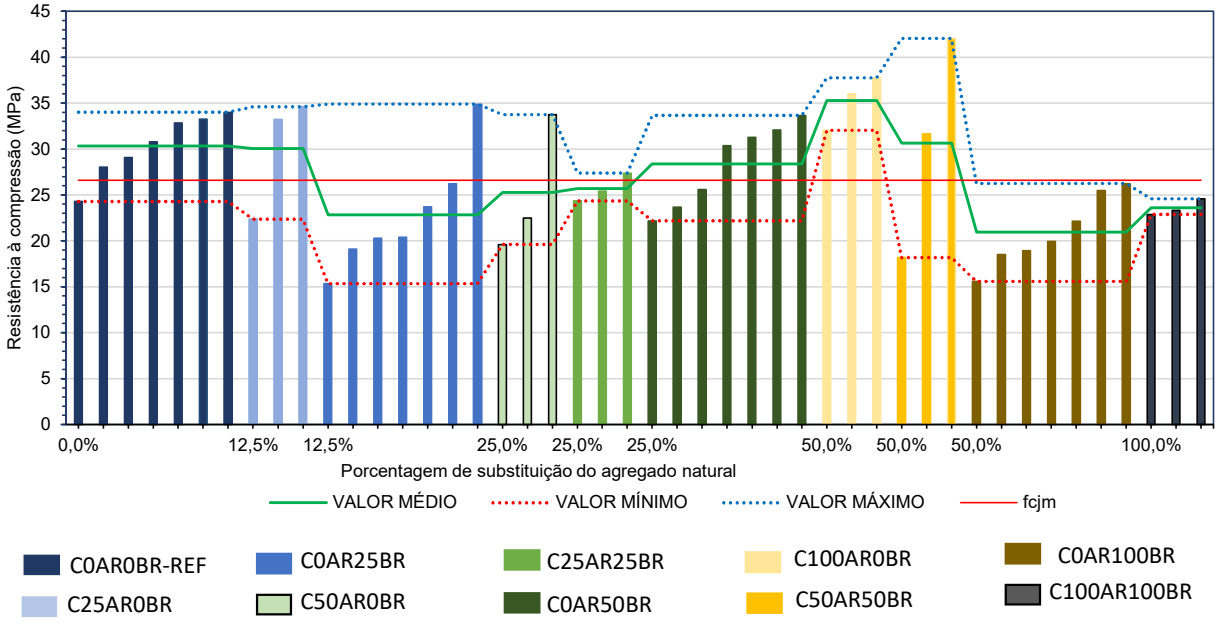
Concreto	Nomenclatura	mínimo	média	máximo	Desvio padrão	COV (%)
1	CAR0BR-REF	24,3	30,3	34,0	3,2	10,6
2	C25AR0BR	22,4	30,1	34,6	5,5	18,2
3	C0AR25BR	15,3	22,8	34,9	5,9	25,6
4	C50AR0BR	19,6	25,3	33,7	6,1	24,2
5	C25AR25BR	24,4	25,7	27,4	1,2	4,9
6	C0AR50BR	22,2	28,4	33,7	4,2	14,7
7	C100AR0BR	32,0	35,3	37,8	2,4	6,8
8	C50AR50BR	18,2	30,6	42,0	9,8	31,9
9	C0AR100BR	15,6	21,0	26,2	3,6	17,0
10	C100AR100BR	22,9	23,6	24,2	0,7	3,1

Fonte: autoria própria.

Considerando-se os valores de projeto desejados f_{cjm}=26,6 MPa; SD = 4 MPa e COV = 15%, observa-se que o concreto de referência, sem a utilização de agregados reciclados (1-CAR0BR-REF), atingiu os parâmetros de projeto, tendo apresentado uma resistência média igual a 30,3 MPa, aproximadamente 14% maior que o valor desejado. Entretanto, quando se analisa os concretos com substituição dos agregados naturais por agregados reciclados, apenas o concreto 7- C100AR0BR atingiu todos os valores desejados, com média de 35,3 MPa (aproximadamente 33% maior que o desejado) e COV excelente. Ressalta-se que os concretos 5 e 6 atingiram valores muito próximos dos desejados, com o concreto 5-C25AR25BR, atingindo aproximadamente 97% da resistência média desejada e o concreto 6-C0AR50BR, com SD apenas 5% maior que o desejado. Considerando, apenas a análise do valor médio da resistência à compressão, 4 concretos atingiram o valor desejado, sendo que o concreto 5-C25AR25BR atingiu um valor muito próximo.

A Figura 2 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos 46 CPs. Os resultados de resistência em cada concreto foram organizados do menor para o maior valor.

Figura 2: Resistências à compressão dos CPs ensaiados.



Fonte: autoria própria.

Os resultados obtidos evidenciam significativa variabilidade dos resultados, dentro do mesmo traço, com mesmo percentual de substituição. Numa análise global, considerando os resultados de resistência dos 39 CPs com substituição do agregado natural por ARCO, o valor médio, mínimo e máximo de resistência são respectivamente 26,1 MPa; 15,3 MPa (C0AR25BR) e 42,0 MPa (C50AR50BR). O desvio padrão foi de 6,5 MPa e coeficiente de variação de 24,9%, valores elevados. Aproximadamente 36% (14 CPs) alcançaram um valor de resistência maior que o f_{cjm} (26,6 MPa) mostrando que atingiram a resistência f_{ck} mínima do concreto estrutural. De forma geral, os resultados indicam que o desempenho do concreto depende não apenas da

resistência média atingida, mas também da uniformidade dos resultados, fundamental para a confiabilidade e segurança em aplicações estruturais.

4. CONCLUSÃO

Durante a caracterização dos materiais utilizados, observou-se que os agregados reciclados possuem características inferiores em comparação com os agregados naturais, tais como um alto índice de desgaste, maior absorção de água e maior porosidade. Contudo, eles também apresentam aspectos positivos, como a baixa massa unitária, além de serem ecologicamente favoráveis. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão mostram que apenas os concretos de referência, sem agregados reciclados (1-CAR0BR-REF) e o concreto com 100% de areia reciclada (7-C100AR0BR) atenderam plenamente aos parâmetros de projeto (f_{ck} igual 20 MPa e SD igual a 4 MPa). Outros traços, como os concretos 5-C25AR25BR e 6-C0AR50BR, apresentaram desempenho próximo ao desejado. No entanto, observou-se elevada variabilidade entre os CPs com agregados reciclados, com desvio padrão de 6,5 MPa e COV de 24,9%, e apenas 36% (14 CPs) alcançaram a resistência f_{ck} mínima do concreto estrutural de 20 MPa. De forma geral, os resultados indicam que o desempenho do concreto depende não apenas da resistência média atingida, mas também da uniformidade dos resultados, fundamental para a confiabilidade e segurança em aplicações estruturais.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pelas bolsas de iniciação cientifica concedidas pelo Programa Institucional de Apoio à Pesquisa (PAPQ/UEMG) para realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116**. Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland: requisitos e métodos de ensaios, Rio de Janeiro, 2021.

__. **NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2023.

__. **NBR 17054**. Agregados — Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022. 5p.

__. **NBR 16916**. Agregado miúdo — Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2022. 7p.

__. **NBR 16972.** Agregados — Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021. 6p.

__. **NBR 7809.** Agregado graúdo — Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. 2019. 3p.

__. **NBR 16974.** Agregados — Ensaios de resistência ao impacto e à abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 2022. 5p.

__. **NBR 7211.** Agregados para concreto — Requisitos. Rio de Janeiro, 2022. 10p.

__. **NBR 12655.** Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2022. 22p.

__.**NBR 16697**. Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2023. 12p.

MALTA, J. O.; SILVA, V. S.; GONÇALVES, J. P. Argamassa Contendo Agregado Miúdo Reciclado de Resíduo de construção e Demolição. **Revista eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 1, n. 2, p. 176-188, 2013. DOI https://doi.org/10.9771/gesta.v1i2.7214. Disponível em: https://periodicos.ufba.br/index.php/gesta/article/view/7214/6417.

GERIN, M. T.; STORCH, I. S.; FILHO, F. M. A.; NARDIN, S. Utilização de Agregado de RCD em Elementos Estruturais: Panorama Atual. In: **Congresso sul-americano de resíduos sólidos e sustentabilidade**, 2º., 2019, Foz do Iguaçu/PR. Disponível em: https://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2019/VII-067.pdf

NENO, C.; BRITO, J.; VEIGA, R. Using fine recycled concrete aggregate for mortar production. **Materials Research**, [sl.], ano 2014, v. 26, n. 1, p. 168-177, 1 fev. 2014. DOI https://doi.org/10.1590/S1516-14392013005000164. Disponível em: https://www.scielo.br/j/mr/a/NbGscRDrgRZpngwHRgPqYWs/?format=pdf&lang=en. Acesso em: 5 out. 2023.

SILVA NETO, G. A.; LEITE, M. B. Study of the influence of the mortar fine recycled aggregate ratio and the mixing sequence on the behavior of new mortars. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 53-69, abr./jun. 2018. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000200242

CALCADO, G.; ALVES, L.; VAZQUEZ, E.; TOLEDO FILHO, R. D. Construction and demolition waste aggregates: analysis of the physical and mechanical properties of mortars. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. v. 652. p1-6. 2016

MORA-ORTIZ, R.S.; MUNGUÍA-BALVANERA, E.; DÍAZ, S.A.; MAGAÑA-HERNÁNDEZ, F.; DEL ANGEL-MERAZ, E.; BOLAINA-JUÁREZ, Á. Mechanical Behavior of Masonry Mortars Made with Recycled Mortar Aggregate. **Materials**. 2020, v.13, p 1-14. 2020. DOI https://doi.org/10.3390/ma13102373.

ROSADO, S.; COSTAFREDA, J.; MARTÍN, D.; PRESA, L.; GULLÓN, L. Recycled Aggregates from Ceramic and Concrete in Mortar Mixes: A Study of Their Mechanical Properties. **Materials.** v. 15, p.1-12. **2022** DOI https://doi.org/10.3390/ma15248933.