

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO PERCENTUAL DE INCREMENTO DE RESÍDUO DE BAUXITA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE AGREGADOS GRAÚDOS SINTÉTICOS E SUA UTILIZAÇÃO EM CONCRETO ESTRUTURAL DE CIMENTO PORTLAND DE RESISTÊNCIA NORMAL

INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DEL PORCENTAJE DE INCREMENTO DE RESIDUO DE BAUXITA EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE AGREGADOS GRUESOS SINTÉTICOS Y SU UTILIZACIÓN EN CONCRETO ESTRUCTURAL DE CEMENTO PORTLAND DE RESISTENCIA NORMAL

INFLUENCE OF THE VARIATION OF THE PERCENTAGE OF INCREASE OF BAUXITE RESIDUE ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SYNTHETIC COARSE AGGREGATES AND THEIR USE IN STRUCTURAL CONCRETE OF NORMAL STRENGTH PORTLAND CEMENT



10.56238/revgeov17n1-068

Robson da Silva Fernandes

Doutor em engenharia civil

Instituição: Universidade Federal do Pará

E-mail: robsoneng.civil34@gmail.com

João Carlos Lisboa de Lima

Doutor em engenharia civil

Instituição: Universidade Federal do Pará

E-mail: joaocarloslisboadelima@hotmail.com

Marcella Camilly Dias Ribeiro

Mestra em engenharia civil

Instituição: Universidade Federal do Pará

E-mail: marcellacdribeiro@gmail.com

Danusa Mayara de Souza

Doutora em geofísica

Instituição: Universidade Federal do Pará

E-mail: danusa@ufpa.br

Lucas Miranda Pantoja

Bacharel em engenharia civil

Instituição: Universidade Federal do Pará

E-mail: lucasmpantoja@icloud.com



Marcelo Martins Farias

Doutor em engenharia civil

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará

E-mail: marcelo.farias@ifpa.edu.br

Celestina Lima de Rezende Farias

Mestra em engenharia civil

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará

E-mail: celestina.rezende@ifpa.edu.br

Fabíola Thomaz Maia

Bacharela em arquitetura e urbanismo

Instituição: Universidade Federal do Pará

E-mail: fabi.thomaz@gmail.com

Wladimir Rafael de Matos Lamarão

Especialista em perícias para engenharia

Instituição: Universidade Federal do Pará

E-mail: wladimirlamarao@gmail.com

Patricia da Silva Chaves

Mestra em engenharia civil

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará

E-mail: patricia.chaves@ifpa.edu.br

Elsimar Souza Santos

Doutor em engenharia civil

Instituição: Universidade Federal do Pará

E-mail: elsimar.santos@itec.ufpa.br

Lucas Emanuel Mateus Pereira Lopes

Bacharel em engenharia civil

Instituição: Universidade Federal do Pará

E-mail: lucasempl01@gmail.com

William Meireles de Souza

Bacharel em engenharia civil

Instituição: Universidade Federal do Pará

E-mail: william.souza@itec.ufpa.br

Marcelo de Souza Picanço

Doutor em geologia

Instituição: Universidade Federal do Pará

E-mail: marcelosp@ufpa.br



RESUMO

O presente estudo é parte integrante de um extenso projeto de cooperação para a realização de pesquisas entre a Universidade Federal do Pará e a empresa Hydro Alunorte. A proposta consistia na produção de agregados graúdos sintéticos a partir de resíduos de bauxita (AGS) e sua subsequente utilização na produção de concreto estrutural de resistência convencional. Esta pesquisa faz menção a um estudo, o qual abordou, em parte, a dinâmica dos ciclos de produção de agregados sintetizados. Para tanto, empregou-se os agregados graúdos AGS70 e AGS80 do terceiro ciclo de produção. A discrepância percentual do resíduo na composição dos agregados foi de aproximadamente 10%. Dentre os resultados obtidos, destacam-se as análises das propriedades físicas e mecânicas dos agregados sintéticos. Nesse contexto, o AGS80 apresentou capacidade de absorção de água 24% superior à do AGS70. Os resultados obtidos nos compósitos com os agregados AGS70 e AGS80 indicaram que, em um primeiro momento, o concreto com AGS80 apresentou melhores resultados em relação às propriedades físicas e mecânicas.

Palavras-chave: Agregado Graúdo Sintético. Resíduo da Bauxita. Concreto. Ensaio. Microestrutura e Módulo do Agregado.

ABSTRACT

The present study is an integral part of an extensive cooperation project aimed at conducting research between the Federal University of Pará and the company Hydro Alunorte. The proposal consisted of producing synthetic coarse aggregates from bauxite residue (AGS) and their subsequent use in the production of conventional-strength structural concrete. This research refers to the study, which partially addressed the dynamics of the production cycles of synthesized aggregates. For this purpose, the AGS70 and AGS80 coarse aggregates from the third production cycle were used. The percentage discrepancy of residue in the aggregate composition was approximately 10%. Among the results obtained, the analyses of the physical and mechanical properties of the synthetic aggregates stand out. In this context, AGS80 showed a water absorption capacity 24% higher than that of AGS70. The results obtained in the composites with AGS70 and AGS80 aggregates indicated that, at an initial stage, the concrete with AGS80 showed better results regarding physical and mechanical properties.

Keywords: Synthetic Coarse Aggregate. Bauxite Residue. Concrete. Tests. Microstructure. Aggregate Modulus.

RESUMEN

El presente estudio forma parte integral de un amplio proyecto de cooperación para la realización de investigaciones entre la Universidad Federal de Pará y la empresa Hydro Alunorte. La propuesta consistió en la producción de agregados gruesos sintéticos a partir de residuos de bauxita (AGS) y su posterior utilización en la producción de concreto estructural de resistencia convencional. Esta investigación hace referencia al estudio el cual abordó parcialmente la dinámica de los ciclos de producción de agregados sintetizados. Para ello, se emplearon los agregados gruesos AGS70 y AGS80 del tercer ciclo de producción. La discrepancia porcentual del residuo en la composición de los agregados fue de aproximadamente el 10%. Entre los resultados obtenidos, se destacan los análisis de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados sintéticos. En este contexto, el AGS80 presentó una capacidad de absorción de agua un 24% superior a la del AGS70. Los resultados obtenidos en los compuestos con los agregados AGS70 y AGS80 indicaron que, en un primer momento, el concreto con AGS80 presentó mejores resultados en relación con las propiedades físicas y mecánicas.

Palabras clave: Agregado Grueso Sintético. Residuo de Bauxite. Concreto. Ensayos. Microestructura. Módulo del Agregado.



1 INTRODUÇÃO

O resíduo de bauxita, outrora chamado de lama vermelha é obtido através do processo Bayer para refino da bauxita e obtenção de alumina, subproduto do alumínio. Para cada tonelada de alumina produzida, são geradas de 1 a 2 toneladas deste resíduo que contém geralmente óxidos de ferro, titânio, sílica, alumínio residual e outros metais como vanádio, níquel e cromo Miura, Yuuki Silveira (2015) e possui um pH elevado aumentando o risco ambiental M. L. P. Antunes *et al.* (2010). São construídos grandes depósitos de contenção para estocagem deste resíduo. No entanto, esta condição acaba gerando impacto visual e ecológico e também podem degradar paisagens e dificultar a revegetação Miura, Yuuki Silveira (2015).

Pesquisas mostram que algumas alternativas já estão sendo aplicadas para utilizam do resíduo de bauxita com devido tratamento, como técnicas para recuperação e (ou) redução dos impactos visuais e ecológicos de áreas degradadas Miura, Yuuki Silveira (2015). O uso em materiais de construção com tijolos ou blocos de assentamento de alvenarias, cimentos, blocos de pavimentação, agregados graúdos e miúdos para concretos Antunes *et al.* (2010).

A partir dos estudos apresentados por Fernandes, *et al.* (2025), esta pesquisa busca avaliar se a quantidade de teor de resíduo utilizado na produção dos agregados graúdos sintético através do terceiro ciclo de produção, especificamente os AGS70 e AGS80, influenciou nos resultados obtidos a partir dos ensaios de caracterizações físicas, químicos e mecânicos. Assim, como nas propriedades físicas e mecânicas dos concretos de cimento de Portland de resistência normal.

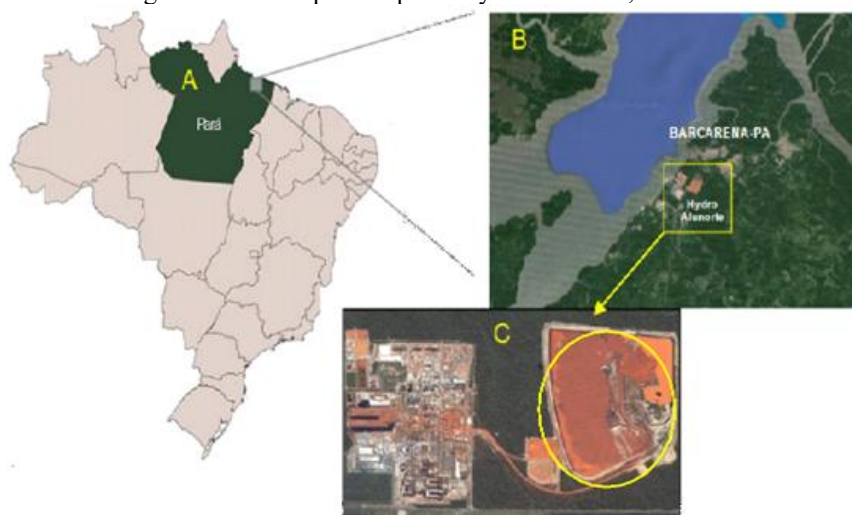
Por conseguinte, este estudo também estabelece uma correlação da influência dos agregados graúdos sintéticos nas resistências mecânicas e no módulo de elasticidade do concreto de cimento Portland com a classe de resistência normal. Esta pesquisa apresenta resultados comparativos de concretos produzidos com estes dois tipos de AGS, analisando seus respectivos desempenhos no estado fresco como consistência, densidade aparente e consumo de cimento. Já no estado endurecido, são analisados aspectos de absorção de água, porosidade, massa específica e módulo de elasticidade estática. No estado da fratura do concreto, são aferidos a resistência à compressão axial, tração diametral e à flexão. Por fim, a interface matriz-agregado é analisada pela microscopia eletrônica de varredura (MEV).

2 METODOLOGIA

O resíduo de bauxita (RB) utilizado na pesquisa é oriundo de depósitos de resíduos sólidos (DRS), com capacidade de armazenar 92,2 Mm³ (mega metros cúbicos) (Souza, *et al.*, 2019), da refinaria da HYDRO Alunorte localizada no Estado do Pará, conforme mostra a Figura 1.



Figura 1 - Localização do depósito de resíduo de bauxita. A e B) Local da Fábrica (Google Maps, 2025) e C) Área de armazenagem de resíduo pela empresa Hydro Alunorte, em Barcarena-PA.



Fonte: Souza, et al., 2019. Adaptado. Autores, 2025.

2.1 MATERIAIS

2.1.1 Resíduo de bauxita

Fernandes *et al.* (2025) enfatizam que a produção do agregado graúdo sintético se deu através da utilização de matérias-primas: argila caulinita, sílica e o resíduo de bauxita (RB), fornecida pela empresa Hydro Alunorte, localizada em Barcarena no estado do Pará e armazenado no Laboratório de Engenharia civil da Universidade Federal do Pará (UFPA), conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 - Armazenamento do resíduo de bauxita no laboratório de Engenharia Civil da UFPA. A) Disposição da forma que o material foi transportado e posteriormente armazenado; B) Aspecto do Resíduo in natura; C) e D) Amostras do AGS70 e AGS80 obtidos no segundo ciclo de produção.



Fonte: Adaptado, Fernandes, et al. (2025).

2.1.2 Agregados

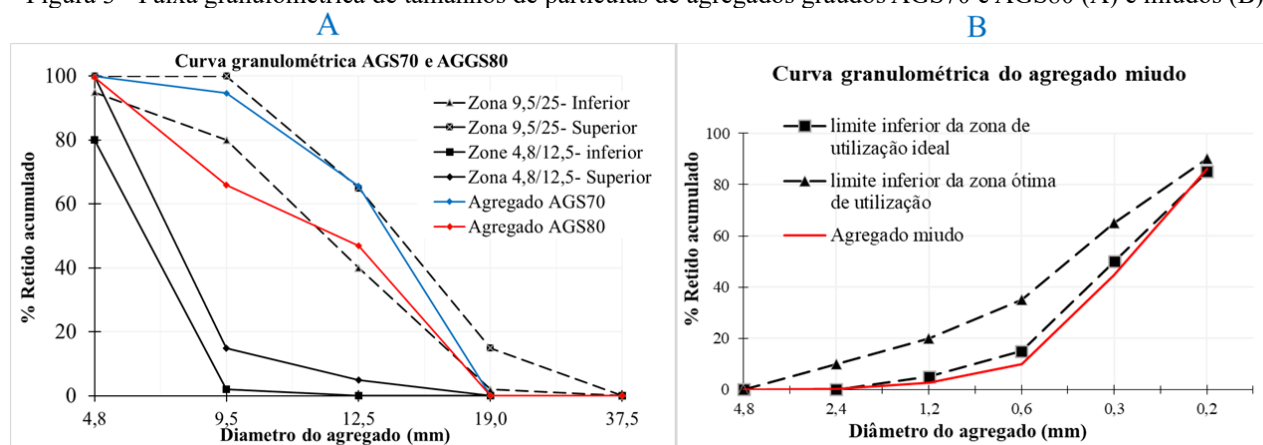
O agregado miúdo utilizado na pesquisa é classificado como um tipo areia natural, proveniente do leito do rio de quartzo da região amazônica, mais especificamente nas proximidades do município de Ourém, no estado do Pará. Foram realizados ensaios de caracterização física do material, cujos resultados indicam uma massa específica de 2,62 g/cm³, massa unitária de 1,61 g/cm³ e uma absorção de água de 1,5%. Por meio do ensaio de granulometria, obteve-se o resultado de módulo de finura de 2,4 e dimensão máxima de 1,18 mm, o que indica que o material é classificado como areia média.



Já o agregado graúdo é do tipo sintético, denominado AGS70 e AGS80 do terceiro ciclo de produção, com percentuais variando entre 70-75% e 80-85% de resíduo bauxita em sua composição respectivamente, fornecido pela empresa Hydro e produzido no laboratório de engenharia química da Universidade Federal do Pará, conforme descrito por Fernandes, *et al.* (2025). Para estes tipos de agregados, também foram realizadas caracterizações físicas, apresentando os resultados de diâmetros máximos de 19,0 mm, massas específicas de 2,21 e 2,26 g/cm³, módulo de finura de 1,95 e 1,84, índices de forma de 2,07 e 2,08. Entretanto, os valores informados para as absorções de água são da ordem de 5,24% e 6,50%, respectivamente Fernandes, *et al.* (2025). Porém, os autores informaram na pesquisa de forma invertida. As temperaturas de sinterização foram fixadas em 1200 °C e os formatos destes agregados graúdos podem ser visualizados na Figura 2-C e 2-D.

Nas Figuras 3.A e 3.B são mostradas as curvas granulométricas do agregado miúdo e dos agregados graúdos AGS70 e AGS80.

Figura 3 - Faixa granulométrica de tamanhos de partículas de agregados graúdos AGS70 e AGS80 (A) e miúdos (B).



Fonte: Adaptado, Fernandes, R.S. et al. (2025).

Pode-se observar facilmente que a distribuição granulométrica da areia se encontra fora do enquadramento entre as faixas da zona inferior utilizável e a zona inferior utilizável ótima. Já as curvas granulométricas dos agregados graúdos sintéticos mostram um enquadramento parcial entre as zonas superior e a inferior da faixa granulométrica das peneiras #4,8-12,5mm. A equivalência das curvas dos agregados graúdos é um aspecto importante, pois foi necessária para evitar a variabilidade granulométrica entre os agregados graúdos a serem utilizados na produção dos compósitos cimentícios.

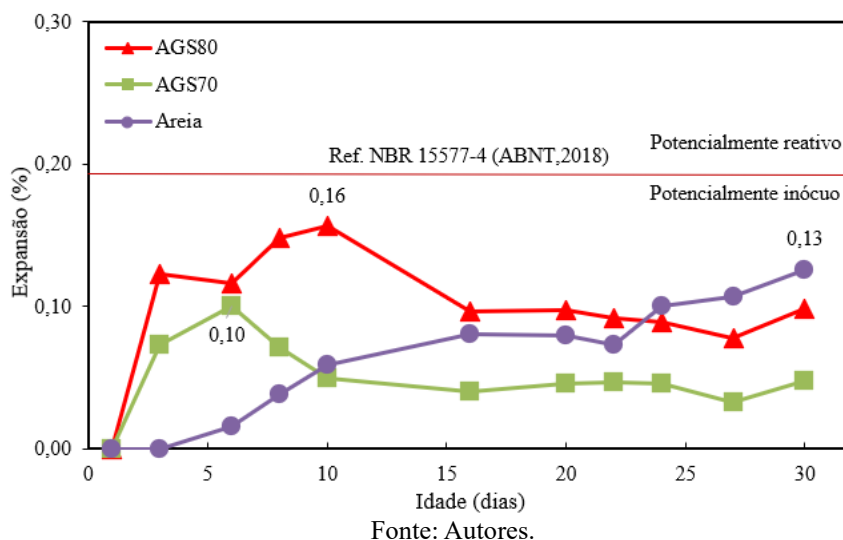
Os agregados graúdos foram submetidos a ensaios mecânicos de abrasão Los Angeles, cujos resultados mostraram uma perda de massa na ordem de 41,06% para o AGS70 e 43,94% para o AGS80. Isso confirma que os agregados sintéticos deste estudo atendem aos requisitos mínimos da NBR 7211, de 2022, para uso em concreto estrutural.

A verificação se estes agregados graúdos sintéticos produzidos em laboratório possuem potencialidade de reatividade em relação aos álcalis do cimento é fundamental para garantir a



integridade e durabilidade dos concretos. Portanto, foram realizados os ensaios de reação álcali-agregado grãos sintéticos (AGS70 e AGS80) e também para os agregados miúdos (areia), conforme demonstrado na Figura 4.

Figura 4 – Resultados dos ensaios de reação álcali agregado da areia, AGS70 e AGS80 conforme NBR 15577-4/2019.



2.1.3 Dosagem e confecção da curva de dosagem

O traço de concreto foi estipulado em 30 MPa aos 28 dias, a partir do diagrama de dosagem (Figura 5) pelo método IBRACON e pelas recomendações da NBR 12655:2022, adotando a classe de agressividade II, conforme a NBR 8953:2015. Para a confecção das curvas de dosagens dos traços, manteve-se o mesmo de argamassa 57%, considerando um concreto para aplicação em superestrutura de edifícios altos por meio de bombeamento. Também não se utilizou nenhum tipo aditivos, a fim de saber de forma direta a influência da porosidade dos agregados grãos na porosidade do concreto. Dessa forma, a classe de consistência foi fixada na S50 por conta da redução da trabalhabilidade através do ensaio de abatimento. A Tabela 1 apresenta os resultados de resistência a compressão dos corpos de prova (CP) na idade de 28 dias para os traços pobre, rico e normal para elaboração das curvas de dosagem, conforme as recomendações do Método IBRACON (Figura 5).

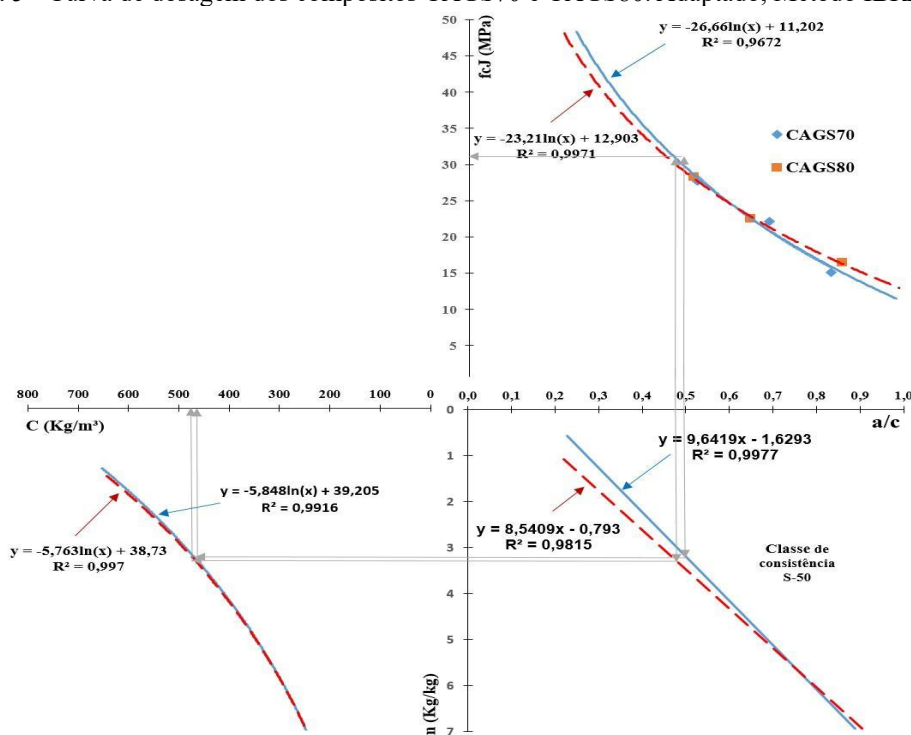
Tabela 1 – Resistências à compressão da confecção da curva de dosagem.

	CLASSE	TRAÇO	a/c	α (%)	Consist. (mm) NBR 7112/2021	fckJ (MPa)	DP	CV
Normal	CAGS70N	1:5,0	0,70	57	S50: $50 \leq A < 100$	22,17	1,03	0,05
	CAGS80N	1:5,0	0,65	57	S50: $50 \leq A < 100$	22,50	1,66	0,07
Pobre	CAGS70P	1:6,5	0,84	57	S50: $50 \leq A < 100$	15,12	0,19	0,01
	CAGS80P	1:6,5	0,86	57	S50: $50 \leq A < 100$	16,45	0,48	0,03
Rico	CAGS70R	1:3,5	0,53	57	S50: $50 \leq A < 100$	27,70	1,27	0,05
	CAGS80R	1:3,5	0,52	57	S50: $50 \leq A < 100$	28,30	2,33	0,08

DP - Desvio padrão; CV - Coeficiente de variação.

Fonte: Autores.

Figura 5 - Curva de dosagem dos compósitos CAGS70 e CAGS80. Adaptado, Método IBRACON.



Fonte: Autores.

2.1.4 Traços unitários extraídos da curva

Os concretos CAGS70 e CAGS80 foram avaliados no estado endurecido por meio de ensaios mecânicos de compressão axial simples nas idades de 7 e 28 dias em corpos de prova cilíndricos de 100x200 mm (Figura 7-B e F); tração por compressão diametral e tração na flexão na idade de 28 dias, em corpos de prova cilíndricos de 100x200 mm (Figura 7-C e D) e em corpos de provas prismáticos de 150x150x500 mm, respectivamente (Figura 7-D e H). O módulo de elasticidade estático é mensurado em corpos de prova cilíndricos, cujas características são apresentadas na Tabela 1. Além disso, foram realizados ensaios de absorção de água e de índice de vazios para correlacionar com as resistências mecânicas dos concretos.



Considerando a necessidade de manter os parâmetros experimentais dentro da mesma faixa de consistência estabelecida pelas curvas de dosagem, a água de amassamento utilizada foi ajustada para os concretos, diferindo da quantidade prevista no traço inicial. É importante ressaltar que tais alterações influenciaram diretamente a relação da água ligante final dos compósitos e suas respectivas propriedades mecânicas. Conforme demonstrado na Tabela 2, são apresentadas as propriedades dos compósitos cimentícios

Tabela 2 – Concepção das misturas dos compósitos estudados.

Tipo de compósito/agregado	Teor de argamassa (%)	Traço unitário	Água ligante (inicial)	Água ligante (final)	Consistência S50 (mm)	Abat. (mm)	Consumo Cimento (Kg/m³)	Massa Concreto (Kg/m³)
CAGS70	57	1:1,39:1,81	0,51	0,61	50-100	66	466	2243,16
CAGS80	57	1:1,37:1,78	0,48	0,55	50-100	57	477	2247,27

Fonte: Autores.

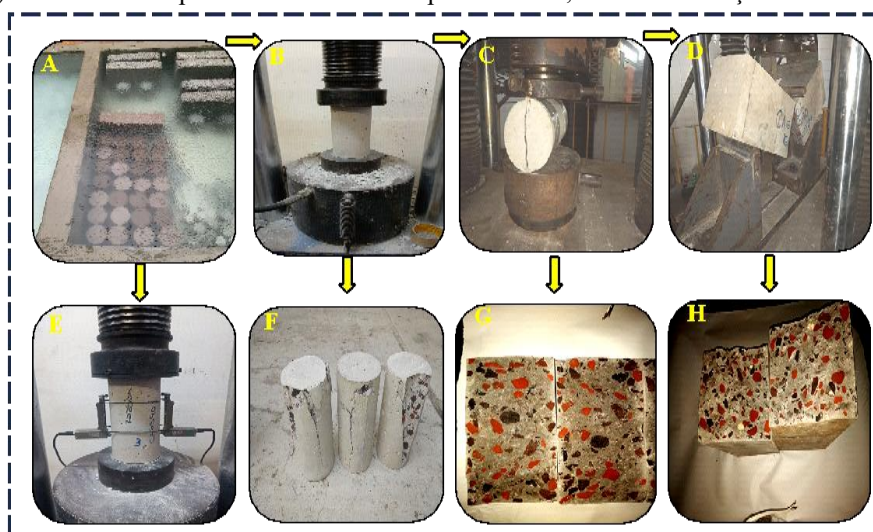
O abatimento do concreto foi estabelecido em uma faixa que varia de 50 mm a 100 mm, conforme a classe de resistência S-50. A resistência à compressão axial, definida neste estudo como 30 MPa (C30), corresponde ao concreto usualmente empregado em obras verticais. A dosagem do concreto foi realizada no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará. A Figura 6 detalha o sequenciamento do processo de dosagem do concreto com o agregado graúdo sintético. A Figura 7, por sua vez, demonstra a cura por imersão das amostras, bem como os ensaios mecânicos e o módulo de elasticidade estático.

Figura 6 - Sequenciamento da dosagem e moldagem. A) Materiais para dosagem; B e C) Misturas dos agregados na betoneira; D) ensaio de consistência do concreto; E) e F) Moldagem dos corpos de provas cilíndricos e prismáticos; G) detalhe do concreto para análise da massa específica aparente



Fonte: Fernandes, et al. (2025).

Figura 7 - Sequenciamento dos ensaios de resistência mecânica do CAGS. A) Cura imersa; B) Ensaio de compressão axial; C) Ensaio de tração por compressão diametral; D) Ensaio de tração na flexão; E) Ensaio de módulo de elasticidade estático; F/ G/ H) Detalhe do rompimento do CP's à compressão axial, diametral e tração na flexão, respectivamente.



Fonte: Adaptado, Fernandes, et al. (2025).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO TEOR DE RESÍDUO NOS AGREGADOS SINTÉTICOS AGS70 E AGS80 EM RELAÇÃO AS SUAS PROPRIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS E MECÂNICAS

Os resultados encontrados para agregados graúdos AGS70 e AGS80 do terceiro ciclo produzido em forno abafado em temperatura controlada em 1200 °C, foram considerados excelentes por apresentarem massa específica normal, acima de 2,0 g/cm³. Além disso, destaca-se que na maioria dos estudos empregados como fundamento para esta pesquisa, a geração de amostras ocorreu em temperaturas de queima superiores a 1200 °C, utilizando-se fornos abafados para a produção dos agregados graúdos sintéticos.

Tuan *et al.* (2013) diz respeito que à temperatura de queima desempenha um papel fundamental no controle da capacidade de absorção de água. Isso ocorre porque a sinterização da mistura promove a densificação das partículas, reduzindo a entrada de água na matriz do agregado. O alto índice de porosidade do agregado está diretamente relacionado à sua capacidade de absorção de água e quanto maior for a porosidade do material, maior será sua capacidade de absorção de água. As amostras foram testadas apresentaram taxas de absorção entre 5,59% e 6,50%. Portanto, os agregados atendem aos limites estabelecidos pela norma NBR 7211 (2022).

De acordo com Borba e Santos (2021), o índice de forma dos grãos de agregado graúdo indica o quanto eles se assemelham a um cubo. A NBR 7211 (2022) afirma que o índice de forma de um agregado graúdo, determinado segundo a NBR 7809 (2016), não deve ser superior a 3, permitindo agregados com formato lamelar. Os resultados de índices de forma das amostras ficaram abaixo do limite regulamentar, atendendo, assim, aos padrões exigidos.



Importante notar que os agregados altamente porosos são tipicamente mais frágeis, tornando-os inadequados para a produção de concreto estrutural. Os resultados médios do índice de abrasão de Los Angeles, realizado conforme a norma NM 51 (2001), em que as amostras analisadas apresentaram resistência à abrasão para o AGS70 de 41,06% e para o AGS80 de 43,94%, mostram que esses índices são considerados satisfatórios, uma vez que a NBR 7211 (2022) estipula que o percentual de perda de massa deve ser inferior a 50%. Vale ressaltar que quanto maior for a absorção de água dos agregados, maior a perda de massa pelo ensaio de abrasão.

Foram realizados um teste de durabilidade através do ensaio de reação de agregados alcalinos estabelecidos pela NBR 15577-4 (2018) para avaliar qualitativamente a condição dos agregados. Os resultados indicaram que os agregados sintéticos não apresentam potencial de reatividade com os álcalis do cimento estudado, ou seja, são inertes.

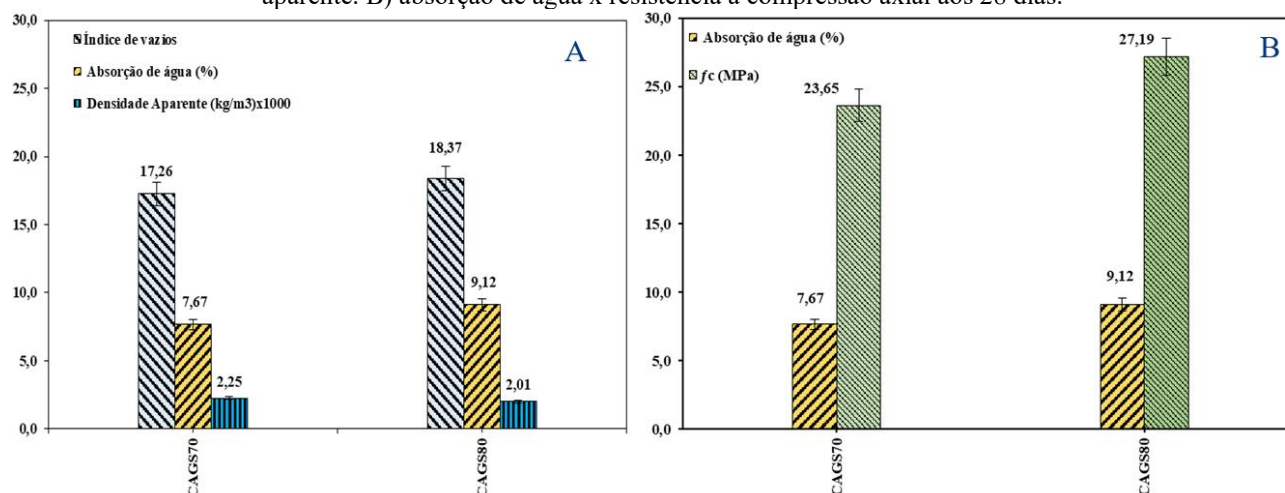
3.2 INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO CONCRETO NAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO AXIAL DOS CONCRETOS CAGS70 E CAGS80

A Figura 8-A mostra o gráfico da relação entre a absorção de água, índice de vazios e a massa específica aparente dos concretos com agregados graúdos sintéticos. Ao se analisar o espectro da porosidade existente dos concretos na idade de 28 dias, observa-se que o CAGS70 possui menor porosidade que o CAGS80, conforme os resultados dos ensaios de índice de vazios e absorção de água. Nesta condição, inicialmente poderia se dizer que o CAGS70 apresenta melhor desempenho de durabilidade física que o CAGS80. Porém, através das informações contidas na Tabela 2, observa-se que o índice de água ligante final no CAGS70 é maior que o CAGS80 e que o abatimento foi de 66 mm e 57 mm, respectivamente. Podendo, assim, trazer a compreensão de que ambos os concretos ficam enquadrados na mesma faixa de porosidade, ocasionando uma equivalência entre os mesmos.

Conforme o exposto por Rossignolo (2009, p. 25), um elevado índice de absorção de água no agregado pode ocasionar danos no concreto em seu estado endurecido. No entanto, a alta capacidade de absorção de água pelo agregado pode proporcionar benefícios, como a melhoria das propriedades da zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento, resultando na redução do "efeito parede". Outra situação a destacar é que os resultados demonstraram que as massas específicas aparentes dos compósitos CAGS70 e CAGS80 são 2250 kg/m³ e 2001 kg/m³, respectivamente. Isso reafirma que o AGS80 é menos denso que o AGS70, pois é mais poroso devido ao maior teor de bauxita na sua composição. Isso pode demonstrar que o CAGS80, por ser mais poroso, acarretou maior quantidade de vazios, dessa forma menos denso.



Figura 8 – Propriedades físicas e mecânicas dos concretos estudados. A) Índice de vazios x absorção de água x densidade aparente. B) absorção de água x resistência à compressão axial aos 28 dias.



Fonte: Autores.

A porosidade do agregado graúdo é um fator que pode afetar as propriedades reológicas e mecânicas dos concretos estruturais, assim como o módulo de elasticidade do concreto. A Figura 8 mostra o gráfico que relaciona a absorção de água e a resistência mecânica à compressão axial do CAGS70 e CAGS80 na idade de 28 dias, onde o CAGS80 apresenta maior porosidade, na ordem de 18% superior ao CAGS70. Contudo, ao se observar a resistência à compressão aos 28 dias, nota-se que, mesmo que o CAGS80 possua maior porosidade e maior absorção de água que o CAGS70, ainda sim também apresenta maior resistência, em uma proporção de 15% maior. Portanto, infere-se que as condicionantes de porosidade e absorção de água, quando analisados individualmente, não exercem direta influência na compressão axial dos compósitos objeto desta pesquisa.

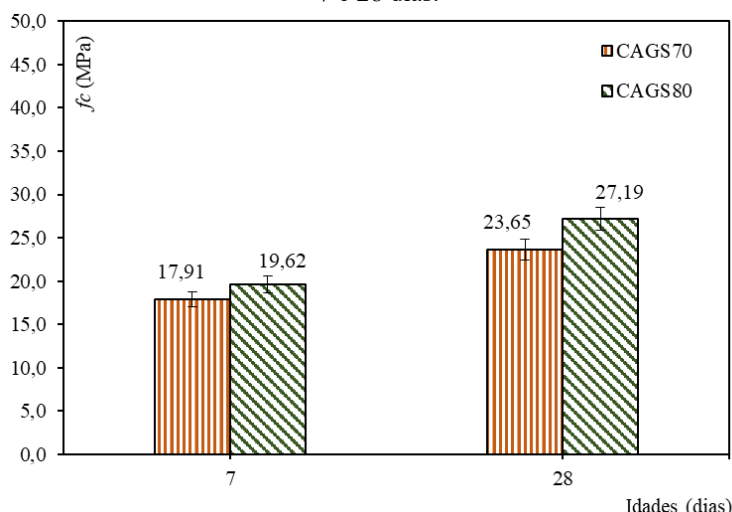
3.3 ANÁLISE DAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO AXIAL E MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS CONCRETOS CAGS70 E CAGS80

O gráfico de resistência à compressão, ilustrado na Figura 9, indica que ambos os compósitos apresentaram um aumento gradual nas resistências ao longo do tempo na idade de 7 e 28 dias.

Na idade final do ensaio (28 dias), os resultados obtidos indicaram que o CAGS80 apresentou resistência à compressão axial 15% maior que o CAGS70. Entretanto, ao relacionar o traço experimental extraído da curva de dosagem para idade de 28 dias, estimado em 30 MPa, percebe-se que o lote produzido de corpos de prova inicialmente não atenderia ao requisito de resistência preestabelecido nesta idade. No entanto, mesmo que as resistências dos concretos estudados estejam menores que as estipuladas nos traços das curvas de dosagem, é importante ressaltar que estes concretos ficaram enquadrados dentro da classe de agressividade estabelecida na NBR 12655:2022.



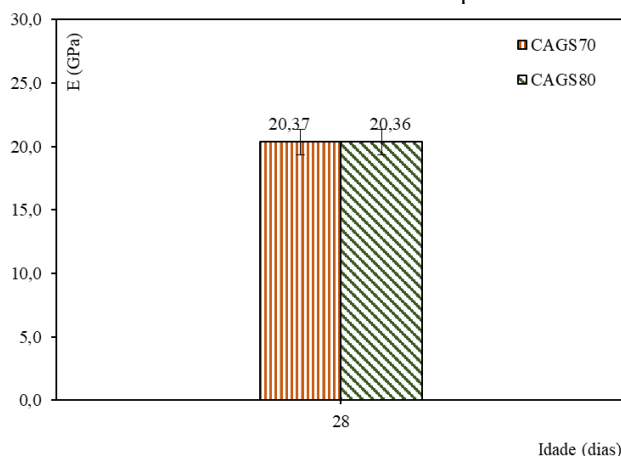
Figura 9 - Gráfico do mapeamento da resistência à compressão axial dos compósitos CAGS70 e CAGS80 para as idades 7 e 28 dias.



Fonte: Autores.

Alguns aspectos em que os agregados graúdos podem ter contribuído nos resultados obtidos, remetem à reflexão que o AGS80 possui maior perda a abrasão e maior absorção de água que o AGS70. Contudo, o CAGS80, mesmo possuindo maior porosidade/absorção de água e menor massa específica aparente que o CAGS70, este, no entanto, obteve maiores resistências à compressão axial nas idades estudadas. O que remete à seguinte conclusão: que, por se tratarem de concretos de resistências normais, as propriedades físicas de porosidade e dureza superficial não são fatores principais para resistência à compressão, e sim a relação água-ligante, caso os demais parâmetros reológicos forem equivalentes, pois para o CAGS70 foi utilizada a relação 0,61 e para o CAGS80 0,55.

Figura 10 – Gráfico do módulo de elasticidade dos compósitos CAGS70 e CAGS80.



Fonte: Autores.

Conforme a NBR 6118, 2023, a deformação elástica do concreto depende da composição do traço do concreto, especialmente da natureza dos agregados. De acordo com Mehta e Monteiro (2014, p. 24), o módulo de elasticidade e a resistência à compressão do concreto são duas propriedades que evoluem de formas distintas ao longo do tempo. Considerando os resultados obtidos na idade de 28

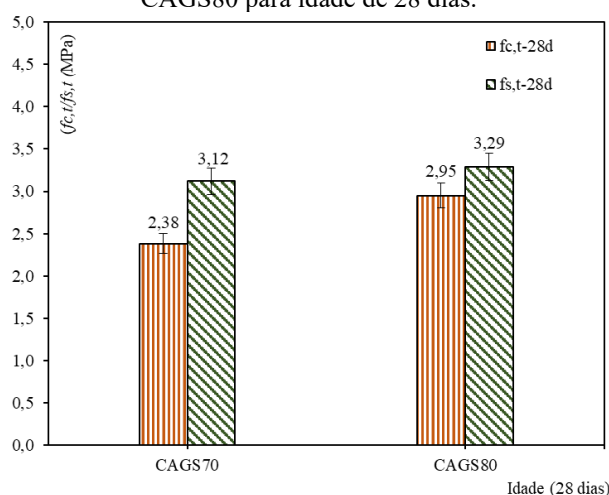


dias dos módulos de elasticidade do CAGS70 e CAGS80 são praticamente iguais, portanto, não havendo variação intrínseca na microestrutura desse tipo de concreto, quando alterado o percentual de resíduo na composição do agregado graúdo. Levando-se em consideração os apontamentos de Rossignolo (2009), que afirma que, para concretos de massa específica normal, com valores de resistência à compressão axial variam entre 20 a 50 mega pascal (MPa), o valor do módulo de deformação pode variar, em geral, entre 50% e 80% do valor obtido.

3.4 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL E TRAÇÃO NA FLEXÃO

A Figura 11 apresenta um comparativo dos resultados obtidos a partir dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e por tração na flexão, realizados aos 28 dias, para os compósitos CAGS70 e CAGS80. Houve variações significativas das respostas obtidas entre os ensaios supracitados para os compósitos CAGS70 e CAGS80. Mas ao se analisar os resultados de compressão axial e de tração por compressão diametral para os compósitos CAGS70 e CAGS80, entendendo-se que a resistência à tração de ambos foi equivalente a 10% da resistência à compressão axial. Diante do exposto, infere-se que os resultados se encontram conforme os parâmetros normativos estabelecidos para concretos de resistência padrão. Essa hipótese é corroborada pela revisão sistemática de Junior, Costa e Macedo (2022), que citam os resultados da resistência à tração por compressão diametral dos trabalhos de Rosário (2013) e Souza (2010).

Figura 11 – Gráfico da relação entre a resistência da tração indireta com a tração na flexão dos compósitos CAGS70 e CAGS80 para idade de 28 dias.



Fonte: Autores.

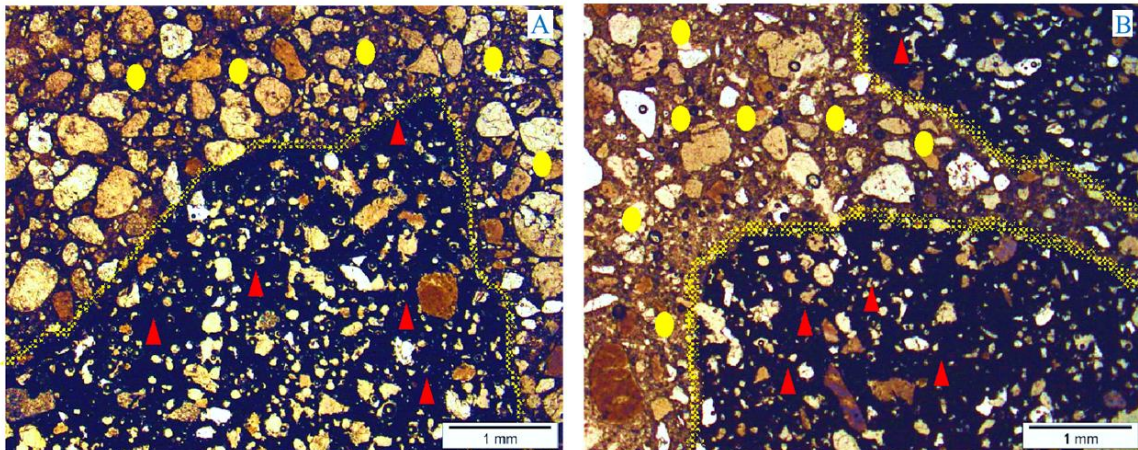
3.5 ANÁLISE DA MICROESTRUTURA DO CONCRETO FRATURADO POR MICROSCÓPIO ÓPTICO E ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV)

Visando analisar a microestrutura das matrizes e das zonas de transição dos concretos com agregado graúdo sintético, foram obtidas imagens por meio da utilização de microscópio óptico (Figura



12) e microscópio eletrônico de varredura (MEV) (Figuras 13) em amostras de corpos de prova de concretos fraturados no ensaio de tração por compressão diametral na idade de 28 dias. A preparação das amostras foi realizada por meio de fragmentação em tamanhos apropriados. Em seguida, as amostras foram submetidas à secagem em estufa a uma temperatura de 100 °C por um período de 24 horas. Por fim, foi realizado o polimento em lâminas.

Figura 12 - Imagem obtida por microscópio óptico em luz polarizada da microestrutura da zona de transição do compósito. A) CAGS70; B) CAGS80.



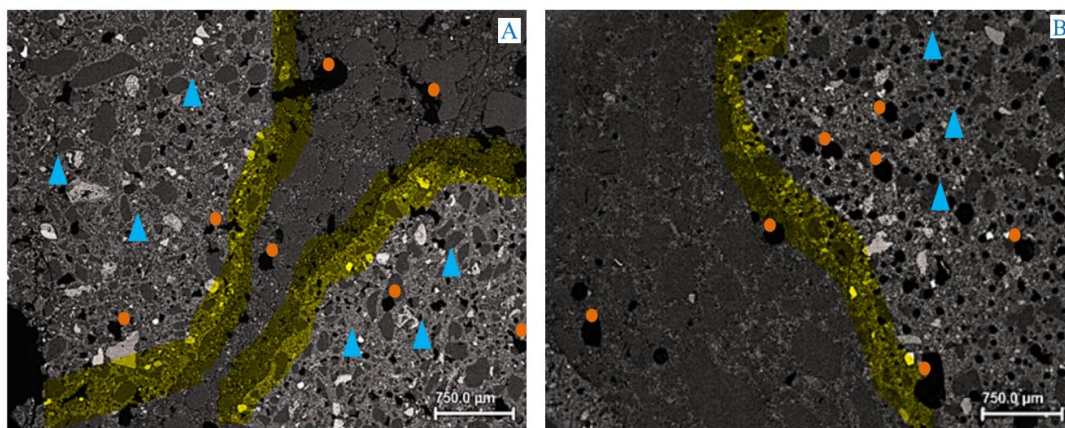
Legenda: delimitação da zona de transição; ▲ Agregado graúdo (fase dispersa); ● Argamassa (matriz cimentícia).

Fonte: Autores.

De acordo com Isaia *et al.* (2007), a zona de contato corresponde à relação entre os grãos dos agregados graúdos e miúdos que se fundem com a pasta de cimento, circundando e separando os agregados. Tal processo resulta na formação de filmes de água em torno dos grãos, gerando uma camada mais fraca na interface. De acordo com Neville (1997, p. 6), essa zona de transição apresenta maior porosidade e, conseqüentemente, menor resistência.

As análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas no microscópio modelo LS15 EVO da Zeiss, equipado com o sistema Lamin-Be. As lâminas foram metalizadas com uma película de ouro para obter imagens de elétron retroespalhado (Backscattered Electron - BSE).

Figura 13 - Imagens obtidas por (MEV). A) CAGS70; B) CAGS80.



Legenda: ■ Delimitação da zona de transição; ■ Fissuras; ▲ Agregado gráudo (agregado gráudo sintético); ● Poros no agregado gráudo e argamassa cimentícia).

Fonte: Autores.

A Figura 12 destaca a separação através da zona de transição da matriz cimentícia dos compósitos com fase dispersa e os agregados gráudos. Além disso, é possível observar o detalhe do agregado gráudo sintético em relação à distribuição dos grãos de sílica, simbolizados pelos pontos brancos no resíduo de bauxita, representado por toda a área escura.

A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi crucial para verificar a delimitação das fases matriz e dispersa por meio das zonas dos compósitos CAGS70 e CAGS80, assim como das fissuras e poros existentes, conforme demonstrado na Figura 13.

Não foram observadas nas imagens obtidas pelo MEV a ocorrência de macro fraturas na matriz cimentícia, tanto na amostra de CAGS70 quanto na de CAGS80. No entanto, a literatura especializada, diz que para concreto de resistência normal as fraturas tendem a ocorrer na argamassa e na zona de transição.

Conforme observado na Figura 13, a maior quantidade de poros existentes no AGS80 foi um fator que contribuiu significativamente para a absorção de água de amassamento e consequentemente, tal fator ocasionou um incremento na relação da água ligante.

4 CONCLUSÃO

Os resultados desta pesquisa permitem concluir que a variação do percentual de resíduo de bauxita na produção dos agregados gráudos sintéticos (AGS70 e AGS80) influenciou nas propriedades físicas e mecânicas dos agregados e dos concretos por eles produzidos. Ambos os agregados atenderam aos requisitos normativos da NBR 7211 (2022), apresentando índices de forma menor que 3 e resistência à abrasão dentro do limite estabelecido de 50%. Além disso, não apresentaram potencial de reação álcali-agregado.

No que se refere à porosidade dos agregados, observou-se que o AGS80 apresentou maior índice de vazios e absorção de água (6,50%) em comparação ao AGS70 (5,24%). Esse comportamento

normalmente indicaria um compósito menos denso e, portanto, com desempenho mecânico inferior. Entretanto, os resultados mostraram que a maior porosidade do AGS80 não comprometeu significativamente o comportamento estrutural do concreto, demonstrando que outros fatores tiveram influência mais determinante na resistência.

Dessa forma, conclui-se que tanto o AGS70, com cerca de 70 a 75% na sua composição de rejeito de bauxita, quanto o AGS80, com cerca de 80 a 85% na sua composição de rejeito de bauxita, são alternativas viáveis para a produção de concreto estrutural de classe C30, sendo que o AGS80, mesmo mais poroso, demonstrou melhor desempenho mecânico geral, configurando-se como a opção mais promissora para futuras aplicações comerciais, já que para sua produção o consumo de bauxita é maior que o AGS70.



REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7211 (2022). Agregados para concreto – Requisitos.: ABNT, 2022.

OLIVEIRA E ROSSI. Concretes with red mud coarse aggregates. Materials Research, v. 15, n. 3, p. 333–340, maio: ABNT, 2012.

WEIZENMANN, R.N., 2017. Estudo sobre a influência da variação da dimensão Máxima característica do agregado graúdo sobre o Módulo de elasticidade do concreto. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Universitário UNIVATES. 2017.

SOUZA, P. H. R., ARRAES, L. A. X., MARQUES, M. S. P., & SANTOS, J. C. M., (2019). Utilização da lama vermelha para a produção de agregado sintético. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, 6(3), 30-43.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE. DNIT 446. Agregado - Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou magnésio - Método de ensaio: 2024-ME.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER 037. Agregado graúdo para concreto de cimento: 1997-ME.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 1900 (2009). Água para amassamento do concreto. Parte 1: Requisitos. ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 16697. Cimento Portland — Requisitos. ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7182 (2025). Solos — Ensaio de compactação. ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5739 (2007). Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 8802. Concreto endurecido - determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto. ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655. Concreto de cimento Portland - preparo, controle, recebimento e aceitação – procedimento. ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 8953 Concreto para fins estruturais - classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 12655. concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - parte 1: Módulos estáticos à compressão: ABNT, 2022.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7222. Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 12142. Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos: ABNT, 2010.

FERNANDES, R.S. et al, 2025. Use Of Mining Waste for The Production of Coarse Aggregate for Concrete Manufacturing. IOSR Journal of Business and Management (IOSR-JBM). Volume 27, Issue 2. Ser. 5 (February. 2025), PP 09-22.

JUNIOR, A.J.P.C.; COSTA, D. C. L.; MACEDO, A.N. Análise sistemática da Literatura sobre o uso de lama vermelha para a produção de agregados sintéticos leve. Revista Research, Society and Development, V. 11, n.5.2022.

MEHTA PK, MONTEIRO PJM. Concreto: microestruturas, propriedades e materiais. 2. Ed. São Paulo: Nicole Pagan Hasparyk; 2014.

NEVILLE, A.M, , Propriedades do concreto. Tradução de Salvador E. Giammusso. 2ª edição, Ed. PINI, Brasil. 1997.

ROSSIGNOLO, J. A. Concreto leve estrutural: Produção, propriedades, microestrutura e aplicações. PINI, 2009.

SAIA, G. E. et al. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais, Revista IBRACON, 2007.

SANTOS, D. H., DALMEIDA, A. P., FIGUEIREDO, W. B., VALENTE, A. L., & SOUZA, J. A. S. Utilização do rejeito do processo de Bayer como matéria prima na produção de agregados leves. In: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Florianópolis, SC, Brasil, 2014.

SOUZA, J. Estudo e avaliação do uso de resíduos do processo Bayer como matéria prima na produção de agregados sintéticos para a construção civil. Tese (Doutorado). - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil, 2010.

