



Robson da Silva Fernandes

**Agregado Graúdo Sintético de Resíduo de
Mineração: Produção e Avaliação da
Viabilidade da Otimização em Concretos
Estruturais de Cimento Portland.**

TESE DE DOUTORADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Tese orientada pelo Professor Dr. Marcelo de Souza Picanço

Belém – Pará – Brasil
2025

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Robson da Silva Fernandes

**Agregado Graúdo Sintético de Resíduo de Mineração:
Produção e Avaliação da Viabilidade da Otimização em
Concretos Estruturais de Cimento Portland.**

Defesa de Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Engenharia Civil da Universidade Federal do
Pará como requisito parcial para obtenção do título
de doutor em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de
Souza Picanço

Belém- PA.
Março de 2025.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Robson da Silva Fernandes

TÍTULO: Agregado Graúdo Sintético de Resíduo de Mineração: Produção e Avaliação da Viabilidade da Otimização em Concretos Estruturais de Cimento Portland.

GRAU: Doutor ANO: 2025

É concedida à Universidade Federal do Pará permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Robson da Silva Fernandes
Av. Augusto Correa, nº 1, Campus Universitário do
Guamá, Laboratório de Engenharia Civil, Belém,
Pará. CEP 66.075-970

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

da Silva Fernandes, Robson.
Agregado Graúdo Sintético de Resíduo de Mineração:
Produção e Avaliação da Viabilidade da Otimização em Concretos
Estruturais de Cimento Portland / Robson da Silva Fernandes. —
2025.

140 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil,
Belém, 2025.

1. Agregado graúdo. 2. Resíduo de bauxita. 3. concreto. 4.
ensaios. 5. Inventário de ciclo de vida. I. Título.

CDD 620.191



**AGREGADO GRAÚDO SINTÉTICO DE RESÍDUO DE MINERAÇÃO:
PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DA OTIMIZAÇÃO
EM CONCRETOS ESTRUTURAIS DE CIMENTO PORTLAND**

AUTOR:

ROBSON DA SILVA FERNANDES

TESE SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 27 / 03 / 2025.

Documento assinado digitalmente
gov.br MARCELO DE SOUZA PICANÇO
Data: 09/04/2025 23:01:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
gov.br MATEUS ANTONIO NOGUEIRA OLIVEIRA
Data: 09/04/2025 19:33:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Orientador (UFPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br AEDJOTA MATOS DE JESUS
Data: 08/04/2025 19:31:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Mateus Antônio Nogueira Oliveira
Membro Externo (UFMG)

Documento assinado digitalmente
gov.br RODRIGO RODRIGUES DA CUNHA
Data: 08/04/2025 14:29:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Aedjota Matos de Jesus
Membro Externo (UNIR)

Documento assinado digitalmente
gov.br JOAO CARLOS LISBOA DE LIMA
Data: 08/04/2025 21:37:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rodrigo Rodrigues da Cunha
Membro Externo (IFPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br LUCIANA DE NAZARE PINHEIRO CORDEIRO
Data: 09/04/2025 15:30:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng. Dr. João Carlos Lisboa de Lima
Membro Externo (UFPA)

Profa. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro
Membro Interno (UFPA)

Visto:

Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

Esta tese é dedicada acima de tudo ao Senhor Jesus,
pois Ele é digno de toda honra, toda glória e todo louvor.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço à Deus, sem hipocrisia, pois antes mesmo que eu ingressasse no doutorado, por sua Misericórdia, ouviu o meu clamor e me garantiu a vitória pela qual contemplei pelos olhos da fé e agora dou testemunho. À toda minha família, representada pelos meus pais, José Fernandes e Sueli Fernandes, minha esposa Katiane Fernandes e meus filhos, Rhonnan Fernandes e Ryan Fernandes. À Igreja de Jesus, onde referencio a minha Congregação Assembleia de Deus Templo do Atalaia.

Ao Prof. Marcelo Picanço pela orientação, parceria e ensinamentos durante toda a pesquisa.

Ao Professores Alcebíades Negrão Macedo, Mike Pereira, João Carlos, Aedjota Matos, Luciana Cordeiro, Mateus Nogueira pelas contribuições na pesquisa.

Ao Prof. Dênio Raman e Prof. Adelson pela convivência e ensinamento durante estes anos de convívio na pós graduação.

Ao GAEMA por proporcionar desenvolver diversas atividades de pesquisa e trabalhos técnicos durante o período de estudos no Doutorado.

Aos Laboratório de Engenharia Civil da UFPA pela concessão da utilização do laboratório para os ensaios pertinentes à Pesquisa, de Engenharia Química da UFPA pela produção do agregado graúdo sintético. Laboratório de análise do CPRM pela realização de algumas análises de amostras de concreto. Laboratório de análise da UNIFESP e ao Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI) da Universidade de Goiás pelos ensaios de caracterização de resíduo de bauxita.

Aos profissionais da empresa TOTALMIX, representada pelo amigo e professor Rodrigo Rodrigues e engenheiro José Luís, pela ajuda na realização de alguns ensaios. Também aos amigos que convivi na SEPLAD e SEDUC.

Aos alunos bolsistas do Laboratório de Engenharia Civil que me ajudaram durante os ensaios realizados da Pesquisa e ao laboratorista da UFPA, Joel pela ajuda.

Aos alunos de graduação, mestrado e doutorado que participaram deste projeto de pesquisa da HYDRO- UFPA, destacando Luciano, Renan, Adriana, Carlos, Jefferson, Lucas, Marcela, Vinícius Machado, Vinícius do Carmo, Matheus Cunha, Luís Brandão, Marcelo Farias, Adonay Sarraty.

Aos professores do Projeto da HYDRO, pela UFPA Bruno Viegas e José Antônio da Silva Souza e pela HYDRO, Marcelo Montini.

“Buscai primeiro o reino de Deus e a sua justiça,
e todas as demais coisas vos serão acrescentadas.”
(Mateus 6:33)

RESUMO

FERNANDES, R.S. **Synthetic Mining Waste Aggregate: Production and Evaluation of the Feasibility of Optimization in Portland Cement Structural Concrete.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém- Pa, 2025.

A indústria da mineração gera um volume expressivo de resíduos em sua cadeia produtiva de beneficiamento do minério. Nesse contexto, a transformação de resíduos de mineração, especificamente o resíduo de bauxita, por meio do processo de sinterização em agregados graúdos, passa a ser uma alternativa viável e sustentável para a utilização desse resíduo gerado dentro da cadeia produtiva da alumina. O presente estudo objetivou, em sua esfera principal, o desenvolvimento de agregados graúdos sintetizados, de modo a atender às exigências da norma brasileira de agregados para concreto (NBR 7211, 2022). Dessa maneira, o processo de produção foi submetido a uma etapa preliminar e três ciclos de otimização, nos quais foram realizadas as seguintes caracterizações: composição química, massa específica, granulometria, índice de forma, absorção de água, resistências mecânicas e durabilidade. Os agregados mais apropriados para emprego em concreto estruturais são os do terceiro ciclo de produção, designados AGS70, AGS80 e AGS90. Quanto a análise das propriedades físicas dos concretos, foi constatado que o CAGS apresenta a maior porcentagem de porosidade em comparação com o CAGN. A condição em questão está diretamente relacionada à maior porosidade do AGS em relação ao agregado natural, o que resulta em uma maior absorção de água e um índice de vazios mais elevado no AGS. A análise da microestrutura do concreto por microscopia eletrônica de varredura permitiu uma visualização mais precisa dos vazios presentes nos agregados, contribuindo para uma melhor compreensão do material. Para os dois compósitos analisados, no que diz respeito às propriedades mecânicas, foram consideradas as idades iniciais de 7 e 28 dias, bem como as idades um pouco mais avançadas de 91 e 277 dias. Dessa forma, observou-se que os resultados obtidos são equivalentes para a compressão axial. Nesse sentido, é importante destacar que, aos 28 dias, as resistências foram de 29,70 MPa e 29,87 MPa, respectivamente. Ademais, para a idade de 91 dias, o módulo de elasticidade apresentou resistência de 22,38 GPa e 22,54 GPa, e, na tração por compressão diametral aos 28 dias, as respectivas resistências foram de 2,25 MPa e 2,42 MPa. Foi realizado um estudo comparativo quantitativo, com o objetivo de avaliar os impactos ambientais associados à produção e ao transporte. O estudo simulou a produção de uma tonelada de AGS, seixo rolado e brita, utilizando para isso o inventário de ciclo de vida. Os resultados da pesquisa indicam que os três tipos de agregados graúdos de resíduo de bauxita utilizados apresentaram melhores desempenhos ambientais nas três categorias analisadas em comparação com o seixo e a brita, com reduções superiores a 95% em uma dessas categorias. Palavras-chave: resíduos de bauxita, agregado, concreto, ciclo de vida.

ABSTRACT

FERNANDES, R.S. **Synthetic Mining Waste Aggregate: Production and Evaluation of the Feasibility of Use in Portland Cement Structural Concrete.** Doctoral thesis. Postgraduate Program in Civil Engineering. Federal University of Pará. Belém- Pa, 2025.

The mining industry generates a significant volume of waste in its ore processing production chain. In this context, the transformation of mining waste, specifically bauxite waste, through the sintering process into coarse aggregates becomes a viable and sustainable alternative for the use of this waste generated within the alumina production chain. The main aim of this study was to develop synthesized coarse aggregates in order to meet the requirements of the Brazilian standard for concrete aggregates. In this way, the production process was subjected to a preliminary stage and three optimization cycles, in which the following characterizations were carried out: chemical composition, specific mass, granulometry, shape index, water absorption, mechanical strength and durability. The most suitable aggregates for use in structural concrete are those from the third production cycle, known as AGS70, AGS80 and AGS90. When analyzing the physical properties of the concretes, it was found that the SGA had the highest percentage of porosity compared to the NGA. This condition is directly related to the greater porosity of the SFA compared to the natural aggregate, which results in greater water absorption and a higher void ratio in the SFA. Analysis of the concrete's microstructure using scanning electron microscopy enabled more precise visualization of the voids present in the aggregates, contributing to a better understanding of the material. For the two composites analyzed, as far as mechanical properties are concerned, the initial ages of 7 and 28 days were considered, as well as the slightly more advanced ages of 91 and 277 days. The results obtained were therefore equivalent for axial compression. In this sense, it is important to note that, at 28 days, the strengths were 29.70 MPa and 29.87 MPa, respectively. In addition, at 91 days, the modulus of elasticity showed strengths of 22.38 GPa and 22.54 GPa, and in tensile diametral compression at 28 days, the respective strengths were 2.25 MPa and 2.42 MPa. A quantitative comparative study was carried out to assess the environmental impacts associated with production and transportation. The study simulated the production of one ton of AGS, rolled pebbles and gravel, using a life cycle inventory. The results of the research indicate that the three types of bauxite residue aggregates used had better environmental performance in the three categories analyzed compared to pebbles and gravel, with reductions of more than 95% in one of these categories.

Keywords: bauxite residue, aggregate, concrete, life cycle.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Fluxograma das macros etapas da pesquisa referente ao artigo 1.....	18
Figura 2 –	Fluxograma das macros etapas da pesquisa referente ao artigo 2.....	19
Figura 3 –	Fluxograma das macros etapas da pesquisa referente ao artigo 3.....	20
Figura 4 –	Principais Reservas Mundiais de Alumínio.....	21
Figura 5 –	Vista de satélite da Alunorte e do rio Pará.....	22
Figura 6 –	Bauxita: matéria-prima do alumínio.....	23
Figura 7 –	Fluxograma e esquema do processo Bayer.....	24
Figura 8 –	Aparência dos agregados após a queima.....	28
Figura 9 –	Resíduo de bauxita, areia, argila e carvão vegetal.....	29
Figura 10 –	Agregado Sintético.....	29
Figura 11 –	DRX das amostras LV- 40, LV- 45, LV-50, LV- 60 após sinterização.....	30
Figura 12 –	Formação de pelotas das misturas na betoneira.....	31
Figura 13 –	Depósito de seixos de quartzo.....	32
Figura 14 –	Aparência dos agregados sintéticos peletizados após a sinterização.....	39
Figura 15 –	Padrão de difração de raios X das amostras C1, C4 e C15.....	41
Figura 16 –	Camada de solo arenoso com matéria orgânica (top soil).....	43
Figura 17 –	Amostras do primeiro estágio do processo de produção do AGS.....	44
Figura 18 –	Amostras do segundo estágio do processo de produção do AGS.....	45
Figura 19 –	Amostras do segundo estágio do processo de produção do AGS.....	46
Figura 20 –	Distribuição granulométrica das amostras do segundo e terceiro ciclos de produção.....	48
Figura 21 –	Exemplo de não conformidade na amostra AGS90.....	49
Figura 22 –	Massas específicas médias das amostras ensaiadas.....	50
Figura 23 –	Massa unitária média das amostras ensaiadas.....	50
Figura 24 –	Resultados médios dos testes de absorção de água.....	51
Figura 25 –	Resultados médios da quantidade material fino passante na peneira de 75 μ m por lavagem.....	52
Figura 26 –	Resultados médios de torrões argila e materiais friáveis presentes nas amostras.....	52
Figura 27 –	Resultados dos ensaios de índice e forma dos agregados graúdos pelo método do paquímetro.....	53
Figura 28 –	Resultados dos Índices médios de desgaste por abrasão Los Angeles.....	53
Figura 29 –	Resultados dos testes de reação álcali-agregado pelo método acelerado.....	55
Figura 30 –	Ensaio de avaliação de durabilidade do AGS90 de terceiro ciclo de produção.....	55
Figura 31 –	Resultados dos ensaios de durabilidade do agregado de acordo com a DNIT 446/2024-ME.....	56
Figura 32 –	Identificação mineral do agregado sintético AGS90 por difração de raios X.....	56
Figura 33 –	Imagens através de microscópio óptico das amostras do terceiro ciclo de produção.....	58
Figura 34 –	Localização do local de obtenção do resíduo de bauxita.....	66
Figura 35 –	Armazenamento do resíduo de bauxita no laboratório de Engenharia Civil	66

	da UFPA.....	
Figura 36 –	Faixa granulométrica de tamanhos de partículas de agregados miúdos (A) e graúdos (B).....	67
Figura 37 –	Resultados dos ensaios de reação álcali agregado da areia, AGN e AGS conforme NBR 15577-4/2019.....	68
Figura 38 –	Processo simplificado da produção dos corpos de prova de AGS.....	70
Figura 39 –	Ensaio de resistência mecânica dos corpos de prova do AGS.....	71
Figura 40 –	Curva de dosagem dos compósitos CAGN e CAGS. Adaptado, Método IBRACON.....	73
Figura 41 –	Sequenciamento da dosagem e moldagem do CAGS.....	74
Figura 42 –	Sequenciamento dos ensaios de resistência mecânica do CAGS.....	75
Figura 43 –	Resistência mecânica dos agregados graúdos e dos compósitos na idade de 28 dias.....	76
Figura 44 –	Propriedades físicas dos concretos estudados.....	78
Figura 45 –	Gráfico do mapeamento da resistência à compressão axial dos compósitos.....	80
Figura 46 –	Gráfico do mapeamento do módulo de elasticidade dos compósitos.....	81
Figura 47 –	Gráfico que mostra a relação na tração e flexão dos compósitos.....	82
Figura 48 –	Imagem obtida através de microscópio óptico da microestrutura da zona de transição do compósito.....	83
Figura 49 –	Imagens obtidas por (MEV) da amostra de CAGS.....	84
Figura 50 –	Imagens obtidas por (MEV) da amostra de CAGS.....	84
Figura 51 –	Definição do sistema de produto para produção de agregados graúdos a partir de resíduo da mineração de bauxita.....	94
Figura 52 –	Sequenciamento simplificado da produção dos agregados graúdos sintéticos.....	96
Figura 53 –	Fluxograma da produção do agregado.....	97
Figura 54 –	Comparação percentual dos impactos ambientais potenciais relativos à produção e ao transporte de 1 Tonelada de agregado graúdo naturais e agregados graúdos sintéticos.....	98
Figura 55 –	Contribuição do transporte nos resultados de impactos obtidos para os agregados graúdos.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Composição química média da lama vermelha dos países produtores de bauxita.....	25
Tabela 2 –	Estudos desenvolvidos com agregados sintéticos de resíduo.....	27
Tabela 3 –	Proporções dos componentes em cada mistura.....	28
Tabela 4 –	Composição percentual das matérias-primas.....	29
Tabela 5 –	Teor de material em cada amostra.....	31
Tabela 6 –	Porcentagem de resíduo, temperatura e tempo de sinterização das amostras	38
Tabela 7 –	Resultado dos ensaios de lixiviação de acordo com a norma NBR 10005 (2015).....	39
Tabela 8 –	Resultado dos ensaios de lixiviação de acordo com a norma NBR 10005 (2015).....	40
Tabela 9 –	Composição, temperatura e tempo de sinterização das amostras de agregados - primeiro ciclo de produção.....	44
Tabela 10 –	Composição, densidade aparente, temperatura e tempo de sinterização das amostras de agregados- segundo ciclo.....	45
Tabela 11 –	Composição, densidade aparente, temperatura e tempo de sinterização das amostras de agregados- terceiro ciclo.....	46
Tabela 12 –	Ensaio de caracterizações realizadas e normas técnicas que descrevem a metodologia.....	47
Tabela 13 –	Caracterização química do agregado graúdo sintético por FRX.....	57
Tabela 14 –	Resistências à compressão da confecção da curva de dosagem.....	72
Tabela 15 –	Concepção das misturas dos compósitos estudados.....	74
Tabela 16 –	Resultados dos ensaios de caracterização e resistências mecânicas dos corpos de prova de AGS.....	76
Tabela 17 –	Distância de transporte dos materiais.....	94
Tabela 18 –	Equipamentos utilizados na produção dos agregados sintéticos.....	95
Tabela 19 –	Potenciais impactos ambientais por tonelada de agregado graúdo produzido e transportado.....	97

NOMENCLATURA

ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas;
CETEM – Centro de Tecnologia Mineral;
CP – Corpo de Prova; DRX – Difração de Raio X;
DNPM – Departamento Nacional de Produção mineral;
IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração;
 Al_2O_3 – Óxido de alumínio;
 K_2O – Óxido de potássio;
 Fe_2O_3 – Óxido de ferro;
 CaO – Óxido de cálcio;
CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais;
ANM – Agência Nacional de Mineração
SEDEME – Secretaria Estadual de Desenvolvimento Econômico, Mineração e Energia;
LSO – Licença Social para Operar;
HYDRO – Norsk Hydro Brasil;
IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto;
ABAL – Associação Brasileira do Alumínio;
CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais;
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas;
ANEPAC – Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção;
AICV – Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida;
ICV – Inventário de ciclo de vida;
AGS – Agregado graúdo sintético;
IPEA – Instituto de pesquisa e ensino avançado;
RBSA – Resíduo de bauxita com sílica ativa;
RBMA – Resíduo de bauxita com metacaulim;
RBAF – Resíduo de bauxita com areia fina;
RBAG – Resíduo de bauxita com areia grossa;
GEE – Gases de efeito estufa;
DRA – Depleção de recurso abióticos;
ACI – Acidificação;
BRB – Brita de resíduo de bauxita;
AGS – Agregado graúdo sintético.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Relevância do tema e justificativa.....	16
1.2	Objetivos.....	16
1.2.1	Objetivo geral.....	16
1.2.2	Objetivos específicos.....	17
1.2.3	Proposta da Tese.....	17
2	ESTRUTURA DA TESE.....	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL.....	19
3.1	Minério de bauxita.....	19
3.2	Resíduo da bauxita.....	22
3.2.1	Processo Bayer.....	23
3.2.2	Características do resíduo da bauxita.....	24
3.2.3	Disposição e estocagem.....	26
3.2.4	Risco Ambiental.....	26
3.2.5	Aplicações e estudos do agregado sintético de resíduo de bauxita.....	27
3.3	Agregados utilizados no concreto.....	31
3.3.1	Areia e seixo.....	31
3.3.2	Agregado graúdo sintético.....	33
4	ARTIGO 1- USO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO PARA A PRODUÇÃO DE AGREGADOS GRAÚDOS PARA A FABRICAÇÃO DE CONCRETO.....	35
4.1	Introdução.....	35
4.2	Materiais e métodos.....	37
4.3	Resultados e discussões.....	58
4.4	Conclusões.....	58
4.5	Agradecimento.....	59
4.6	Referências bibliográficas.....	59
5	ARTIGO 2- AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO TOTAL DO AGREGADO GRAÚDO NATURAL POR AGREGADO GRAÚDO DE RESÍDUO DE MINERAÇÃO NA PRODUÇÃO DE CONCRETO ESTRUTURAL DE CIMENTO PORTLAND: PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS.....	63
5.1	Introdução.....	64
5.2	Materiais e métodos.....	65
5.2.1	Materiais.....	65
5.2.1.1	Resíduo de bauxita.....	65
5.2.1.2	Agregados.....	65
5.2.1.3	Água de amassamento.....	69
5.2.1.3	Cimento Portland.....	69
5.2.2	Produção de corpos de prova proveniente do AGS.....	69
5.2.3	Dosagem e confecção da curva de dosagem.....	71
5.2.4	Traços unitários extraídos da curva.....	73

SUMÁRIO

5.3	Resultados e discussão.....	76
5.3.1	Influência das propriedades mecânicas dos agregados graúdos AGS e AGN nas Resistências à compressão axial e módulo dos concretos CAGN e CAGS	76
5.3.2	Influência das propriedades físicas do concreto nas resistências à compressão axial dos concretos CAGS e CAGN.....	77
5.3.3	Análise das resistências à compressão axial e módulo de elasticidade em diferentes idades dos concretos CAGS e AGN.....	79
5.3.4	Análise comparativa dos resultados de tração por compressão diametral e tração na Flexão.....	82
5.3.5	Análise da microestrutura do concreto fraturado através de microscópio óptico e eletrônico de varredura (MEV).....	83
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	85
5.4.1	Influência da qualidade do AGS no compósito CAGS.....	85
5.4.2	Influência da porosidade do AGS na água ligante do CAGS.....	85
5.4.3	Influência da compressão axial e módulo de elasticidade do AGS nas propriedades mecânicas do CAGS.....	86
5.4.4	Microestrutura do CAGS.....	86
5.4.5	Conclusão.....	87
5.7	Agradecimentos.....	87
5.8	Referências bibliográficas.....	87
6	ARTIGO 3- INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DE AGREGADOS GRAÚDOS SINTÉTICO PRODUZIDO A PARTIR DE RESÍDUO DA MINERAÇÃO DE BAUXITA.....	91
6.1	Introdução.....	92
6.2	Metodologia.....	93
6.2.1	Definição do objetivo.....	93
6.2.2	Definição do escopo.....	93
6.2.3	Análise de inventário do ciclo de vida (ICV).....	94
6.3	Resultados.....	97
6.4	Conclusões.....	100
6.5	Referências bibliográficas.....	100
7	CONCLUSÕES GERAIS.....	103
8	SUGESTÕES FUTURAS.....	105
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	106
	APÊNDICE A - TABELA A.1.....	110
	APÊNDICE B - TABELA B.1.....	110
	APÊNDICE C - (ARTIGOS PUBLICADOS).....	111

1 INTRODUÇÃO

1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA E JUSTIFICATIVA

O Brasil produz cerca de 80 substâncias minerais não energéticas, destacando-se, entre outras, as produções de nióbio, minério de ferro, bauxita e manganês (IBRAM, 2020). O Estado do Pará tornou-se o maior produtor mineral do Brasil em 2019 na produção de minério de ferro, de cobre, bauxita e caulim (ANM, 2020b). O minério de bauxita é um dos principais produtos exportados pela indústria de extração mineral do Pará em 2019 (SEDEME, 2020).

No caso do setor da mineração nos últimos anos, houve um grande crescimento de suas atividades, devido seu processo produtivo. Dessa forma, ocasionando também num aumento significativo na geração de resíduos (IBRAM, 2019). Nesse contexto, o aproveitamento de desses resíduos ganharam muita relevância nos últimos anos, em especial com a consolidação dos conceitos de licença social para operar (LSO) e de economia circular (ANM, 2020a).

A necessidade de dar destinação sustentável aos resíduos da mineração, ganhou mais relevância após os desastres das barragens de rejeito em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), e o aproveitamento econômico desses materiais surge como alternativa à deposição em estruturas como pilhas e barragens (ANM, 2020a). Para tanto, a eficiência no uso dos recursos e o desenvolvimento de tecnologias para o aproveitamento de resíduos são estratégicos (IBRAM, 2016).

Com o avanço da tecnologia do concreto e a possibilidade de utilização de novos materiais que não poluem o meio ambiente durante a produção de extração e transporte de agregados graúdos naturais provenientes de leitos de rios, como o caso do seixo rolado. A produção de agregados artificiais ou sintéticos de resíduo de mineração de barragens de contenção passou a ser uma alternativa de substituição gradativa destes agregados tradicionais.

Estudos sobre produção e utilização de agregados graúdos de resíduo de bauxita já são bem difundidos na literatura especializada. No entanto, neste trabalho é enfatizado os vários ciclos do processo de produção até que se obtivesse na fase final somente três tipos de agregados graúdos testados por critérios exigidos por normas técnicas, demonstrando assim, uma condição inovadora.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por principal objetivo avaliar o efeito do agregado sintético graúdo otimizado de resíduo de bauxita na fabricação de concretos estruturais, com intuito de

oferecer ao mercado da Construção um produto de viabilidade técnica-ambiental e também alternativa viável a concorrer e/ou substituir em futuro próximo os agregados graúdos naturais. Também fazer um comparativo quantitativo quanto aos impactos ambientais associados à produção e ao transporte de uma tonelada de agregados graúdos sintetizados e naturais, utilizando o inventário de ciclo de vida.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar se o teor de resíduo de bauxita influência no comportamento físico, químico e mecânico dos agregados graúdos formulados;
- Avaliar o comportamento do concreto com agregado graúdo sintético com maior teor de resíduo na composição se atende os parâmetros estabelecidos na curva de dosagem e também aos padrões normativos específicos;
- Avaliar a resistência à compressão axial e módulo de deformação dos agregados graúdos sintéticos por meio de corpos de prova cilíndricos e analisar a influência destas propriedades do agregado nas propriedades do concreto;
- Avaliar a microestrutura do concreto por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura as interações da interface matriz cimentícia e dos agregados graúdos sintéticos no concreto fraturado;
- Apresentar um panorama inicial dos impactos ambientais associados a produção dos agregados graúdos sintéticos no âmbito laboratorial, considerando o transporte dos locais de origem das matérias- primas até o local de fabricação destes agregados.
- Inferir indicadores ambientais para analisar o impacto do uso de agregado sintético em concretos estruturais.

1.2.3 Proposta da Tese

O agregado sintético produzido a partir do resíduo de bauxita tem viabilidade técnica e ambiental para substituir o agregado natural? Hipótese: Sim, pois nesta pesquisa se demonstrou que os agregados graúdos sintéticos produzidos no terceiro ciclo de produção possuem parâmetros físicos, químicos e mecânicos dentro do limite estabelecido pela NBR7211, 2022 e no proporcionamento adequado podem ser um ótimo substituto ao agregado natural amazônico

Esta Tese é dividida em sete capítulos, sendo o Capítulo 1 relativo à introdução da pesquisa, justificativa, apresentação dos objetivos e proposta da Tese. Os demais capítulos foram desenvolvidos como se segue:

No Capítulo 2, a estrutura da Tese;

No Capítulo 3 será feita uma breve revisão bibliográfica sobre minério de bauxita, resíduo da bauxita e agregados utilizados no concreto;

No Capítulo 4 será apresentado o artigo, abordando o tema: Uso de resíduos de mineração para a produção de agregados graúdos para a fabricação de concreto conforme mostra a Figura 1:

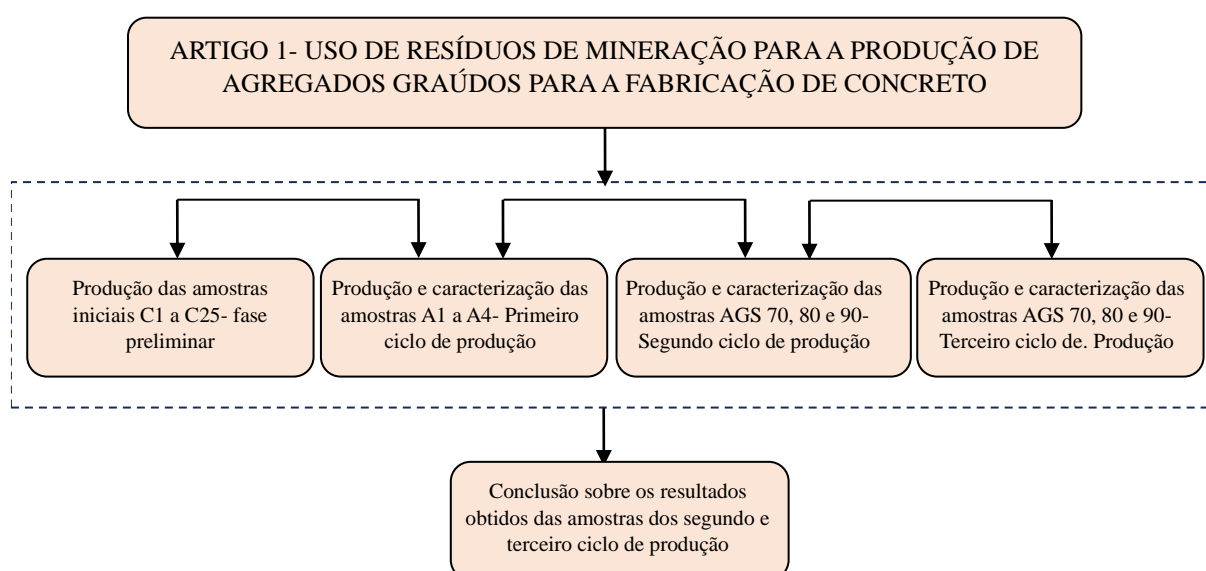


Figura 1 – Fluxograma das macros etapas da pesquisa referente ao artigo 1.

No Capítulo 5 será o título do artigo 2, abordando o tema: Avaliação da substituição total do agregado graúdo natural por agregado graúdo de resíduo de mineração na produção de concreto estrutural de cimento Portland: propriedades físicas e mecânicas conforme mostra a Figura 2:

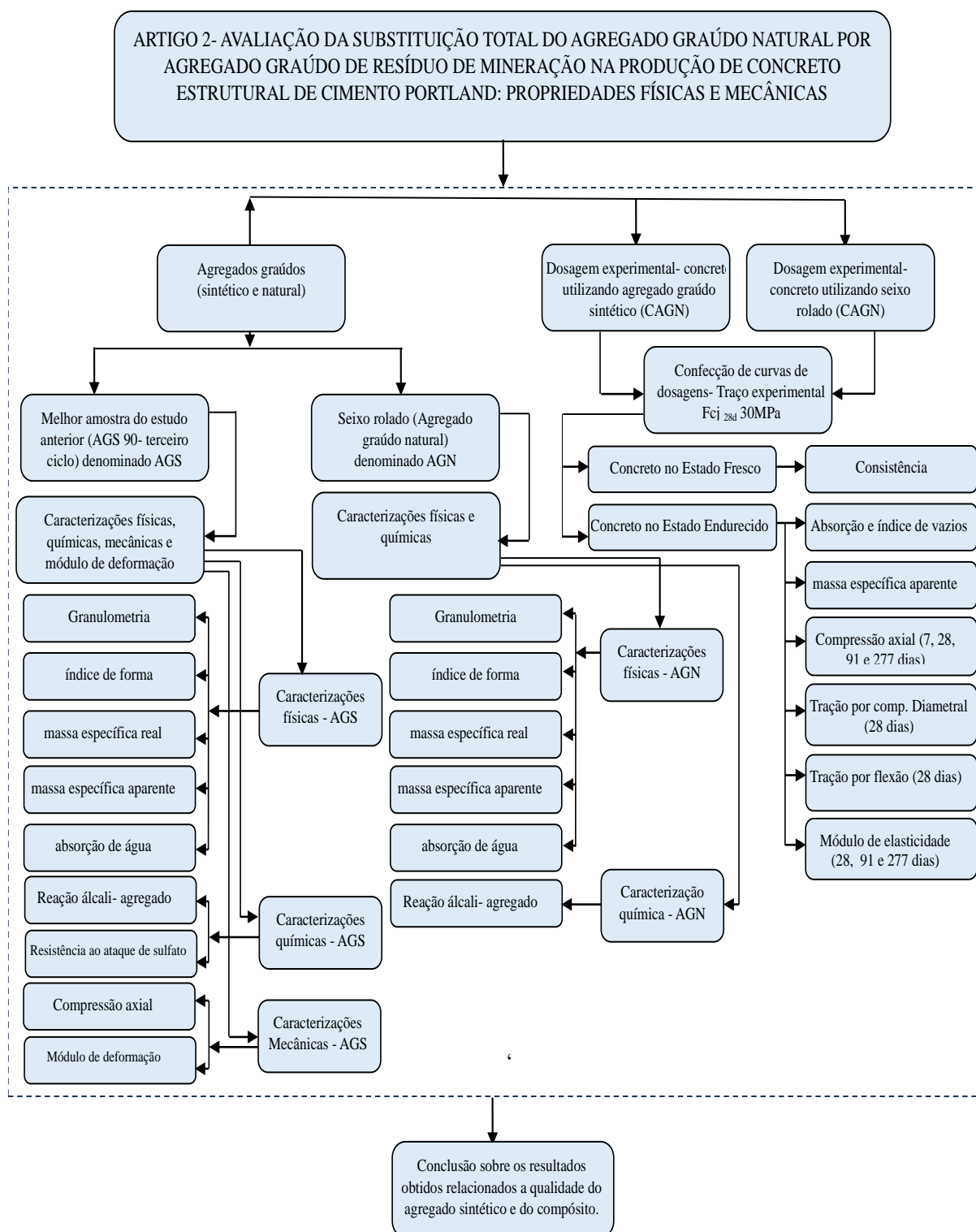


Figura 2 – Fluxograma das macros etapas da pesquisa referente ao artigo 2.

No Capítulo 6 será o título do artigo 3, abordando o tema: Inventário do ciclo de vida de agregados graúdos sintético produzido a partir de resíduo da mineração de bauxita conforme mostra a Figura 3:

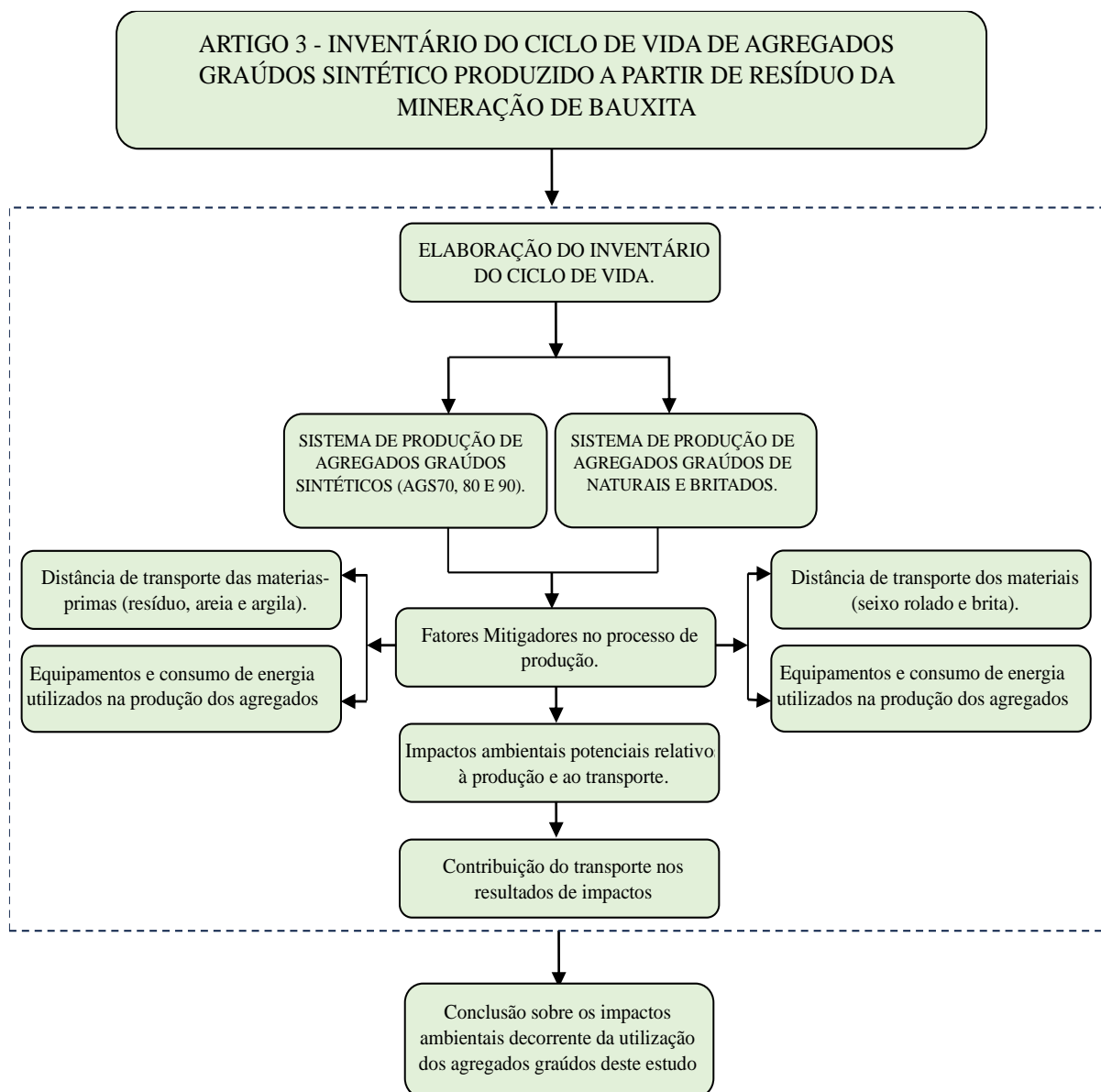


Figura 3 – Fluxograma das macros etapas da pesquisa referente ao artigo 3.

Nos Capítulo 7 será apontada as conclusões gerais sobre o tema estudado e no Capítulo 8, as sugestões de trabalhos futuros respectivamente.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL

3.1 MINÉRIO DE BAUXITA

A bauxita é a fonte natural do alumínio, sendo o terceiro elemento em abundância na crosta terrestre, depois do oxigênio e do silício. Constatase sua maior ocorrência na forma combinada com outros elementos, principalmente o oxigênio, com o qual forma alumina. Ela é encontrada sobretudo em regiões tropicais e subtropicais do planeta, por ação do intemperismo sobre alumino silicatos. Especialistas avaliam que as reservas mundiais conhecidas de bauxita agregam em torno de 70 bilhões de toneladas. Com base nas atuais taxas de consumo e níveis de aproveitamento, a estimativa é que a reserva seja suficiente para atender à demanda dos mercados globais pelos próximos 250 a 300 anos. As reservas brasileiras de bauxita, além de possuir uma ótima qualidade (mais de 40% de Al_2O_3) também estão entre as maiores do mundo (SAMPAIO, et al. 2005; ABAL, 2017).

Em 2018, a produção mundial de bauxita alcançou aproximadamente 327 milhões de toneladas, registrando acréscimo de 5,8% em relação ao ano anterior (309 milhões de toneladas em 2017). De acordo com o Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), em 2018, as reservas mundiais de bauxita totalizaram aproximadamente 30 bilhões de toneladas, assim distribuídas: Guiné (7,4 bi ton), Austrália (6,0 bi ton), Vietnã (3,7 bi ton), Brasil (2,6 bi ton), Jamaica (2 bi ton), Indonésia (1,2 bi ton) e demais países (5,2 bi ton).

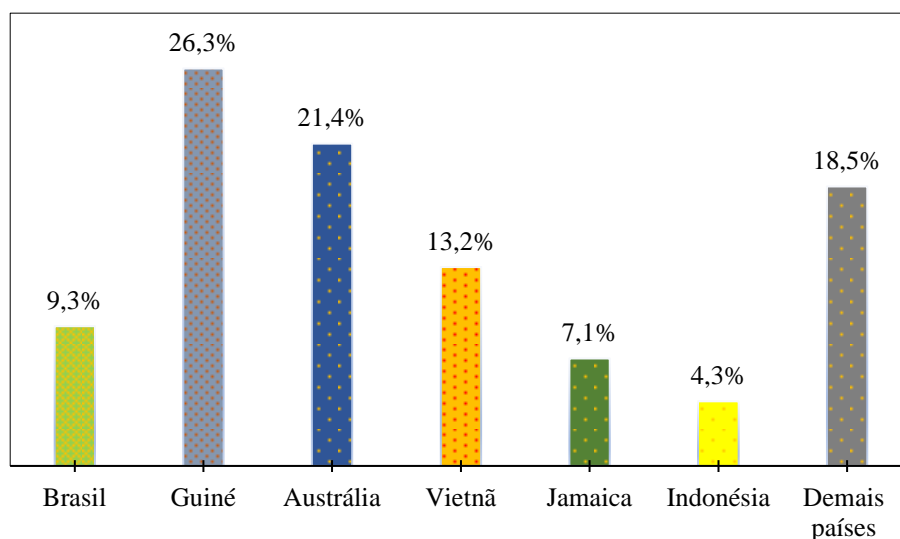


Figura 4 – Principais Reservas Mundiais de Alumínio – 2018.

Fonte: Adaptado. Anuário Mineral Brasileiro – AMB 2019.

O Estado do Pará detém posição de destaque na produção nacional de bauxita (27,6 Mt), tendo respondido, em 2018, por 92,9% da produção total, ainda que sua produção estadual

tenha apresentado contração de -20,1% diante do ano anterior (34,5 Mt em 2017). (IPEA, 2018).

A mineração de bauxita em Paragominas fica a 64 quilômetros da área urbana, no nordeste do Pará, a 350 km da capital Belém. Controlada pela empresa norueguesa Hydro, iniciou suas operações em 2007 e transporta 100% de sua bauxita por um mineroduto de 244 quilômetros de extensão. Esse mineroduto, com capacidade de 15 milhões de toneladas por ano, é pioneiro no mundo para transporte de bauxita. Por ele, o minério vai para o município de Barcarena no Pará, para alimentar a refinaria de alumina da Hydro Alunorte (ABAL, 2017).

A alumina é a matéria-prima do alumínio e é produzida a partir do minério de bauxita, através do processo denominado Bayer. O processo de produção de alumina gera um resíduo, que é lavado, filtrado e armazenado nos depósitos de resíduos sólidos da refinaria. A refinaria é a fase do processo que transforma a bauxita em alumina calcinada, a alumina é separada da bauxita utilizando uma mistura de soda cáustica e cal, no processo de refino (HYDRO, 2022). Na Figura 5 é apresentada uma vista de satélite da Refinaria HYDRO e os seus respectivos depósitos dos rejeitos.



Figura 5 - Vista de satélite da Alunorte e do rio Pará (1) área da refinaria, (2) depósito de RB 1, (3) depósito de RB 2, (4) descarte de água licenciado para Rio Pará e (5) estação de tratamento de efluentes industriais. Fonte: Hydro Alunorte (2021).

3.2 RESÍDUO DA BAUXITA

A estimativa da mundial produção do resíduo da bauxita no ano de 2007 foi de 120 milhões de toneladas (Power et al., 2011). A cada 2 a 3 toneladas de bauxita usadas no processo de Bayer, é produzida 1 tonelada de alumina, gerando 1,5 toneladas de resíduo de bauxita, onde a quantidade depositada no mundo em 2015 foi de 120 milhões de toneladas (HUA et al.,

2017).

Destaca-se em relação as propriedades químicas três tipos grupos de bauxita: a gibbsítica, a boehmítica e a diaspórica. A bauxita gibbsítica é determinada pela presença majoritária do mineral gibbsita ($\text{Al}(\text{OH}_3)$), um óxido hidratado com cerca de 65% de Al_2O_3 . A bauxita boehmítica é aquela em que o óxido hidratado é a boehmita ($\gamma\text{Al}(\text{OOH})$) e a bauxita diaspórica é a composta pelo óxido hidratado denominado diásporo ou diaspório ($\alpha\text{-Al}(\text{OOH})$), nas duas se encontram concentrações de Al_2O_3 superiores a 80% (CARDOSO *et al.*, 2012). A bauxita é apresentada na Figura 6.



Figura 6 – Bauxita: matéria-prima do alumínio. Fonte: Norsk Hydro ASA (2019).

3.2.1 Processo Bayer

Dentre os 250 minerais que contém alumínio, são considerados minérios de alumínio: os bauxitos, as argilas cauliníticas, nefelina e alunita. O minério mais utilizado é o bauxito, onde dois processos são utilizados para seu beneficiamento: o processo Le Chatelier, em que o bauxito e o carbonato de sódio são calcinados para formar o aluminato de sódio, e o processo Bayer desenvolvido pelo químico Austríaco K. J. Bayer, especialmente aplicáveis aos bauxitos gibbsíticos (MAGALHÃES, 2012).

De acordo com Silva filho *et al.*, (2007), o processo Bayer é utilizado para o refino da bauxita na produção da alumina, onde começou a ser adotado pois reduziu drasticamente os custos do processo, somente substituindo o carbonato de sódio (Na_2CO_3) pelo hidróxido de sódio (NaOH) e pela pressão durante a digestão. A Figura 7 mostra o fluxograma e esquema do processo Bayer na produção da bauxita.

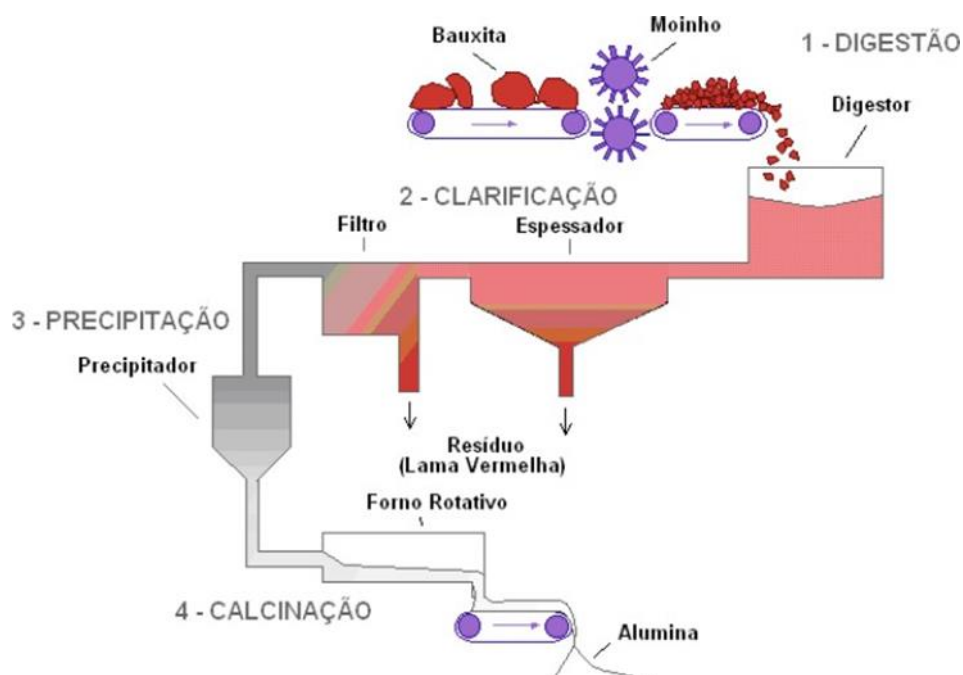


Figura 7 – Fluxograma e esquema do processo Bayer. Fonte: Silva Filho et al., (2007). Adaptado de WAO (2003).

O primeiro estágio é a moagem da bauxita, seguida pela digestão com uma solução de NaOH sob temperatura e pressão, onde as concentrações variam de acordo com a natureza da bauxita. Na clarificação, ocorre a separação entre as fases sólida (resíduo insolúvel) e a líquida (licor). Em seguida, acontece o espessamento que consiste em uma decantação, que tem por objetivo adensar o resíduo, elevando o teor de sólidos, para recuperar uma maior quantidade de NaOH. Nesta fase é comum a adição de polímeros (com hidroxamatos e poliacrilamida) para a indução da floculação das partículas. Após isso, ocorre o processo de filtração e após a precipitação, acontece o resfriamento do licor. Quando o material resfria, adiciona-se uma pequena quantidade de cristais de alumina para estimular a precipitação. A alumina cristalizada segue para a calcinação e o licor residual com NaOH e alguma alumina é recirculada para a etapa de digestão. Em seguida, vem a calcinação, a etapa final do processo, onde a alumina é lavada para remover os resíduos do licor e depois é seca. Após isso, a alumina é calcinada aproximadamente 1000°C para desidratar os cristais, formando cristais de alumina puros, com aspecto arenoso e branco (SILVA FILHO et al., 2007).

3.2.2 Características do resíduo da bauxita

O resíduo da bauxita se apresenta como um material marrom avermelhado, geralmente composta por dois grupos de minerais, sendo o primeiro composto com os hidróxidos e óxidos de alumínio (gibbsita, boemita, diásporo), ferro (hematita e goethita) e outros (rutilo, anatásio, calcita, dolomita, quartzo); o segundo grupo composto com aluminossilicatos de

sódio hidratados (zeólitas – sodalita e cancrénita), aluminatos tricálcio, muscovita, titanatos de Na, Ca ou Mg e outros (LIMA, 2006).

O resíduo da bauxita é constituído por partículas muito finas (cerca de 95 % < 44µm, i.e. 325 mesh), apresenta uma área superficial de 13-22 m² g⁻¹ e tem como principal característica uma elevada alcalinidade, com pH na faixa de 10 a 13 (SILVAFILHO et al., 2007).

Independentemente do processo de produção, a composição do resíduo da bauxita contém seis maiores substâncias químicas constituintes, são elas, Fe₂O₃, Al₂O₃, TiO₃, SiO₃, Na₂O, CaO. Também se encontra traços de V, Ga, Cr, P, Mn, Cu, Cd, Ni, Zn, Pb, Mg, Zr, Hf, Nb, U, Th, Y, K, Ba, Sr e raros traços de outros elementos (Kalkan, 2006; Singh et al., 1996, 1997; Tsakiridis et al., 2004). A composição química média do resíduo de bauxita nos países produtores de bauxita é mostrada na Tabela 1. Pode-se notar que as maiores concentrações são de óxido de ferro e alumínio, pelo processo Bayer, assim como, óxido de cálcio e silício, pelo processo de sinterização.

Tabela 1 – Composição química média do resíduo de bauxita dos países produtores de bauxita. Composição média (%).

Países	Composição do resíduo de bauxita					
	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₃	SiO ₃	Na ₂ O	CaO
Índia	33,1	18,2	19,6	8,8	5,8	2,7
Itália	35,2	20,0	9,2	11,6	7,5	6,7
Turquia	36,9	20,3	4,9	15,7	10,1	2,2
Inglaterra	46,0	20,0	6,0	5,0	8,0	1,0
Grécia	40,8	19,9	5,8	6,8	2,7	12,6
França	26,6	15,0	15,7	4,9	1,0	22,2
Canadá	31,6	20,6	6,2	8,8	10,2	1,6
Jamaica	49,5	16,5	7,0	3,0	2,0	5,5
China	27,9	22,0	2,3	20,9	10,5	6,2
Austrália	28,5	24,0	3,1	18,8	3,4	5,2
Brasil	45,6	15,1	4,2	15,6	7,5	1,1
Alemanha	44,8	16,2	12,3	5,4	4,0	5,2
Espanha	37,5	21,2	11,4	4,4	3,6	5,5
EUA	35,5	18,4	6,3	8,5	6,1	7,7

Fonte: Adaptado de Liu e Zhang (2011).

3.2.3 Disposição e estocagem

A disposição dos resíduos do resíduo da bauxita é um problema de toda planta que utiliza o processo Bayer. Antigamente, todo resíduo da bauxita gerado era descartado em rios e mares, contudo, as leis ambientais exigem que este material seja armazenado em áreas especiais chamadas de lagos ou lagoas de resíduos, onde são projetados para evitar a contaminação do solo e via fluviais próximas.

Estas lagoas podem ser revestidas com argila impermeável e/ou manta de polietileno de alta densidade, como é feito na Alunorte (Barcarena/PA), onde o resíduo da bauxita é transportado, filtrado por filtros de prensa e compactação, reduzindo 4 vezes o volume de armazenamento. Atualmente, o depósito de resíduos sólido (DRS 1) que está em operação, possui capacidade de armazenamento de 51,70 Mm³ e seu volume armazenado atual é de 47,90 Mm³ (HYDRO, 2019).

O depósito da HYDRO é revestido por membranas para evitar a infiltração para o solo, e a drenagem e águas pluviais são coletadas e levadas para a Estação de Tratamento de Efluentes Industriais, onde controla-se o pH e se elimina as partículas para atender aos padrões estabelecidos pelas autoridades. Quando o depósito chega a sua capacidade total, ele é coberto por terra e plantado espécies vegetais locais. A tecnologia de deposição é denominada dry stacking (HYDRO, 2016 apud GOMES, 2016).

3.2.4 Risco Ambiental

A toxicidade do resíduo da bauxita possui diferentes classificações, uma vez que esta característica está relacionada com as diferentes metodologias de ensaios de avaliação utilizados, bem como a diversidade de sua composição química, onde varia de acordo com o tipo de tratamento (Bayer) ou origem do minério. No entanto, geralmente o resíduo da bauxita se classifica como um resíduo perigoso por ter em sua composição metais pesados e elevada corrosividade (MANFROI, 2009).

Na Amazônia, a geração de resíduo da indústria de mineração é um fator preocupante para a sociedade e autoridades, uma vez que a implantação de projetos de extração de minério estão cada vez mais frequentes em municípios próximos aos centros urbanos, fazendo com que existam implicações ambientais inerentes aos descartes de grande quantidade de resíduo gerado nos processos de produção da indústria minero-metalúrgica (SOUZA, 2010).

3.2.5 Aplicações e estudos do agregado sintético de resíduo de bauxita:

Durante muito tempo o resíduo da bauxita, foi considerado inoperante para a indústria do alumínio. No entanto, os riscos e custos associados à disposição do resíduo proporcionaram

aos pesquisadores a buscarem alternativas para utilização do resíduo de forma econômica e ambientalmente oportuno (CHAVES, 1962).

Na Tabela 2 é possível analisar alguns estudos desenvolvidos com aplicações do agregado sintético proveniente do resíduo da bauxita na indústria da construção civil.

Tabela 2 – Estudos desenvolvidos com agregados sintéticos de resíduo de bauxita.

Autores	Local de Origem	Aplicação	Teores de Substituição
Rosário (2013)	Belém, PA	Concreto	50 e 100%
Albuquerque (2007)	Belém, PA	Concreto	—
Rossi (2009)	Belém, PA	Concreto	100%
Manfroi (2009)	Florianópolis, SC	Argamassas	5%, 10% e 15%
Santos (2011)	Belém, PA	Concreto	----
Reis (2014)	Belém, PA	Agregado Sintético	----
Souza (2010)	Belém, PA	Concreto	100%
Ferreira (2019)	São Luís, MA	Concreto	30%, 50% e 60%
Souza <i>et al.</i> , (2018)	Belém, PA	Agregado Sintético	----
Ribeiro, M. C. D (2022)	Belém, PA	Concreto	----

Fonte: Adaptado de Ribeiro, M. C. D., 2022.

Em estudo realizado por Souza (2010), tratou da produção de agregado sintético do resíduo de bauxita para confecção de concreto. Para este fim, foi produzido agregado graúdo sintético em diferentes teores de resíduo de bauxita (95 – 55%), sílica (40 – 5%) e argila (5%).

Ainda segundo Albuquerque *et al.* (2007), foi acrescentado nas misturas 10% em peso de óleo e aproximadamente 25% a 30% em peso de água, e o processo de moldagem dos agregados foi realizado com formas metálicas. Os dados cessaram que a praticabilidade destes agregados para a confecção de concretos, visto que na apresentação dos resultados as propriedades mecânicas foram pertinentes. A Figura 8 mostra a aparência cúbica dos agregados graúdos após a queima.



Figura 8 – Aparência dos agregados após a queima.

Fonte: Albuquerque *et al.*, 2007.

Em estudo de Rossi (2009), produziu concretos para reparo com agregados de resíduo de bauxita sob abrasão hidráulica, conforme a Tabela 3 foram aplicadas quatro combinações de matérias-primas, todas com valor fixo de 70% de resíduo de bauxita e os 30% restantes de sílica ativa, metacaulim, areia fina e areia grossa.

Na fabricação dos agregados foram manuseando formas cúbicas metálicas, e após esta etapa, com os materiais ainda maleáveis, iniciou-se o processo de arredondamento de forma manual, com a finalidade das formas do agregado sintético se parecerem com as do agregado natural, seixo rolado. Após a moldagem os agregados foram sinterizados a 1200 °C por três horas (ROSSI, 2009).

Tabela 3 – Proporções dos componentes em cada mistura.

Mistura	RBSA	RBMC	RBAF	RBAG
70%	-	Resíduo de Bauxita	-	-
30%	Sílica Ativa	Metacaulim	Areia Fina	Areia Grossa

Fonte: Adaptado de Rossi, 2009.

Em estudo (SANTOS, 2011), propôs a utilização do resíduo de bauxita para produção de agregados leves, na Tabela 4 são apresentadas as composições de argila, sílica e biomassa em cinco composições diferentes. O autor exibiu através das análises pertinentes que é possível produzir agregados com uma resistência mecânica e massa específica apropriada para produção de concretos.

Tabela 4 – Composição percentual das matérias-primas.

Amostras	Resíduo Bauxita (%)	Sílica(%)	Argila (%)	Biomassa(%)
M-10	55	25	10	10
M-15	50	25	10	15
M-20	45	25	10	20
M-25	40	25	10	25
M-30	35	25	10	30

Fonte: Adaptado de Santos, 2011.

A pesquisa desenvolvida por (ROSÁRIO, 2013), utilizou o resíduo de bauxita para produção de um tipo de agregado gráudo sintético com intuito de avaliar sua viabilidade na produção de concreto. Este tipo de agregado gráudo produzido foi de acordo com as seguintes proporções de matérias-primas, 60% de resíduo de bauxita, 20% de areia fina, 10% de argila e 10% biomassa conforme mostra a Figura 9. Os resultados de caracterização realizados para o agregado sintético foram considerados satisfatórios, concluindo assim que existe um grande potencial para aplicação na construção civil. Já (REIS, 2014) fez caracterizações em quatro composições de agregados sintetizados (Figura 10) e investigou as características físico-químicas e mineralógicas a partir da mistura do resíduo da bauxita, argila, areia e carvão vegetal.

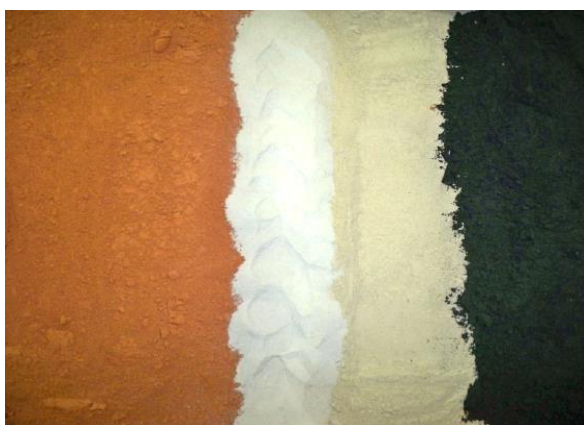


Figura 9 – Resíduo de bauxita, areia, argila e carvão vegetal.

Fonte: Rosário, 2013.



Figura 10 – Agregado Sintético. Fonte: Reis, 2014.

As matérias primas foram pré-tratadas e analisadas por fluorescência de Raios-X, difração de Raios-X, análise térmica e granulométrica. As amostras foram calcinadas a 1200 °C por quatro horas, após a calcinação foram submetidas as análises por Difratometria de Raios-X, fluorescência de Raios-X, análise térmica diferencial e microscopia eletrônica de varredura para caracterização e testes físicos. Os agregados sintéticos produzidos e as suas análises após a sinterização estão representadas na Figura 11, foram identificadas as fases cristalinas de quartzo e hematita.

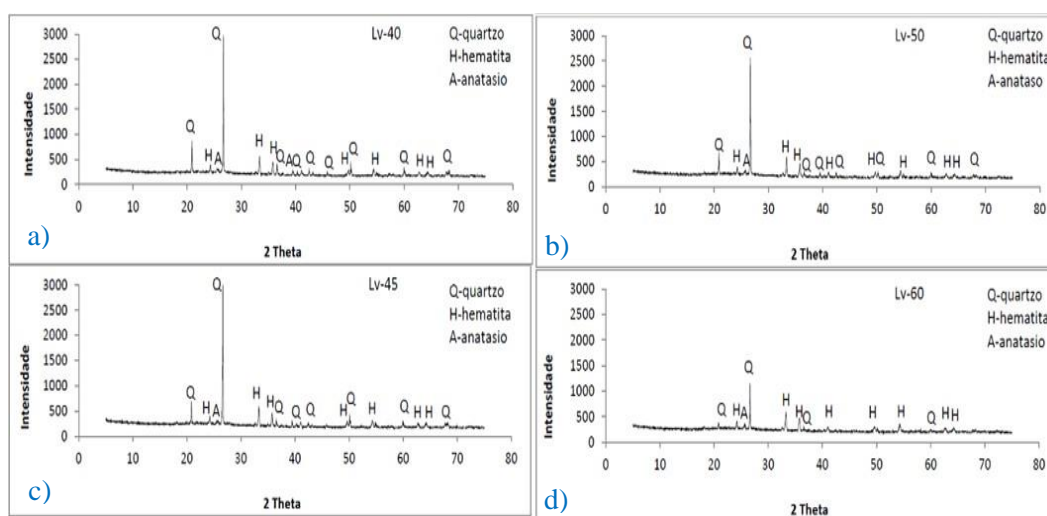


Figura 11 – DRX das amostras. a) LV- 40, b) LV- 45, c) LV-50, d) LV- 60 após sinterização.
Fonte: REIS, 2014.

Na pesquisa de Souza et al. (2019) foram produzidos oito tipos de misturas de agregados sintéticos com variação nas proporções de resíduo de bauxita, argila, carvão vegetal e cinza volante conforme apresenta a Tabela 5. Após o processo de pelotização em betoneira estacionária (Figura 12.a), os agregados foram queimados em forno elétrico a 900 °C (Figura 12.b) e após a calcinação foram executados os ensaios de porosidade aparente, massa específica e absorção de água. Com base nos resultados obtidos durante este estudo, chegou-se ao entendimento que a temperatura de calcinação é um fator determinante que interfere diretamente na porosidade e na resistência do agregado.



Figura 12 – (a) Formação de pelotas das misturas na betoneira; (b) Forno tipo mufla após queima do agregado.

Fonte: Souza *et al.*, 2018.

Tabela 5 - Teor de material em cada amostra.

Amostras	RB (%)	Cinza (%)	Argila (%)	Carvão (%)
Amostra 1	82	8	-	10
Amostra 2	74	16	-	10
Amostra 3	66	24	-	10
Amostra 4	58	32	-	10
Amostra 5	77	8	5	10
Amostra 6	69	16	5	10
Amostra 7	61	24	5	10
Amostra 8	53	32	5	10

Fonte: Souza *et al.*, 2018.

3.3 AGREGADOS UTILIZADOS NO CONCRETO

3.3.1 Areia e seixo

A mineração de agregados possui como características típicas: grandes volumes de produção, beneficiamento simples, baixo preço unitário, alto custo relativo de transporte e necessidade de proximidade entre as fontes produtoras e os locais de consumo. Esta atividade minerária é desenvolvida fundamentalmente por empresas de pequeno e médio porte, voltadas à produção de agregados para construção civil (CPRM, 2020).

A partir de um levantamento realizado em Concreteiras e Estâncias instaladas na capital paraense, Nogueira Júnior *et al.* (2007) verificaram que um grande percentual dos agregados graúdos utilizados na fabricação de concretos de cimento Portland é constituído por seixos provenientes de 12 jazidas localizadas no município de Ourém - Pa.

A demanda atual desse material na Região metropolitana de Belém é suprida principalmente a partir de dez “Seixeira” localizadas no município de Ourém, e seis localizadas em Capitão Poço, preferencialmente na área de

influência do rio Guamá, que representa o limite ao sul do município de Ourém e o limite norte de Capitão Poço. Estes dados sugerem que a Indústria extrativa de agregados para construção civil, especialmente de seixo, é um setor relevante na economia dos municípios de Ourém e Capitão Poço. Entretanto, essa atividade vem sendo realizada sem o devido acompanhamento técnico e sem uma fiscalização efetiva por parte dos órgãos governamentais, provocando o desperdício de minério, rápida exaustão das reservas, evasão de tributos e graves impactos socioambientais em quase todas as frentes de lavra. Nos municípios supramencionados, pouco se conhece sobre as reservas de minério, as técnicas de lavra, a qualidade do material e, principalmente, sobre os métodos de recuperação ambiental, sendo que esse último pode implicar em problemas futuros, principalmente com relação a impactos nos recursos hídricos da região (CPRM, 2020).

O método de lavra utilizado é a extração a céu aberto, efetuada de forma mecanizada (Figura 13), obedecendo apenas às necessidades imediatas de cada minerador. Como não há um trabalho de pesquisa visando o conhecimento prévio das características do corpo de minério e a geometria do depósito, os trabalhos de lavra são geralmente desenvolvidos de forma empírica.



Figura 13 – Depósito de seixos de quartzo. A) altamente lixiviado e constituído por conglomerado oligomítico imersos em matriz predominantemente arenosa. B) Detalhe do nível de minério. Fonte: CPRM, 2020.

As especificações para uso de agregados em concreto estão relacionadas geralmente as suas respectivas curvas granulométricas contínuas que podem promover uma redução de volumes de vazios, conferindo assim maior resistência a cargas ou reduzindo o consumo dos ligantes, geralmente mais caros que os agregados (BAUER, 2019).

Segundo Kazmi et al. (2016), a resistência mecânica de materiais cerâmicos depende principalmente de sua densidade, porosidade e distribuição do tamanho de poros. Já (CALLISTER, 2018), enfatiza que uma porosidade volumétrica de 10% pode em até 50% a resistência à flexão do concreto em relação ao valor medido no material sem poros e por outro lado, a resistência a choques térmicos é aumentada com o aumento de porosidade. (NEVILLE, 2016; BROOKS, 2013) destacam que o agregado natural (pouco poroso) por ser

mais rígido que a pasta de cimento e é fundamental para reduzir a retração, aumentar o módulo de elástico, reduzir a fluência dos materiais cimentícios. Assim também influencia diretamente nas propriedades das matrizes cimentícias no estado fresco e no estado endurecido.

De acordo com (BAUER, 2019) quanto maior o volume de agregado gráúdo natural nas matrizes cimentícias, menor será a possibilidade de retração, maior o módulo elástico. Por outro lado, os agregados porosos (leves, reciclados) reduzem a resistência mecânica e o módulo elástico das matrizes cimentícias, assim como aumentam a retração, quando usados em substituição aos agregados naturais.

3.3.2 Agregado gráúdo sintético

O agregado sintético é conhecido na literatura especializada como agregado de argila expandida, do inglês “Light Expanded Clay Aggregate” (LECA), e vem sendo usado no Brasil desde a década de 1980 em projetos de engenharia civil incluindo aplicações geotécnicas, devido à sua diversidade na massa específica (densidade), alta resistência ao cisalhamento e características de drenagem favoráveis (GAO, 2021), proporcionando diversas aplicações na construção civil.

O agregado sintético é formado a partir de sílico-aluminatos submetidos a um processo de sinterização em temperaturas elevadas (1100 - 1250°C), podendo ainda apresentar expansão por inclusão de gases, normalmente processados em fornos rotativos. Tal processo resulta em um aumento da porosidade dos grãos e em características singulares, como leveza, capacidade de absorção de água e isolamento térmico e acústico. A baixa densidade do material o torna apropriado para uso em obras de construção, tais como aterros sobre solos de baixa rigidez e como material de enchimento em estruturas de contenção, visando à redução de pressões ativas. Dada a natureza manufaturada do produto, é possível ajustar adequadamente sua porosidade e densidade durante o processo de fabricação, de modo a obter as características de grão desejadas. No tocante à leveza, o parâmetro mais relevante é a porosidade do núcleo. Os poros podem ser divididos em acessíveis e fechados, que não podem ser preenchidos com água, mesmo que o grão permaneça submerso por longos períodos (ROCES-ALONSO et al. (2021).

O agregado sintético é produzido em diversos países sob diferentes denominações. Países que empregam métodos similares, como Reino Unido, Irã, Portugal, Finlândia, Alemanha, Itália, Dinamarca e Suíça, utilizam a denominação "LECA", enquanto Suécia, China, Polônia e Rússia empregam a denominação "Keramzite". A Espanha o rotulou como "liapour", enquanto a África do Sul o denominou "Argex". Independentemente da nomenclatura empregada, o agregado sintético é produzido a partir de argila plástica especial com teor reduzido ou inexistente de cal. Também ressalta que a argila é submetida a um processo de secagem e sinterização em fornos rotativos, operando em temperaturas de 1100 a 1300°C. Durante o aquecimento, o gás é liberado dentro dos agregados e permanece aprisionado neles durante o resfriamento. A queima dos materiais orgânicos resulta na liberação de gases que promovem a expansão da argila, resultando em agregados porosos leves e com alta resistência mecânica. Estudos demonstraram que as pelotas de agregado sintético podem expandir-se até 5-6 vezes por volume, apresentando um formato redondo

devido ao movimento circular do forno rotativo (RASHAD, 2018).

Estudos de várias aplicações de sucesso de agregado sintético como um material de preenchimento geotécnico na década de 1980, incluindo a reabilitação de um terminal portuário fluvial e a construção de uma ponte. Devido à sua granulometria e natureza leve, o agregado sintético apresenta facilidade em seu transporte, preenchimento e manuseio. Durante o processo de sinterização, os poros podem ser totalmente fechados dentro de uma determinada partícula ou expostos à sua superfície externa. A superfície da partícula do agregado sintético tende a ser mais resistente que o interior devido à sinterização da argila expandida em um material do tipo cerâmico (GAO, 2021).

O agregado sintético é um material versátil utilizado em várias aplicações, como por exemplo na construção civil, onde pode ser empregado na produção de blocos leves, concreto pré-moldado, bem como em aterro estrutural de fundações, pisos de sítios de telecomunicações, subestações, ornamentações e etc. Pesquisas também mostraram que o agregado pode ser utilizado para o tratamento de água, na remoção de fluoranteno, fenantreno e pireno. Dentro da horticultura ou campo agrícola, pode ser usado para o tratamento de águas residuais, devido à sua alta capacidade de remover numerosos poluentes, como sólidos suspensos totais, polifenóis e nitrogênio, pesticidas e produtos farmacêuticos. Atualmente, há um número considerável de publicações relacionadas à utilização do agregado sintético na construção civil. Essas publicações se concentram no uso do agregado sintético como substituto parcial ou total aos agregados de peso normal, proporcionando uma maior trabalhabilidade ao material resultante (RASHAD, 2018).

o agregado de argila expandida apresenta grande versatilidade, e a literatura especializada mostra que esse tipo de agregado tem sido utilizado em estudos para a produção de concretos leves. Isso porque o uso do agregado sintético traz benefícios, como tornar a construção mais segura, econômica e com menor impacto ao meio ambiente. Outros autores também se dedicaram a estudar a influência dos tamanhos dos agregados na trabalhabilidade e na resistência dos concretos (NAHHAB, 2019).

4 ARTIGO 1- USO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO PARA A PRODUÇÃO DE AGREGADOS GRAÚDOS PARA A FABRICAÇÃO DE CONCRETO

RESUMO

O resíduo de bauxita, também conhecido como lama vermelha, é um subproduto do processo de beneficiamento da bauxita pelo método Bayer, gerado em grandes volumes e com significativos desafios ambientais. Para minimizar seus impactos, este estudo propõe a produção de agregados graúdos sintéticos (AGS) a partir desse resíduo, visando à sua aplicação em concreto estrutural de cimento Portland. O processo de produção envolveu uma etapa preliminar e três ciclos de otimização, com testes para avaliar a composição química, a densidade aparente, a granulometria, o índice de forma, a absorção de água, a resistência mecânica e a durabilidade. No terceiro ciclo, os agregados alcançaram conformação geométrica satisfatória, resistência adequada e boa durabilidade, embora a absorção de água ainda precise ser reduzida. Os resultados demonstram o potencial desse material como uma alternativa sustentável para a substituição de agregados naturais, contribuindo para a redução dos impactos ambientais da mineração.

Palavra-chave: Agregado sintético graúdo; resíduo de bauxita; ciclos de produção, testes.

ABSTRACT

The bauxite residue, also known as red mud, is a byproduct of the bauxite beneficiation process through the Bayer method, generated in large volumes and with significant environmental challenges. To minimize its impacts, this study proposes the production of synthetic coarse aggregates (SCA) from this residue, aiming for its application in Portland cement structural concrete. The production process involved a preliminary step and three optimization cycles, with tests for evaluating chemical composition, bulk density, granulometry, shape index, water absorption, mechanical strength, and durability. In the third cycle, the aggregates achieved satisfactory geometric conformation, adequate strength, and good durability, although water absorption still needs to be reduced. The results demonstrate the potential of this material as a sustainable alternative for the substitution of natural aggregates, contributing to the reduction of environmental impacts from mining.

Key Word: Synthetic coarse aggregate; bauxite residue; production cycles, tests.

4.1 INTRODUÇÃO

A exploração dos recursos naturais provoca a escassez de matérias-primas, o que impulsiona a busca por materiais alternativos, sustentabilidade limpa e técnicas de reciclagem de resíduos (Oliveira e Rossi, 2012). Dessa forma, há a necessidade de se buscar soluções alternativas viáveis e econômicas na indústria da construção civil como forma de superar as limitações dos recursos naturais e reutilizar os resíduos nocivos ao meio ambiente (Albuquerque, 2007).

A Amazônia brasileira possui uma das maiores e mais diversificadas reservas minerais do planeta, e o estado do Pará é o principal estado minerador da Amazônia, onde o setor mineral é responsável por 40% das exportações e 12% do Produto Interno Bruto do estado (ALCOA, 2024).

A indústria de extração mineral ocupa uma posição significativa como uma das indústrias mais vitais da região, gerando efeitos econômicos e sociais substanciais em escala nacional. No entanto, seus efeitos ambientais levam a um impacto negativo nas áreas onde a mineração é realizada (ALCOA, 2024).

Segundo Bertocchi et al. (2006) o resíduo de bauxita pertence a um grupo de materiais residuais conhecidos como "rejeitos", que resultam do beneficiamento de minérios pela indústria de extração mineral. Esses resíduos são solos que antes continham o mineral de interesse ou resultam da moagem de rochas. Dependendo do processo de extração, podem ser adicionadas substâncias químicas, como a soda cáustica, que é usada no refino de alumina (NBR 10004-1, 2024).

Para Ribeiro (2008) e Venâncio (2013), um dos maiores desafios enfrentados pelo setor de beneficiamento de bauxita é o descarte ambientalmente adequado dos resíduos gerados durante o processo de clarificação, conhecido como resíduo de bauxita. Rosário (2013) destaca que esse resíduo requer grandes áreas para armazenamento, e o tratamento dessas áreas (lagoas de deposição) é muito caro e a construção de uma bacia de armazenamento requer um investimento de aproximadamente US\$ 8,3 milhões

Existem 85 plantas de produção de alumina em todo o mundo, com uma geração média de resíduos de bauxita de aproximadamente 1,2 tonelada de resíduo de bauxita por tonelada de alumina produzida. Anualmente, são geradas 169 milhões de toneladas desse resíduo em todo o mundo, com cerca de 2,5 bilhões de toneladas armazenadas atualmente (TSAKIRIDIS, 2004) (GUO et al., 2018).

Esse campo de estudo ganhou impulso globalmente nas últimas décadas, pois tanto o setor público quanto empresas privadas expressam entusiasmo pelas descobertas feitas nessa área. Sendo que a reciclagem de resíduos é uma medida crucial e indispensável para mitigar os impactos ecológicos causados por grandes processos de fabricação industrial (SANTOS, 2019) (CUNHA E CORRÊA, 2011).

Foi comprovado que o resíduo de bauxita tem grande potencial como matéria-prima quando combinado com misturas de sílica e argila para produzir agregados graúdos sintéticos. Essa ideia surgiu da necessidade crescente de reduzir e, eventualmente, eliminar o uso de agregados graúdos naturais em aplicações de concreto. Ela apresenta uma alternativa interessante para diminuir a exploração e o uso de agregados naturais.

Esta pesquisa confirma a viabilidade técnica do uso de resíduos de bauxita para a fabricação de agregados graúdos, especialmente para aplicações em concreto estrutural. Também enfatizar a fabricação de três tipos diferentes de agregados, variando apenas a porcentagem de resíduo utilizada em cada composição, e por produzir agregados com formato semelhante ao da pedra britada disponível comercialmente e utilizada na construção civil. Outro ponto forte do estudo é a demonstração detalhada das etapas do processo de produção, visando uma

compreensão clara e objetiva para o leitor.

Inicialmente, foram produzidas 25 amostras, com diferentes quantidades de resíduo e tempos de sinterização. Com base em análises específicas de caracterização, o processo avançou para uma segunda etapa, denominada primeiro ciclo de produção, na qual foram testados quatro tipos de amostras com variações tanto na porcentagem de resíduo quanto no tempo de sinterização. No terceiro estágio, ou segundo ciclo de produção, a variação foi apenas na porcentagem de resíduo utilizado, mantendo-se uma temperatura de sinterização constante de 1200 °C.

Foi necessário um terceiro estágio, ou terceiro ciclo de produção (a fase atual), para ajustar a conformação geométrica dos três tipos de agregados e corrigir a alta porosidade e o índice de vazios observados no AGS90. Isso exigiu um aumento na temperatura de sinterização para 1250 °C, resultando em uma aparência mais escura em comparação com o AGS70 e o AGS80, que foram produzidos a 1200 °C e mantiveram uma cor mais avermelhada.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a produção do agregado graúdo sintético, foram utilizadas três matérias-primas: argila caulínica, adquirida no polo industrial cerâmico de São Miguel do Guamá-PA, extraída com autorização dos órgãos ambientais competentes; sílica (areia com baixa concentração de ferro), adquirida no mercado da construção civil em Belém-PA; e resíduo de bauxita (BR), fornecido pela empresa HYDRO em Barcarena-PA e armazenado no Laboratório de Engenharia Civil da UFPA.

A argila, a sílica e o resíduo de bauxita foram secos em uma estufa com recirculação de ar a uma temperatura de 105 °C por 24 horas para remover o excesso de umidade e evitar a formação de fissuras no agregado. Eles também foram desagregados em um moinho de bolas, modelo WORK INDEX série 005, seguido de um moinho de discos por 30 minutos. Esses processos são necessários para obter um melhor controle granulométrico, usando partículas menores que 0 µm (Mörtel e Heimstadt, 1994). É importante observar que a sílica tem uma morfologia esférica e uma alta área de superfície quando o diâmetro da partícula é menor que 150 µm, o que aumenta a eficiência das reações de sinterização (Souza, 2010).

As fases da pesquisa envolveram inicialmente um processo primário, seguido de três processos de aprimoramento, que correspondem a três ciclos de produção. O objetivo deste estudo é indicar a viabilidade técnica do uso desses agregados graúdos sintéticos em concreto estrutural.

Tabela 6 - Porcentagem de resíduo, temperatura e tempo de sinterização das amostras de agregados - estágio preliminar.

Amostra	Resíduo de bauxita (%)	Sílica (%)	Argila (%)	Biomassa (%)	Cal (%)	Temperatura (°C)	Tempo (h)
C1	60	15	25	-	-	1250	3
C2	60	15	15	10	-	1250	3
C3	70	-	25	5	-	1250	3
C4**	60	15	25	-	-	1250	3
C5	70	10	15	-	5	1250	3
C6	60	20	15	-	5	1250	3
C7	80	15	5	-	-	1250	3
C8	70	-	30	-	-	1250	3
C9	80	15	5	-	-	1200	2
C10	60	15	20	-	5	1250	3
C11	75	15	5	-	5	1250	3
C12	75	15	5	-	5	1250	0,5
C13	75	15	5	-	5	1200	3
C14*	75	15	5	-	5	1250	3
C15	60	15	25	-	-	1225	3
C16	70	10	15	5	-	1250	3
C17	70	30	-	-	-	1200	3
C18*	70	15	10	-	5	1250	3
C19*	70	15	10	-	5	1225	3
C20*	70	15	10	-	5	1200	3
C21*	70	15	10	-	5	1150	3
C22*	80	10	5	-	5	1200	3
C23*	85	5	5	-	5	1150	3
C24*	80	5	5	-	10	1150	3
C25*	77,5	15	5	-	2,5	1150	3

Após a preparação cuidadosa das matérias-primas, o processo experimental para a produção de vinte e cinco tipos de amostras foi iniciado com a mistura das matérias-primas — resíduo de bauxita, sílica, argila, carvão vegetal como biomassa e cal — identificadas como C1 a C25, conforme mostrado na Tabela 6. Posteriormente, as amostras foram submetidas a tratamento e homogeneização em um moinho de bolas por 30 minutos. Após a homogeneização, as amostras foram colocadas em um tambor rotativo seco e em uma extrusora contínua para formar os agregados em pelotas. Posteriormente, os pellets foram secos em um forno a 105 °C por 24 horas antes de serem sinterizados em diferentes temperaturas e durações.

Os agregados sintéticos sinterizados usando o método de tambor rotativo são mostrados na Figura 14, com diâmetros que variam entre 0,5 e 1,5 cm.



Figura 14 - Aparência dos agregados sintéticos peletizados após a sinterização.

A Figura 14 destaca as amostras após o processo de sinterização concluído, o que representa o fechamento dos poros associado à resistência mecânica dos agregados. A eficiência das reações de estado sólido é responsável pela formação da mulita e da fase vítrea. Essas interações podem ser controladas por meio de ajustes na granulometria das matérias-primas, na temperatura e no tempo de sinterização e na formulação da matriz (Mörtel e Heimstadt, 1994; Souza, 2010).

Os ensaios de lixiviação das amostras foram realizados acordo com a NBR 10005 (2004) para observar e prever o comportamento dos agregados quando submetidos a agentes lixiviantes naturais. Já os ensaios de solubilização, utilizou os requisitos dispostos na NBR 10004-1 (2024). As análises foram realizadas utilizando as quantidades de 80 e 90% de resíduo de bauxita nas amostras, a fim de avaliar o comportamento do pH e também a concentração de sódio presentes após o processo de sinterização nas temperaturas de 1200 e 1250°C, cujos resultados apresentaram uma concentração máxima de sódio de 17,60 (ppm) conforme apresenta a Tabela 7.

Tabela 7 - Resultado dos ensaios de lixiviação de acordo com a norma NBR 10005 (2015).

Amostra	Massa (g)	pH inicial	pH final	Concentração de sódio (ppm)	Temperatura (°C)
90-10	98,20	6,18	6,98	17,60	1200
90-10	97,87	6,22	6,91	15,03	1200
90-10	99,85	6,21	7,31	11,80	1200
90-10	98,76	6,45	6,79	9,98	1200
80-20	107,62	6,59	7,6	7,40	1250
80-20	101,09	6,41	7,12	6,10	1250
80-20	100,65	7,12	6,9	4,30	1250
80-20	99,98	6,78	6,91	4,26	1250

Os ensaios de solubilização demonstraram claramente um pH estável, mesmo em períodos

prolongados de exposição em extração aquosa (7 dias). A Tabela 8 apresenta os resultados das amostras sinterizadas nas temperaturas de 1200 °C e 1250 °C com valores de pH menores que 8,0. Esses resultados confirmam a viabilidade da produção de agregados sintéticos de resíduo de bauxita em concentrações superiores a 80%, mantendo os padrões de segurança em relação ao conteúdo de NaOH, de acordo com os limites exigidos pelas normas de lixiviação e solubilização.

Tabela 8 - Resultado dos ensaios de solubilização de acordo com a norma NBR 10004-1 (2024)

Amostra	Massa (g)	pH inicial	pH final	Temperatura (°C)
90-10	249,67	7,35	7,90	1200
80-20	250,06	7,26	7,89	1250
70-30	249,56	7,21	7,61	1250

.As amostras também foram submetidas à análise de difração de raios X (DRX), e os resultados indicaram a presença de minerais de quartzo, hematita, mulita e nefelina. A mulita, por sua vez, foi encontrada em todas as amostras, tendo sido identificada por meio de seus picos característicos. A quantidade de mulita formada parece estar associada a um aumento na resistência mecânica dos materiais cerâmicos. Estudos realizados por Souza (2010) demonstraram que a redução do teor de quartzo está associada ao aumento da formação de mulita.

A Figura 15 apresenta as análises de DRX das amostras contendo de 60% a 80% de resíduo de bauxita, correspondentes a C1 a C15, que foram sinterizadas em temperaturas entre 1225 °C e 1250 °C. A realização de análises em diferentes temperaturas de sinterização teve como objetivo verificar a influência dessa variável na formação de novas fases minerais.

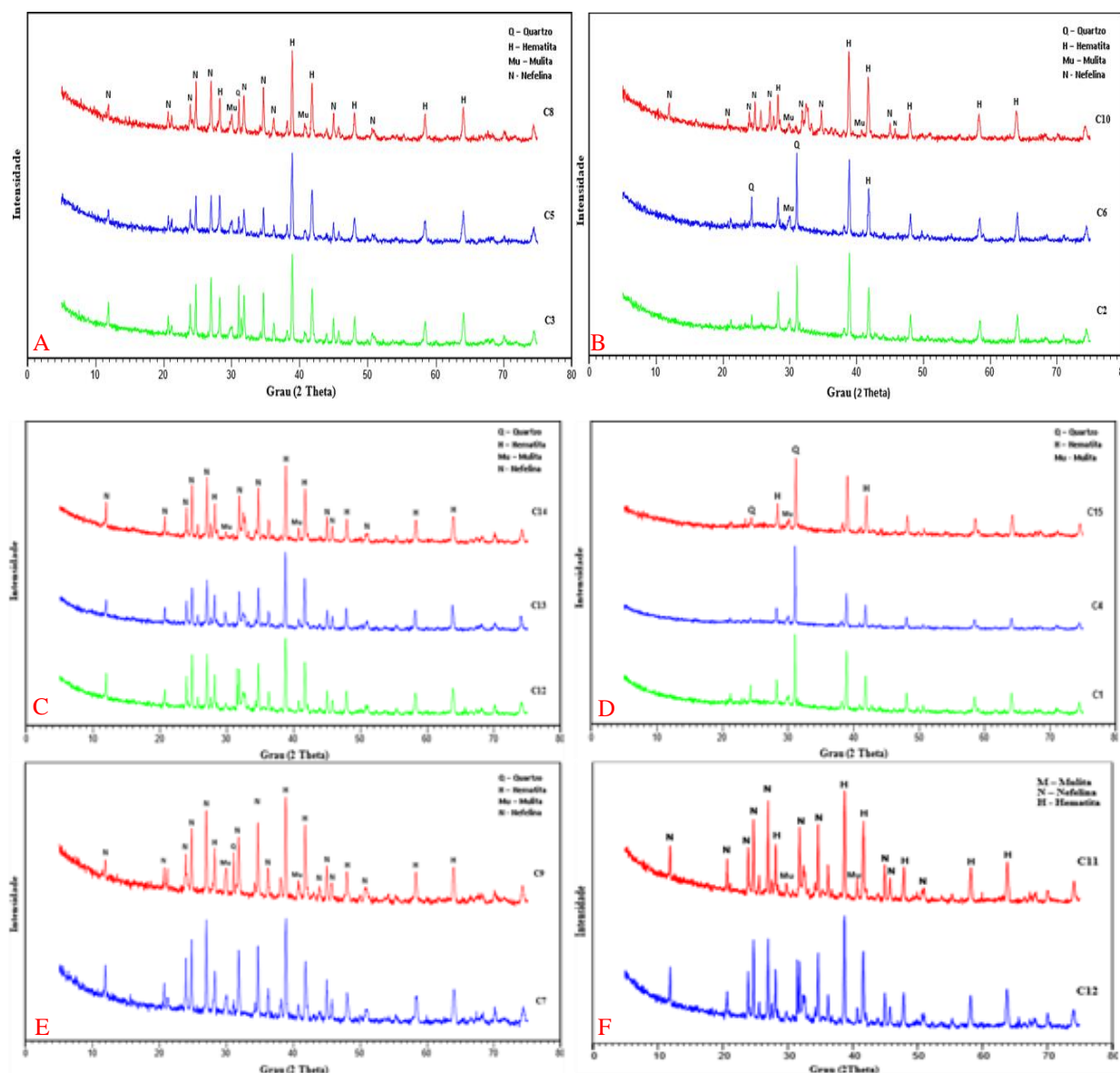


Figura 15 - Padrão de difração de raios X das amostras C1 a C15.

Conforme demonstrado no painel D da Figura 15, o padrão de difração indica a presença de minerais de quartzo, hematita e mulita. Na amostra C15, mesmo em uma temperatura de sinterização mais baixa em comparação com as outras amostras, o comportamento das fases cristalinas é semelhante ao de C1 e C4, sem alterações significativas nos picos das amostras. No painel B, a amostra C2 foi influenciada pela biomassa durante o processo de sinterização, a amostra C10 pela cal e a amostra C6 pela sílica nas transformações mineralógicas. A amostra C6 apresentou um pico de quartzo mais intenso, o que sugere que parte da sílica na amostra não reagiu para formar novas fases. Ao comparar a influência da cal e da biomassa na composição, observa-se que a cal teve um impacto maior na formação de novas fases, como a nefelina.

Em tal circunstância, os óxidos de cálcio e magnésio contidos na cal exercem a função de fundentes durante o processo de sinterização, resultando na formação de uma fase vítrea de baixa viscosidade, o que facilita o crescimento das fases cristalinas. Além disso, durante o tratamento térmico do resíduo de bauxita, devido a uma quantidade considerável de óxidos de sódio e silício, formam-se espécies $\text{Na}_5\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{15}$, precursoras da nefelina (Viegas, 2020). Isso pode ser confirmado pela análise dos painéis C a E, onde as amostras contêm 70% ou mais de resíduo de bauxita em sua composição, com a nefelina como fase predominante. Os padrões de difração das amostras C3, C5 e C8, que contêm 70% de resíduo e foram sinterizadas a 1250 °C, são apresentados no painel A. Essas amostras contêm 25%, 15% e 30% de argila, respectivamente. Além disso, é possível observar certa similaridade entre as fases formadas pelas amostras, embora haja algumas diferenças nas intensidades dos picos de quartzo, hematita, mulita e nefelina.

No painel D, as amostras C12, C13 e C14, que compartilham a mesma composição de matéria-prima, mas foram submetidas a diferentes temperaturas e durações (1250 °C por 0,5h, 1200 °C por 3 h e 1250 °C por 3h, respectivamente), são cuidadosamente avaliadas para compreender como essas variáveis influenciam as transformações minerais. Com base nos resultados de difração de raios X, foi observado um aumento na formação de nefelina com o aumento da temperatura, conforme indicado pela maior intensidade de pico nas amostras C12 e C14. Em relação ao tempo de sinterização, não foram observadas diferenças significativas na intensidade do pico entre as amostras C12 e C14, o que sugere a possibilidade de reduzir a duração da sinterização. No painel 5, são analisados os padrões de difração das amostras C7 e C9, que têm a mesma composição de matéria-prima, mas foram sinterizadas a 1250 °C por 3 horas e a 1200 °C por 2 horas, respectivamente. Foi observada uma maior formação de mulita na amostra C7, o que resultou em picos mais intensos. No painel F, os padrões de difração das amostras C11 (0,5 hora) e C12 (3 horas), que têm a mesma composição de matéria-prima, foram comparados para avaliar a influência do tempo de sinterização na formação de novas fases. Com base nos resultados obtidos, não foram observadas mudanças significativas entre as duas amostras, embora os picos relacionados à fase nefelina tenham apresentado pequenas diferenças ao comparar os dois padrões de difração. Isso sugere a possibilidade de reduzir o tempo de sinterização e, ao mesmo tempo, manter as características mineralógicas do material.

A Figura 16 apresenta as análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para as amostras de agregados de C1 a C15, de acordo com as características de composição, temperatura e tempo de sinterização mostradas na Tabela 6.

A análise de MEV foi necessária para observar as formações de fase no agregado durante a sinterização, como a fase vítrea e a mulita. A mulita, por sua vez, é comumente encontrada em minerais cerâmicos, geralmente na forma de flocos e agulhas. Ela se origina de fases compostas, como a alumina e a sílica do caulim, com a forma primária aparecendo como flocos. A mulita que se cristaliza a partir de fases fundidas ou de baixa viscosidade, formando estruturas semelhantes a agulhas, é chamada de mulita secundária. Quando derivada da caulinita, ela aparece como estruturas em forma de agulha em temperaturas acima de 1200 °C, dependendo do nível de impurezas presentes ou da assistência de fases fundidas (Souza, 2010).

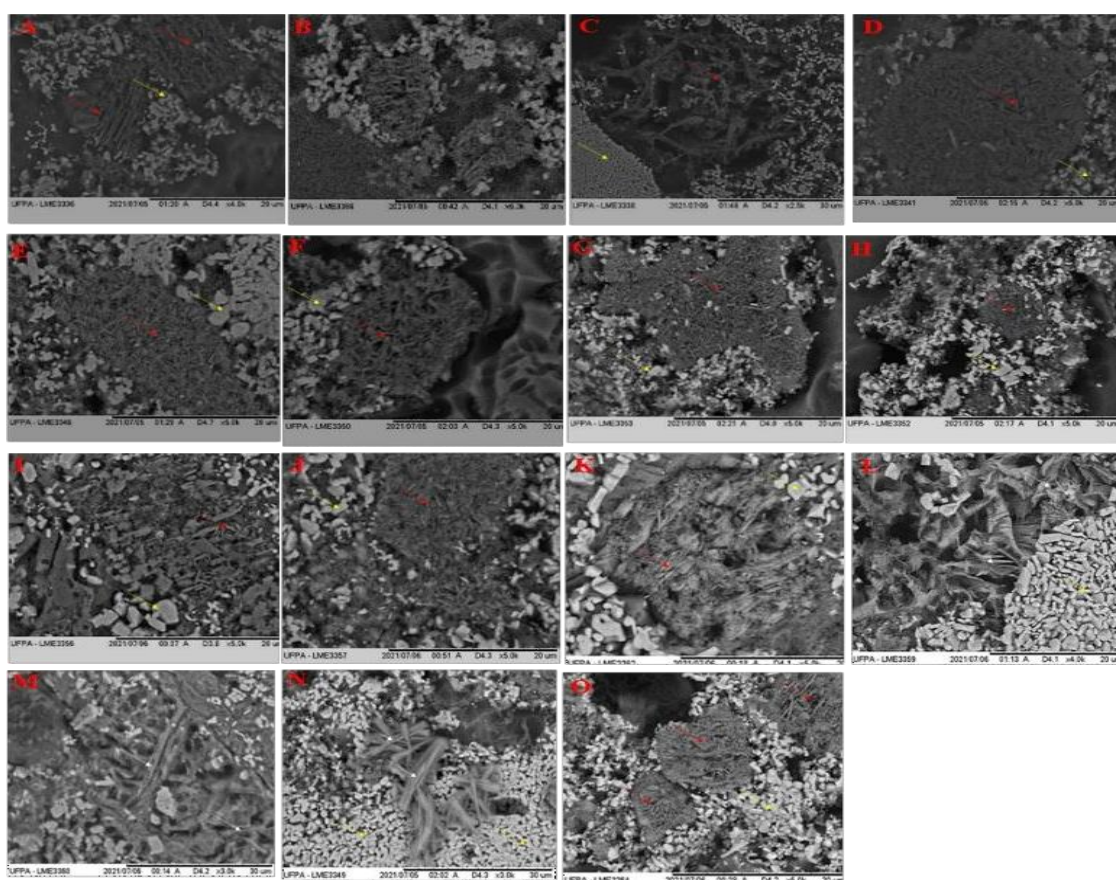


Figura 16 - Microscopia eletrônica de varredura das amostras C1 a C15. a) C1 com aumento de 4000x. b) C2 com aumento de 5000x. c) C3 a 2500x. d) C4 a 5000x. e) C5 a 5000x. f) C6 a 5000x. g) C7 a 5000x. h) C8 a 5000x. i) C9 a 5000x. j) C10 a 5000x. k) C11 a 5000x. l) C12 a 4000x. m) C13 a 3000x. n) C14 a 3000x. o) C15 a 5000x. Seta branca: fase não identificada; Seta amarela: fase vítrea.

Os resultados preliminares da microscopia eletrônica de varredura indicaram a presença de mulita secundária com uma morfologia acicular. Essa formação ocorre em processos pós-reativos por meio de reações de estado sólido ou decomposição térmica. Além disso, no caso de misturas estequiométricas de pós de alumina e sílica, a formação de mulita ocorre entre as temperaturas de 1400 e 1800 °C. No entanto, quando se trata de resíduos de bauxita, essa temperatura pode ser reduzida devido à presença de óxidos fundentes, que formam uma fase

vítrea de baixa viscosidade, facilitando o crescimento e a formação de cristais secundários de mulita.

Após o estágio preliminar de produção e a partir dos melhores resultados obtidos nos ensaios de lixiviação, DRX e MEV das vinte e cinco amostras, um novo estágio de produção se fez necessário, sendo denominado de primeiro ciclo de produção. Nesta fase, foram produzidos quatro tipos de agregados graúdos sintéticos, identificados como A1, A2, A3 e A4, conforme Figura 17. Essas amostras apresentavam formas arredondadas e percentual de resíduo de bauxita na seguinte proporção: A1, com 60%; A2, com 85%; A3, com 85%; e A4, com 80%. As amostras A2 a A4 continham as maiores quantidades de resíduo de bauxita, aumentando sua reutilização sem comprometer as características físicas ou o potencial de aplicação, conforme apresentado na Tabela 9.



Figura 17 - Amostras do primeiro estágio do processo de produção do AGS. Amostras designadas como A1, A2, A3 e A4.

Tabela 9 - Composição, temperatura e tempo de sinterização das amostras de agregados - primeiro ciclo de produção.

Amostra (% resíduo incorporado)	Sílica (%)	Argila (%)	Cal (%)	Temperatura (°C)	Tempo (h)
A1 60	15	25	-	1250	3
A2 85	10	5	-	1150	3
A3 85	10	5	-	1200	3
A4 80	15	5	-	1200	3

Com o objetivo de aumentar o consumo de resíduo de bauxita e a escala de produção de agregados, alguns ajustes foram feitos no processo, visando uma produção de 350 kg/semana de agregado. Estes ajustes resultaram em um novo ciclo de produção, denominado segundo

ciclo de produção, com as amostras identificadas de AGS70, AGS80 e AGS90, conforme demonstrado na Tabela 10.

Tabela 10 - Composição, densidade aparente, temperatura e tempo de sinterização das amostras de agregados- segundo ciclo.

Amostra	Resíduo de bauxita (%)	Sílica (%)	Argila (%)	Massa específica (g/cm ³)	Temperatura (°C)	Tempo (h)
AGS70	75 - 70	20 - 25	5	< 1,5	1200	3
AGS80	85 - 80	10 - 15	5	> 1,5 e < 2,0	1200	3
AGS90	95 - 90	0 - 5	5	> 2,0	1200	3

As amostras de agregados apresentadas na Tabela 10 são baseadas nos resultados obtidos no primeiro ciclo de produção, que demonstraram claramente que é possível produzir agregados sintéticos em diferentes proporções de matérias-primas (resíduo de bauxita, sílica e argila) e, principalmente, de acordo com as especificações dos agregados utilizados comercialmente (leve, normal e pesado). Além disso, nesta etapa mais ajustada, a utilização das amostras AGS70, AGS80 e AGS90 já visava o aumento da escala de produção destes agregados e, proporcionalmente, o consumo de resíduo de bauxita.

É importante destacar que o controle na produção dessas amostras foi realizado com precisão por meio das faixas de composição, densidade aparente, temperatura e tempo de sinterização. Isso garante a conformidade com a legislação para potencializar a comercialização do produto. Os valores de densidade aparente foram controlados para produzir agregados semelhantes aos usados comercialmente. A Figura 18 mostra os aspectos físicos dos agregados graúdos sintéticos no segundo estágio de produção.

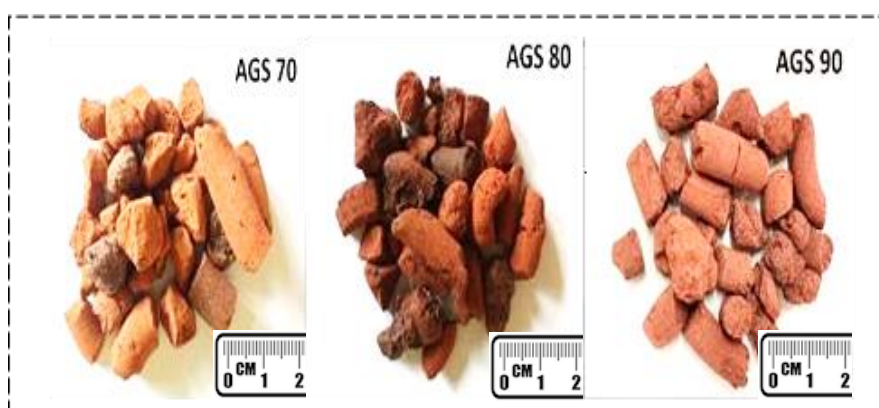


Figura 18 - Amostras do segundo estágio do processo de produção do AGS. Amostras designadas como AGS70, AGS80 e AGS90.

Nesta etapa da pesquisa, o AGS70 apresentava as seguintes características: diâmetro máximo de 19,0 mm, módulo de finura de 7,37, índice de forma de 1,39, perda por abrasão (Los

Angeles) de 31,0% e absorção de água de 2,60%. Já o AGS80 apresentava um diâmetro máximo de 19,0 mm, módulo de finura de 6,71, índice de forma de 1,77, perda por abrasão (Los Angeles) de 38,0% e absorção de água de 8,12%. Já o AGS90 apresentava um diâmetro máximo de 19,0 mm, um módulo de finura de 6,55, um índice de forma de 1,61, uma perda por abrasão (Los Angeles) de 42,2% e uma absorção de água de 11,35%.

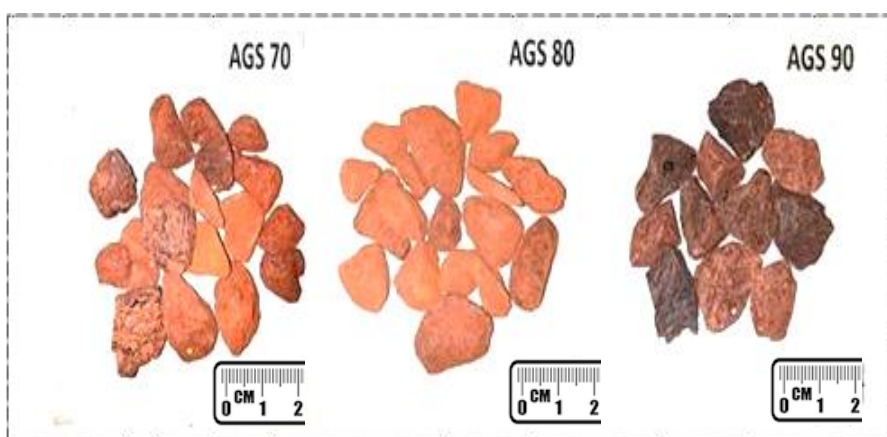


Figura 19 - Amostras do segundo estágio do processo de produção do AGS. Amostras designadas como AGS70, AGS80 e AGS90.

O consumo de resíduo de bauxita e a escala de produção dos agregados precisavam ser mantidos conforme descrito na etapa anterior. Por isso, foram feitos alguns ajustes no processo, principalmente para reduzir a porosidade do AGS90 e adequar o formato dos agregados para que tivessem uma aparência menos cilíndrica e mais lamelar (Figura 19). Esses ajustes alteraram a massa específica dos agregados e aumentaram a temperatura de sinterização do AGS90, conforme mostrado na Tabela 11.

Tabela 11 - Composição, densidade aparente, temperatura e tempo de sinterização das amostras de agregados- terceiro ciclo.

Amostras	Resíduo de bauxita (%)	Sílica (%)	Argila (%)	Massa específica (g/cm ³)	Temperatura (°C)	Tempo (h)
AGS70	75 - 70	20 - 25	5	2,21	1200	3
AGS80	85 - 80	10 - 15	5	2,26	1200	3
AGS90	95 - 90	0 - 5	5	2,41	1250	3

Nesta fase da pesquisa (atual), conforme mostrado na Figura 16, o AGS70 tem um diâmetro máximo de 19,0 mm, um módulo de finura de 1,95, um índice de forma de 2,07, uma perda por abrasão (Los Angeles) de 41,06% e uma absorção de água de 6,50%. O AGS80 tem um diâmetro máximo de 19,0 mm, um módulo de finura de 1,66, um índice de forma de 2,08, uma perda por abrasão (Los Angeles) de 43,94% e uma absorção de água de 5,24%. O

AGS90 tem um diâmetro máximo de 19,0 mm, um módulo de finura de 1,84, um índice de forma de 1,99, uma perda por abrasão (Los Angeles) de 27,41% e uma absorção de água de 3,20%.

A Tabela 12 resume os ensaios de caracterização realizados, conforme a norma NBR 7211 (2022), conduzidos no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LeMaC) e no Laboratório de Concreto (LaCon) do Laboratório de Construção Civil da Universidade Federal do Pará.

Tabela 12 – Ensaios de caracterizações realizadas e normas técnicas que descrevem a metodologia.

Norma utilizadas nos ensaios de caracterização	laboratório
Agregados para concreto- Requisitos (NBR7211/2022)	LeMaC
Agregados- Amostragem (NM 26/2009)	LeMaC
Índice de forma de agregado graúdo pelo método do paquímetro (NBR 7809/2019)	LeMaC
Ensaio de reação álcali- agregado (NBR 15774/2018)	LeMaC
Durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio e de magnésio (DNIT 446/2024-ME)	LeMaC
Abrasão Los Angeles NM 51/2001)	LaCon
Determinação do material fino que passa na peneira 75 µm (NM 46/2001)	LeMaC
Determinação da composição granulométrica, módulo de finura e dimensão máxima característica (NBR 248/2001)	LeMaC
Determinação da massa específica, massa aparente e absorção de água (NM 53/2009)	LeMaC
Determinação da massa unitária no estado solto do agregado graúdo (NM 45/2006)	LeMaC
Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis (NBR 7218/2010)	LeMaC

Os agregados do terceiro ciclo foram produzidos no Laboratório de Engenharia Química, com uma produção de 100 kg para cada amostra de AG70, AGS80 e AGS90. Não houve uma classificação prévia desses agregados quanto à granulometria de acordo com a NBR 7211 (2022). As amostras foram quarteadas conforme estabelecido pela NM 26 (2009) e as alíquotas foram peneiradas a seco, de modo a delimitar o tamanho das partículas, variando de 4,75 mm a 19,0 mm.

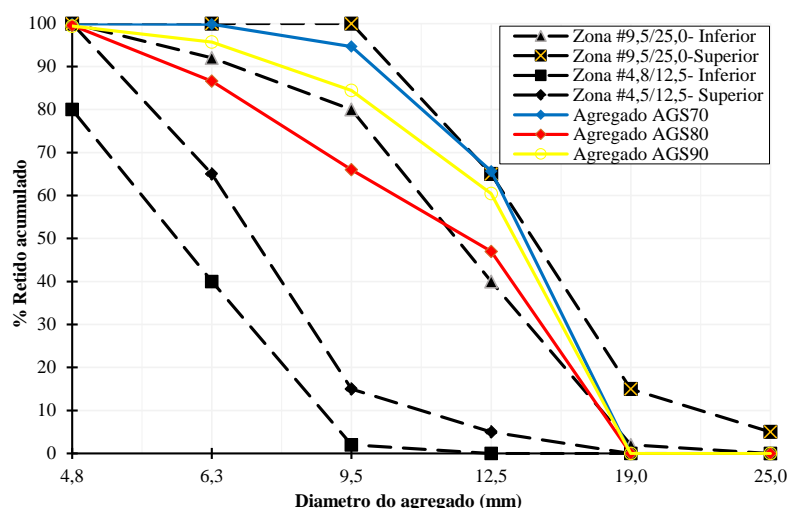


Figura 20 - Distribuição granulométrica das amostras AGS70, AGS80 e AGS90 do terceiro ciclos de produção.

A Figura 20 mostra a distribuição granulométrica das amostras do terceiro ciclo de produção (estágio atual da pesquisa), ajustadas de acordo com a norma NBR 7211 (2022). Os resultados obtidos a partir das curvas granulométricas mostraram claramente que o AGS70 e o AGS90 estavam totalmente dentro da faixa granulométrica de #4,8-19,0mm, enquanto o AGS80 não tinha partículas suficientes para se enquadrar na faixa granulométrica entre as peneiras de #6,3-9,5mm. Todos os três tipos estudados apresentaram curvas granulométricas bem distribuídas, o que os torna adequados para uso na produção de concreto de cimento Portland. A granulometria desses agregados é classificada como graúda, segundo a NBR 7211 (2022). De acordo com Souza (2010), não existe uma granulometria ideal para um determinado agregado, pois o objetivo geral é alcançar um equilíbrio entre os requisitos físicos e econômicos. Uma distribuição granulométrica equilibrada resulta em misturas de concreto mais trabalháveis e econômicas, além de uma massa de concreto mais compactada, reduzindo o volume de vazios e, conseqüentemente, os espaços por onde agentes potencialmente agressivos poderiam penetrar no concreto. Entre os demais estudos utilizados como base para este trabalho, apenas Rossignolo (2009) e Reis (2014) apresentaram resultados referentes à distribuição granulométrica do resíduo de bauxita. No entanto, é importante ressaltar que há uma lacuna significativa de informações sobre o assunto, como mostram os resultados obtidos por (SOUZA et al., 2019).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os agregados graúdos sintéticos produzidos e disponibilizados pelo Laboratório de Engenharia Química para o Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, não foram classificados e separados por diâmetro para melhor distribuição em faixas

granulométricas. Também, verificou-se que uma quantidade de amostras estimada em menos de 1% do total apresentaram algum tipo de defeito de produção, seja por impregnação de material refratário proveniente do forno elétrico ou por aglutinação entre as “pedras”, conforme mostra a Figura 21. No entanto, esta condição não foi considerada um problema sério para escala produtiva.



Figura 21 - Exemplo de não conformidade na amostra AGS90.

Santos et al. (2014) diz que a massa específica dos agregados derivados de rochas comumente usados na construção, varia de $2,60 \text{ g/cm}^3$ a $2,70 \text{ g/cm}^3$, enquanto que as massas unitárias são na ordem de $1,38 \text{ g/cm}^3$ a $1,58 \text{ g/cm}^3$. Para serem classificados como leves, os agregados devem ter um valor de massa específica aparente (MEA) inferior a 2 g/cm^3 . As normas europeias, por outro lado, estabelecem que os agregados leves, destinados ao uso em concreto e argamassa, devem ter uma massa unitária inferior a $1,20 \text{ g/cm}^3$ e uma massa específica não superior a $2,0 \text{ g/cm}^3$ (NBR 12655, 2022).

A massa específica dos agregados graúdos foi avaliada somente a partir do segundo ciclo de produção. Os AGS 70 e AGS80 apresentaram massa específica normal, acima de $2,0 \text{ g/cm}^3$, e o AGS90, massa específica leve, abaixo de $2,0 \text{ g/cm}^3$, conforme demonstrado na Figura 22. No entanto, devido à forma geométrica insatisfatória dos agregados (Figura 18), foi necessário um terceiro ciclo de produção (forma geométrica atual) para ajustar a conformação geométrica, conforme a Figura 19. Os resultados do terceiro ciclo foram excelentes, com melhorias significativas tanto na classificação das massas específicas como normais, variando entre $2,21 \text{ g/cm}^3$ e $2,41 \text{ g/cm}^3$, quanto nas massas unitárias, variando entre $1,23 \text{ g/cm}^3$ e $1,44 \text{ g/cm}^3$ (Figuras 22 e 23). Além disso, houve avanços notáveis na conformação da geometria dos agregados (Figura 19). 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. Nesse contexto, os fornos rotativos são apontados como os mais adequados para garantir a distribuição adequada e homogênea da temperatura, otimizando o processo de produção e reduzindo o gasto de energia.

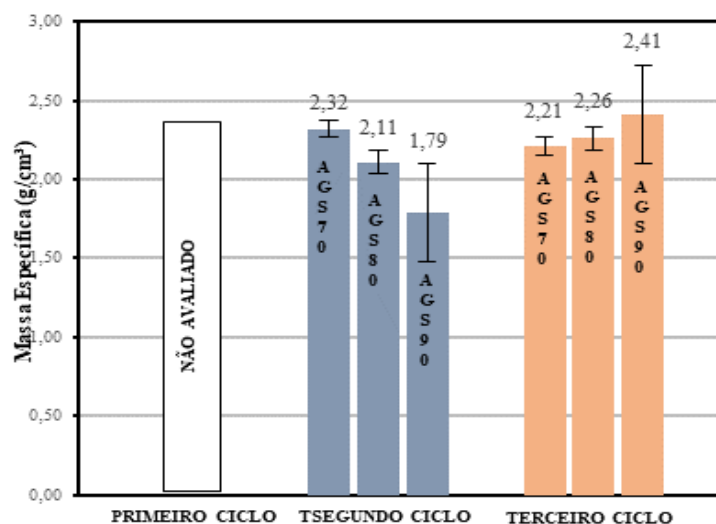


Figura 22 - Massas específicas médias das amostras ensaiadas.

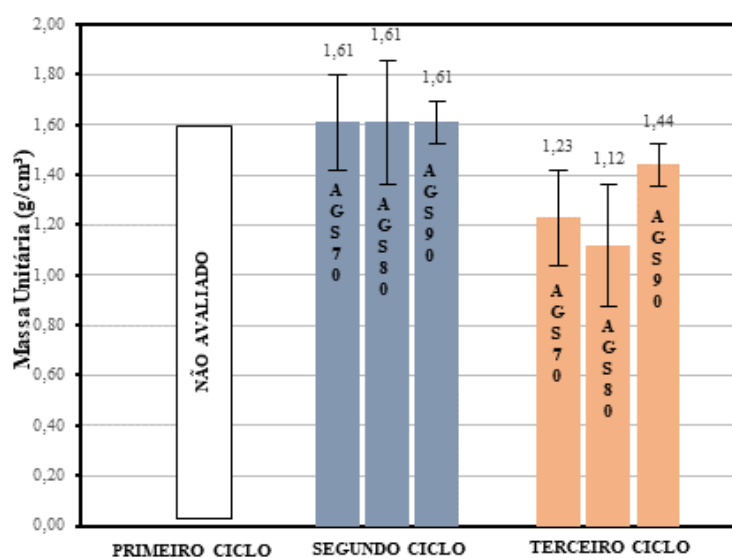


Figura 23 - Massa unitária média das amostras ensaiadas.

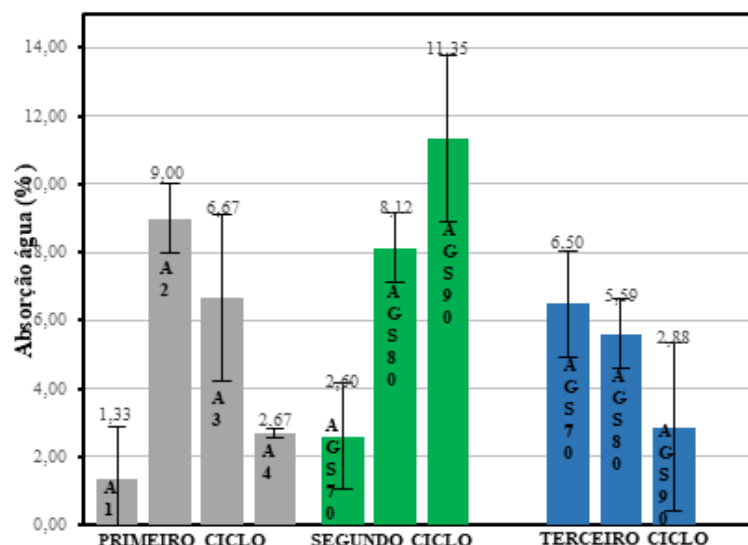


Figura 24- Resultados médios dos testes de absorção de água.

Alguns autores explicam que a capacidade de absorção de água dos agregados e a velocidade com que esse fenômeno ocorre dependem de fatores como a porosidade total, a conectividade dos poros, as características da superfície do agregado e o teor de umidade do agregado antes da mistura (Mehta e Monteiro, 2014). Normalmente os agregados comerciais apresentam absorção de água, após 24 horas de imersão, inferior a 20% (Tuan et al., 2013) e de acordo com outros autores a morfologia do agregado desempenha um papel significativo no controle da absorção de água, pois quando um agregado tem uma estrutura de poros mais interconectada, ele absorve mais água em comparação com um material com poros isolados e uma superfície vítrea (Tuan et al., 2013). Outra questão levantada por esses autores diz respeito à temperatura de queima, que 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. Quanto maior for a porcentagem de porosidade do material, maior será sua capacidade de absorção de água. Duas condições adversas são destacadas em relação à alta porcentagem de absorção de água dos agregados no concreto. A primeira é negativa, pois agregados excessivamente porosos são diretamente prejudiciais ao concreto endurecido, causando problemas como retração devido à secagem, aumento da massa específica e redução da resistência ao fogo (Rossignolo, 2009). O segundo é positivo, trazendo benefícios como a melhoria das propriedades da zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento, reduzindo o efeito parede e melhorando a cura interna.

A Figura 24 mostra os resultados dos testes de absorção de água para os três ciclos de

produção ao longo do processo de aprimoramento, tanto em termos de conformação da amostra quanto de redução da porosidade. As amostras testadas no terceiro ciclo apresentaram taxas de absorção entre 2,88% e 6,50%. Portanto, nessa etapa, os agregados já atendiam aos limites estabelecidos pela norma NBR 7211 (2022). Entretanto, ainda não estavam correlacionados com os resultados encontrados na literatura especializada para os agregados produzidos a partir de rochas, que normalmente apresentam absorção de água entre 1% a 2%. As propriedades de absorção de água dos agregados influenciam diretamente as condições do concreto no estado fresco, bem como o processo de hidratação do cimento.

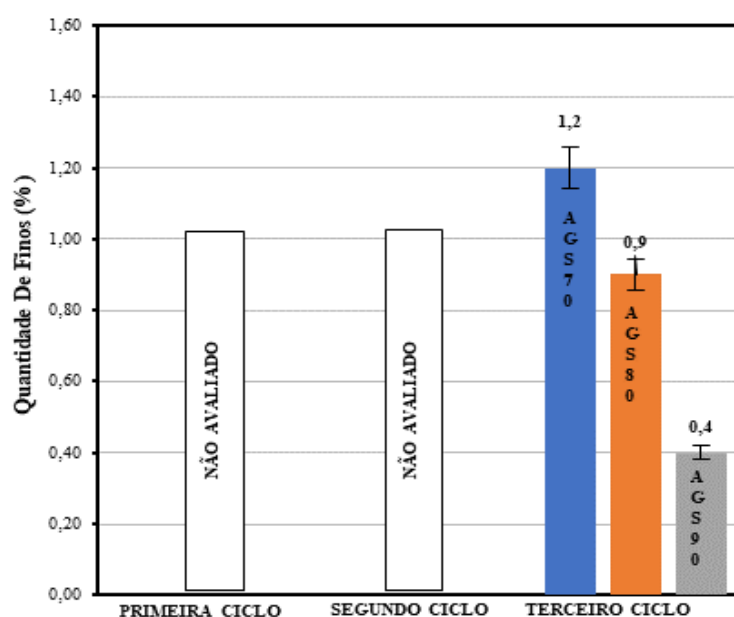


Figura 25 - Resultados médios da quantidade material fino passante na peneira de 75 µm por lavagem.

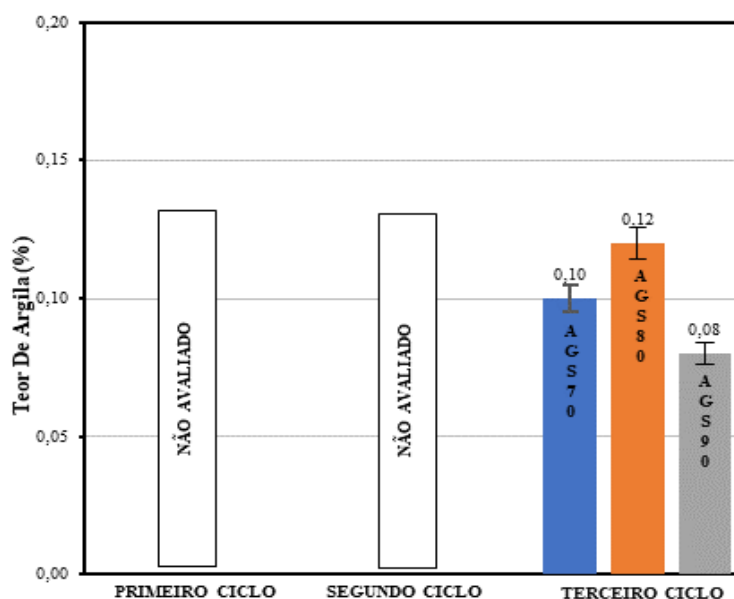


Figura 26 - Resultados médios de torrões argila e materiais friáveis presentes nas amostras.

Os torrões de argila e os materiais friáveis alteram as características granulométricas dos agregados graúdos e reduzem a resistência do próprio agregado e do concreto feito com ele (Mehta e Monteiro, 2014). Agregados com altos teores de torrões de argila e materiais friáveis podem causar modificações na aparência do concreto, podendo levar a manchas em sua superfície. A porcentagem de torrões de argila e materiais friáveis nos agregados não deve exceder 3,0% (NBR 7211, 2022). Somente no terceiro ciclo de produção foram avaliadas a porcentagem de material fino (Figura 25) e a presença de torrões de argila e materiais friáveis (Figura 26). A análise mostrou que todas as amostras testadas foram aprovadas, pois os valores obtidos para material fino variaram de 0,4% a 1,20%, e para materiais friáveis e torrões de argila, variaram de 0,08% a 0,12%.

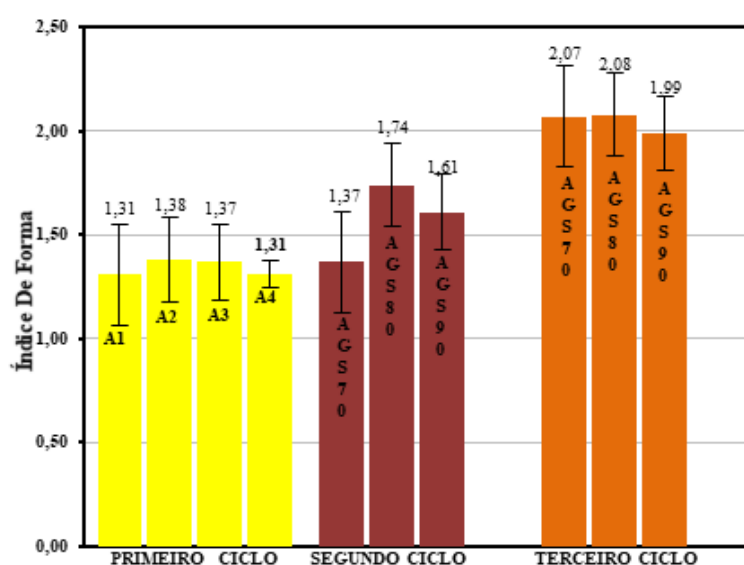


Figura 27 - Resultados dos ensaios de índice e forma dos agregados graúdos pelo método do paquímetro.

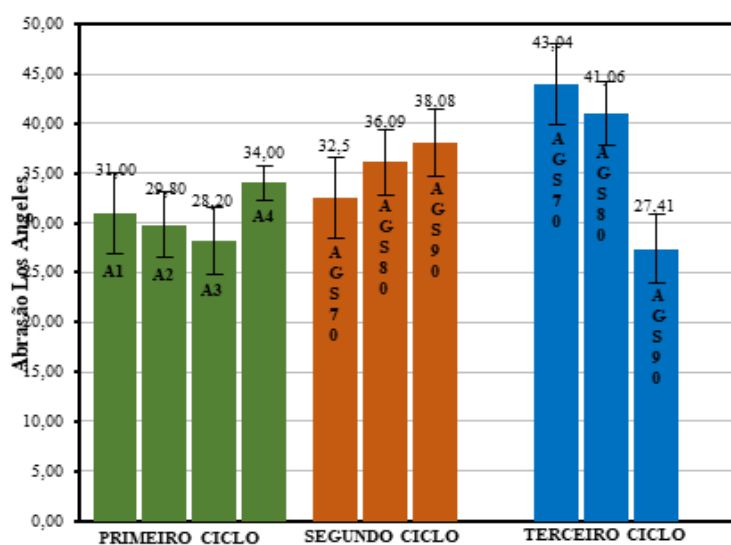


Figura 28 - Resultados dos Índices médios de desgaste por abrasão Los Angeles.

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. Essa forma garante o intertravamento do agregado graúdo quando compactado, aumentando assim sua resistência ao cisalhamento. No entanto, a NBR 7211 (2022) afirma que o índice de forma de um agregado graúdo, determinado de acordo com a NBR 7809 (2016), não deve ser superior a 3, permitindo agregados com formato lamelar. A Figura 27 apresenta os índices de forma médios encontrados para as amostras testadas. Para o estágio atual da pesquisa, o resultado considerado é o do terceiro ciclo, onde é possível observar que todas as amostras ficaram abaixo do limite regulamentar, atendendo, assim, aos padrões exigidos.

Seguindo os mesmos critérios utilizados anteriormente para analisar o índice de forma, e observando os resultados obtidos no terceiro ciclo de produção em relação à absorção de água (Figura 24), é importante notar que os agregados altamente porosos são tipicamente mais frágeis, tornando-os inadequados para a produção de concreto estrutural. A Figura 28 apresenta os resultados médios do índice de abrasão de Los Angeles, realizado de acordo com a norma NM 51 (2001), em que as amostras analisadas apresentaram resistência à abrasão entre 27% e 43,94%. 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 a absorção de água dos agregados, maior a perda de massa pelo ensaio de abrasão. Além disso, os resultados obtidos nesta pesquisa demonstraram que os agregados graúdos são adequados para uso na produção de concreto para diversos fins, uma vez que a abrasividade está diretamente relacionada à compressão axial e à durabilidade. Nesse caso, as amostras testadas apresentaram desempenho superior em relação aos seixos de leito de rio, que são agregados comumente utilizados no norte do país, pois normalmente apresentam valores de perda por abrasão mais elevados, em torno de 50%.

Foram realizados testes de durabilidade para avaliar qualitativamente a condição dos agregados, por meio de testes de reação de agregados alcalinos, testes de resistência a sulfato e difração de raios X, com o objetivo principal de garantir que os agregados de terceiro ciclo não contenham condições que limitem seu uso na produção de cimento Portland.

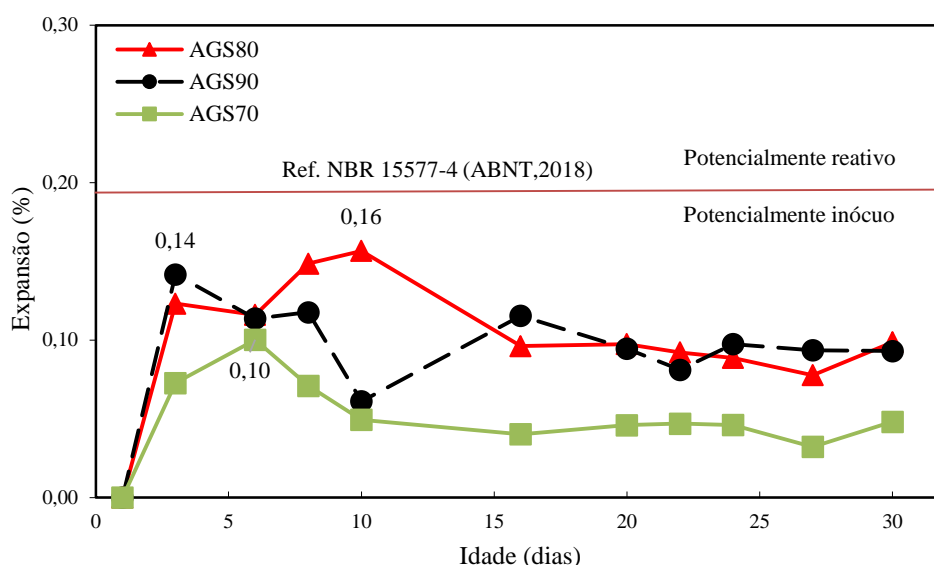


Figura 29 - Resultados dos testes de reação álcali-agregado pelo método acelerado.

Os ensaios foram realizados de acordo com os critérios estabelecidos pela NBR15577-4 (2018) e o cimento escolhido foi o tipo CP IV devido à alta quantidade de pozzolana incluída na composição. O gráfico da Figura 29 mostra o comportamento da expansão da argamassa em um período de 30 dias, e os resultados indicaram qualitativamente que os agregados sintéticos produzidos a partir do resíduo de bauxita em diversos teores, nas condições indicadas no terceiro ciclo, não apresentam potencial de reatividade com os álcalis do cimento estudado, ou seja, são inertes.

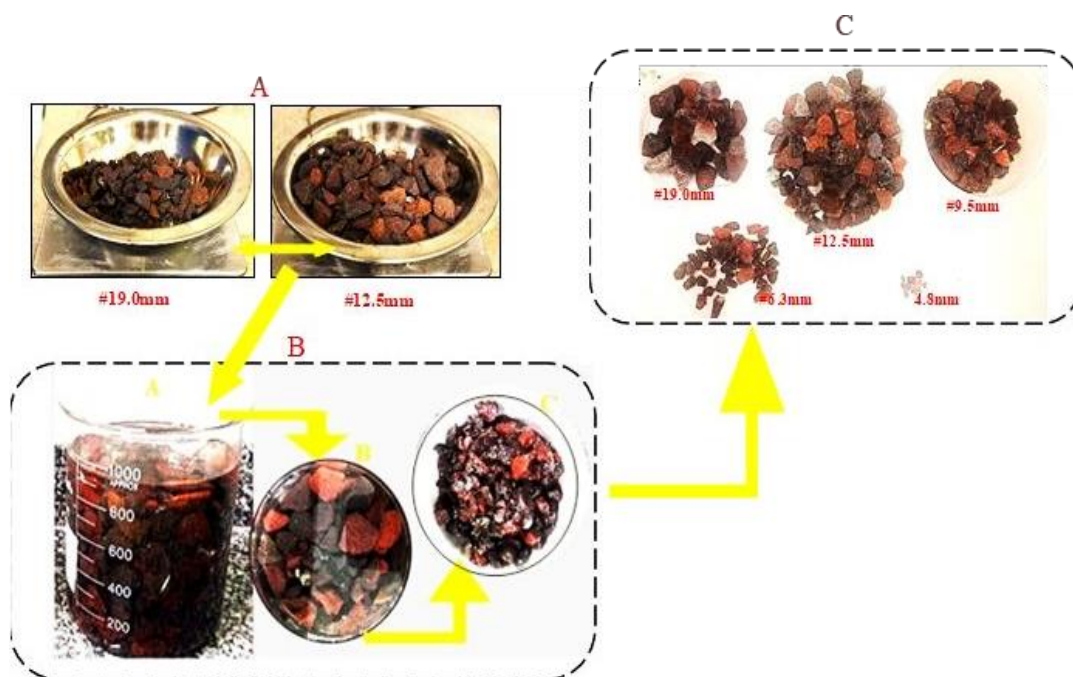


Figura 30 - Ensaio de avaliação de durabilidade do AGS90 de terceiro ciclo de produção. A) amostra inicial seca retida nas peneiras #19,0mm e #12,5mm. B) Detalhe da amostra imersa em solução NaSO₄ (a,b), aspecto após passar pelo quinto ciclo (c) e C) amostra final seca fragmentada e retida nas peneiras #19,0mm a #4,8mm.

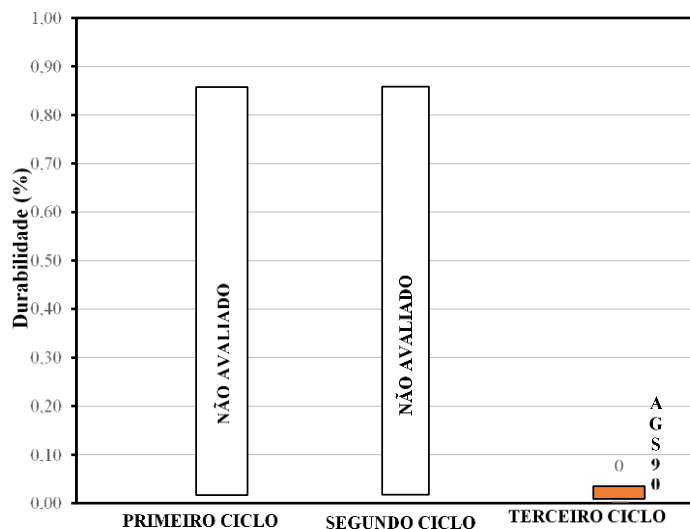


Figura 31 - Resultados dos ensaios de durabilidade do agregado de acordo com a DNIT 446/2024-ME.

Figura 30 traz um resumo das etapas de lavagem dos agregados com soluções de sulfato de sódio e cloreto de bário para o AGS90 do terceiro ciclo de produção, seguindo um processo dividido em cinco ciclos, conforme recomendação do DNIT 446- ME (2024) para determinar a resistência dos agregados ao longo do tempo. O AGS90 foi escolhido para representar os agregados do terceiro ciclo devido à sua maior porcentagem de resíduo em sua composição.

Os limites máximos permitidos para os resultados desse teste de durabilidade, de acordo com a DNER 037- ME (1997), não devem apresentar uma perda superior a 12%. A amostra testada não apresentou desintegração quando exposta a esses sulfatos, com um índice de durabilidade para desintegração de 0,00%, conforme mostrado na Figura 31.

Além disso, foi realizada uma análise importante usando a difração de raios X no AGS90 do terceiro ciclo de produção para identificar as fases minerais nessa amostra. O resultado obtido é apresentado na Figura 32 e será analisado posteriormente.

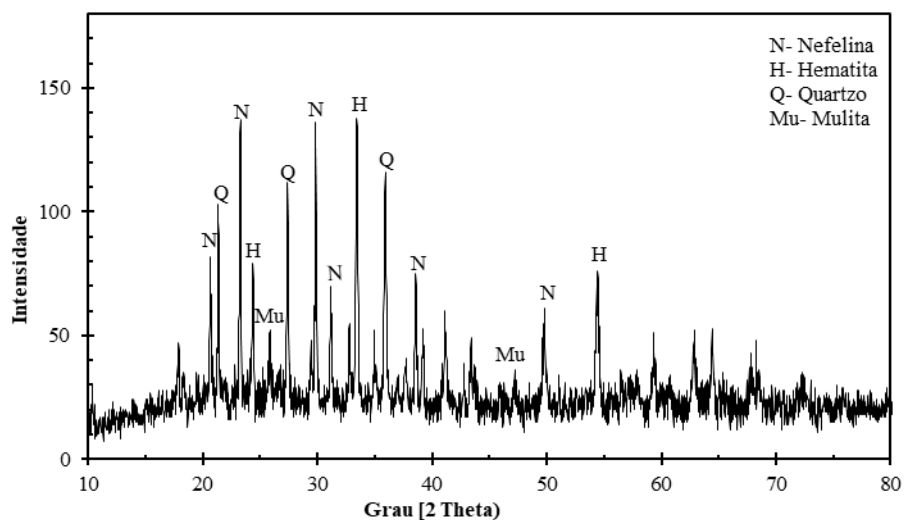


Figura 32 - Identificação mineral do agregado sintético AGS90 por difração de raios X (DRX).

Com base nos resultados de difração de raios X (DRX), os principais picos identificados são Nefelina ($(\text{Na K})\text{AlSiO}_4$ ou Feldspato, Hematita ou Sodalita ($\text{Na}_4\text{Al}_3\text{SiO}_4\text{Cl}$), Calcita ou Rutilo (CaCO_3), seguidos por picos de Quartzo (SiO_2), que indicam uma condição estável para a amostra produzida. Além disso, por meio dos picos de menor intensidade, também foi observada a presença de minerais como ferro e zeólita. Essa configuração gráfica sugere que uma quantidade significativa de material amorfo está presente, e suas fases minerais representam um composto inerte. Essa é uma condição altamente satisfatória para um agregado grosso sintético.

Para validar a caracterização química do agregado grosso sintético, a Tabela 13 apresenta os resultados obtidos por meio da análise de fluorescência de raios X para os principais óxidos.

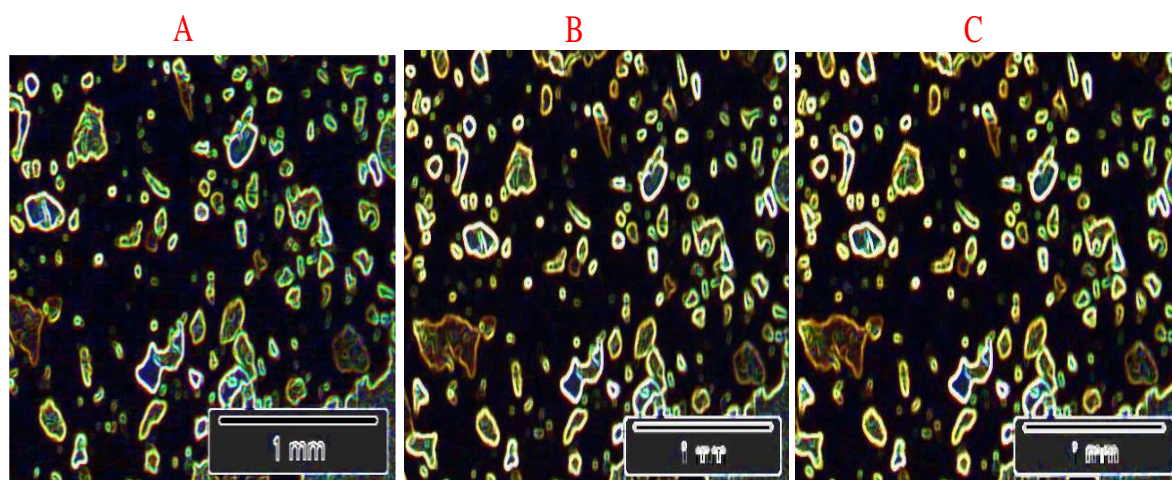
Tabela 13 – Caracterização química do agregado graúdo sintético por FRX.

Composto	Concentração m/m (%)
SiO_2	28,74
TiO_2	5,42
Al_2O_3	21,29
Fe_2O_3	31,7
MnO	0,14
MgO	0,12
CaO	1,23
Na_2O	9,08
K_2O	0,14
P_2O_5	0,11
SO_3	0,28
LOI	0,99

Com base nos resultados obtidos no teste de Fluorescência de Raios X, houve predominância de óxidos de silício (SiO_2), com 28,74%, seguidos de óxidos de alumínio (Al_2O_3), com 21,29%, óxidos de sódio (Na_2O), com 9,08%, e óxidos de titânio (TiO_2), com 9,08%. Também é importante destacar a presença de elementos como óxido de potássio (K_2O), óxido de manganês (MnO) e óxido de magnésio (MgO), que podem contribuir para que o produto seja considerado expansivo.

De acordo com os resultados de DRX, os principais picos identificados são de calcita (CaCO_3), seguidos por picos de quartzo (SiO_2), o que garante uma condição estável para a amostra produzida. Além disso, é necessário observar que, por meio de picos de intensidades mais baixas, também foi identificada a presença dos seguintes minerais: ferro e zeólita. Assim, essa configuração gráfica indica a presença de uma grande quantidade de material

amorfo, e suas fases minerais são representadas como um composto inerte. Essa condição é muito satisfatória para um agregado graúdo sintético.



Nota: Área escura: Resíduo de bauxita. Os particulados são a presença de areia (sílica) e argila.

Figura 33 - Imagens através de microscópio óptico das amostras do terceiro ciclo de produção (A/B/C- AGS 70/80/90 respectivamente) através de luz polarizada (imagem com tratamento artístico).

Nas imagens obtidas por meio de um microscópio óptico com luz polarizada com tratamento artístico, conforme mostrado na Figura 33, destaca-se a distribuição dos materiais constituintes dos agregados graúdos sintéticos do terceiro ciclo de produção. As áreas escuras nas imagens representam a ocupação do resíduo, e as demais partículas são seções de areia de sílica e partículas de argila. Também é possível observar nas imagens do quadro C, que quanto maior o uso de resíduo de bauxita, menor a densificação de sílica na amostra, o que representa um desafio, pois a sílica contribui diretamente para a vitrificação do material, garantindo a redução da porosidade e o aumento da resistência mecânica e do módulo de elasticidade. No entanto, como critério de compensação, o AGS90 foi sinterizado a uma temperatura de 1250 °C, resultando em uma diferença de 50 °C em relação ao AGS70 e ao AGS80 para aumentar a vitrificação do material.

4.4 CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo explorar a produção de agregados graúdos sintéticos (AGS) utilizando resíduos de bauxita da empresa de mineração Hydro em Barcarena-PA. O processo foi otimizado em três etapas, com foco na forma geométrica, massa específica, resistência mecânica e durabilidade dos agregados. No estágio final, foram produzidos agregados com percentuais de resíduo entre 70% e 95%, em temperaturas que variaram de 1200 °C a 1250 °C. Os testes físicos e mecânicos confirmaram que os agregados do segundo ciclo atenderam à maioria dos parâmetros normativos (NBR 7211, 2022), com exceção da absorção de água do

AGS90, que ultrapassou 10%, tornando-o inadequado para concreto estrutural. Para melhorar essas propriedades, foi realizado um terceiro ciclo, que resultou em melhor conformação geométrica e melhor desempenho, principalmente na abrasão de Los Angeles.

Os testes de durabilidade, incluindo soluções de sulfato de sódio e cloreto de bário e testes de reação álcali- agregado (RAA), confirmaram que o agregado graúdo de resíduo de bauxita não apresenta um potencial reativo aos álcalis do cimento, indicando sua adequação para uso em concreto de fundação. Os agregados do terceiro ciclo atenderam plenamente aos padrões relevantes e apresentaram os melhores resultados em abrasão, índice de forma e absorção de água.

4.5 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à HYDRO, à agência brasileira de financiamento CAPES e ao PPGECC pelas bolsas de mestrado e doutorado, que foram essenciais para a conclusão deste estudo. Além disso, expressamos nossa gratidão ao LEC e ao LEQ (Laboratórios de Engenharia Civil e Química Universidade Federal do Pará), ao laboratório de análises da CPRM e à UNIFESP por permitirem algumas das análises realizadas nesta pesquisa.

4.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

OLIVEIRA, DRCDE, ROSSI, CRC. Concretos com agregados graúdos de lama vermelha. **Materials Research**, V. 15, N. 3, P. 333-340, maio 2012.

ALBUQUERQUE, NG. **Estudo das propriedades mecânicas de concretos dosados com agregados produzidos a partir de lama vermelha**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). UFPA - Departamento De Engenharia Civil, 2007.

ALCOA (2024). <https://www.Alcoa.Com/Brasil/Pt>.

BERTOCCHI, AF, GHIANI, M., PERETTI, R. & ZUCCA, A. Red Mud and Fly Ash for Remediation of Mine Sites Contaminated with as, Cd, Cu, Pb And Zn (Lama vermelha e cinzas volantes para remediação de minas contaminadas com As, Cd, Cu, Pb e Zn). **Journal of Hazardous Materials**. 134, 112-119, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**. Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004-1**. Resíduos Sólidos- Classificação. ABNT, 2024.

RIBEIRO, D.V & MORELLI, MR. Estudo da viabilidade da utilização do resíduo de bauxita como adição ao cimento Portland. **In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Pernambuco, 2008.

VENÂNCIO, L. C. A. **Desenvolvimento de unidade piloto de transferência de massa gás/líquido: redução da reatividade do resíduo da indústria de alumina através de reação com gases de combustão**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil, 2013.

ROSÁRIO, KA. **Concreto com utilização de agregado graúdo sintético produzido a partir da lama vermelha: estudos de dosagem, propriedades e microestrutura**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil, 2013.

TSAKIRIDIS, PE, AGATZINI-LEONARDOU, S., OUSTADAKIS, P. Red mud addition in the raw meal for the production of Portland cement clinker. **Journal Of Hazardous Materials**. 103-110, 2004.

GUO, T., YANG, H., LIU, Q., HANNIAN, G., WANG, N., YU, W., & DAI, Y. Adsorptive removal of phosphate from aqueous solutions using different types of red mud. **Water Sci. Technol**. 2017, 570-577, 2018.

SANTOS, DH. **Influência da sílica e temperatura nas propriedades físicas dos agregados sintéticos produzidos com resíduo do processo Bayer**. (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil, 2019.

CUNHA, MVPO & CORRÊA, JAM. Síntese e caracterização de hidróxidos duplos a partir da lama vermelha (synthesis and of layered double hydroxides from red mud). **Revista Cerâmica**, 57, 85- 93, 2011.

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). Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil, 2010.

MÖRTEL, H., HEIMSTADT, K. MIKROBIELLE WERKSTOFFZERSTÖRUNG. Simulation, schadensfälle und gegenmaßnahmen für anorganische nichtmetallische werkstoffe: keramik. **Materials And Corrosion**, 45(2), Pp. 128-136, 1994.

VIEGAS, B. M. *et al.* A Influência da temperatura nas transformações de fases dos minerais presentes na lama vermelha: redução da hematita à magnetita. **Matéria** (Rio de Janeiro), V. 25, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7211**. Agregados para concreto – requisitos: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 26**. Agregados: Amostragem: ABNT: 2009.

ROSSIGNOLO, J. A. Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações. **Pini**, 2009.

REIS, A. W. **Caracterização mineralógica do agregado obtido a partir da lama vermelha do processo bayer**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil, 2014.

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

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

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

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.

TUAN, B. L. A., HWANG, C. L., LIN, K. L., CHEN, Y. Y., & YOUNG, M. P. Development of lightweight aggregate from sewage sludge and waste glass powder for concrete (desenvolvimento de agregado leve de lodo de esgoto e pó de vidro residual para concreto). **Construction And Building Materials**, 47, 334-339, 2013.

BORBA VQ, SANTOS AA. **Projeto de base drenante realizado de acordo com a especificação técnica der/SP et-dep00/008**. Trabalho de Conclusão de Curso. Criciúma: Universidade Do Extremo Sul Catarinense. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7809**. Agregados Graúdo. Determinação Do Índice De Forma Pelo Método Do Paquímetro: Método De Ensaio: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 51**. Agregado Graúdo: ensaio de abrasão "los Angeles": ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-4**. Agregados: Ensaio De Reação Álcali- Agregado: ABNT, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE. **DNIT 446/**. Agregado: avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou magnésio - método de ensaio: ME, 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER 037**. Agregado Graúdo Para Concreto De Cimento. ME, 1997.

5 ARTIGO 2- AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO TOTAL DO AGREGADO GRAÚDO NATURAL POR AGREGADO GRAÚDO DE RESÍDUO DE MINERAÇÃO NA PRODUÇÃO DE CONCRETO ESTRUTURAL DE CIMENTO PORTLAND: PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

RESUMO

A 30ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP 30) está programada para ocorrer em 2025, na região da Amazônia brasileira, mais precisamente na cidade de Belém, no estado do Pará. Este estudo integra um amplo projeto de cooperação de pesquisas entre a Universidade Federal do Pará e a empresa Hydro. O objetivo é claro: propor soluções que mitiguem os impactos ambientais decorrentes da atividade mineradora no Pará. A proposta é produzir, de forma otimizada, agregados graúdos sintéticos de resíduo de bauxita e utilizá-los para a confecção de concreto de resistência normal de classe C30. Essa pesquisa complementa o estudo de Fernandes, R.S. et al. (2025), em que foram abordados os estágios de produção de alguns tipos de agregados graúdos com utilização de resíduo da bauxita. A partir dos resultados obtidos de caracterizações físicas, químicas e mecânicas dos agregados graúdos do terceiro ciclo de produção, optou-se por utilizar apenas o tipo de agregado com maior percentual de resíduo em sua composição, denominado AGS90. O agregado graúdo sintético passou a se chamar AGS, enquanto o natural, usado como referência, passou a se chamar AGN. O AGS possui maior porosidade que o AGN, e isso resulta em um concreto mais poroso, com mais vazios. Ao analisar as resistências mecânicas e o módulo de elasticidade em todas as idades estudadas (7, 28, 91 e 277 dias) e comparar com o concreto de referência (CAGN), observa-se que os resultados obtidos são semelhantes. A análise da microestrutura do concreto por MEV confirma a boa qualidade do compósito.

Palavra-chave: Agregado graúdo sintético; resíduo da bauxita; concreto, ensaios, microestrutura e módulo do agregado.

ABSTRACT

The 30th United Nations Climate Change Conference (COP 30) is scheduled to take place in 2025 in the Brazilian Amazon region, more precisely in the city of Belém, in the state of Pará. This study is part of a broad research cooperation project between the Federal University of Pará and Hydro. The aim is clear: to propose solutions that mitigate the environmental impacts of mining activities in Pará. The proposal is to produce, in an optimized way, synthetic aggregates from bauxite residue and use them to make normal strength concrete of class C30. This research complements the study by Fernandes, R.S. et al. (2025), in which the production stages of some types of coarse aggregates using bauxite residue were discussed. Based on the results obtained from the physical, chemical and mechanical characterizations of the coarse aggregates from the third production cycle, it was decided to use only the type of aggregate with the highest percentage of residue in its composition, called AGS90. The synthetic aggregate was renamed AGS, while the natural aggregate, used as a reference, was renamed AGN. AGS has greater porosity than AGN, which results in a more porous concrete with more voids. When analyzing the mechanical strengths and modulus of elasticity at all the ages studied (7, 28, 91 and 277 days) and comparing them with the reference concrete (CAGN), it can be seen that the results obtained are similar. Analysis of the concrete's microstructure by SEM confirms the composite's good quality.

Key words: Synthetic coarse aggregate; bauxite residue; concrete, tests, microstructure and aggregate modulus.

5.1 INTRODUÇÃO

A 30ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP 30) em 2025, a ser realizada na Região da Amazônia brasileira, especificamente na cidade de Belém, Pará, Brasil por se tratar de um grande evento destinado a discutir a problematização do clima em âmbito global. Desperta na comunidade científica iniciativas que promovam a redução da pegada ecológica e o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis. De forma específica, surge uma proposição de substituição de agregados graúdos naturais por agregados provenientes de resíduos de mineração que se alinha diretamente com este Evento, constituindo um foco central deste estudo: verificar a viabilidade da utilização deste agregado graúdo produzido a partir do resíduo de bauxita na produção de concreto do tipo estrutural que se utiliza em obras de construção civil na região Amazônica Brasileira.

O agregado graúdo sintético de resíduo de bauxita produzido é um subproduto da produção de minério de bauxita, que atingiu aproximadamente 2,8 bilhões de toneladas no mundo em 2022, com o estado do Pará contribuindo com 45% da produção nacional brasileira. Esse agregado graúdo sintético foi utilizado como substituto do agregado graúdo, tradicionalmente representado pela brita.

A exploração dos recursos naturais causa uma escassez de matéria-prima que alimenta a busca por alternativas de materiais, sustentabilidade limpa e técnicas de reciclagem de resíduos (Oliveira & Rossi, 2012). Desta forma, vê-se a necessidade de buscar soluções alternativas viáveis e econômicas na indústria da construção civil como meio de contornar as limitações dos recursos naturais e reutilizar rejeitos que são prejudiciais ao meio ambiente (Albuquerque, 2007).

Neville, 1997 ressalta que $\frac{3}{4}$ do volume do concreto são ocupados por agregados, fazendo com que se espere uma qualidade significativa desses materiais. As propriedades dos agregados afetam diretamente a durabilidade e o desempenho estrutural do concreto, além de limitar a resistência que se pode atingir com uma dosagem, pois ocorre a ruptura direta da rocha antes mesmo de aparecerem constatações de rompimento na pasta (Weizenmann, R.N., 2017).

Como o uso do agregado graúdo sintético pode ser destinado principalmente ao consumo em concreto de obras da construção civil em grande quantidade, será uma forma de destinar parte do resíduo da bauxita que é estocada em lagoas e sistemas de contenção para uso direto, reciclando uma grande quantidade deste material para a fabricação de agregado graúdo com elevado teor do resíduo caracterizando uma alternativa viável para redução dos impactos

ambientais, reduzindo a extração de materiais utilizados como agregado da natureza (SOUZA, et al., 2019).

Atualmente, a Universidade Federal do Pará realiza diversos estudos, em parceria com a empresa HYDRO, visando dar destinação sustentável ao resíduo de bauxita proveniente de bacias ou lagoas de contenção e transformá-lo em agregados graúdos. Os estudos realizados visam otimizar as propriedades físico-mecânicas e químicas destes agregados confeccionados com o objetivo de torná-lo uma alternativa viável frente aos agregados comercialmente disponíveis no mercado da construção civil, com boa relação custo-benefício e sustentabilidade ambiental (HYDRO, 2021).

Esta pesquisa, a partir do estudo de Fernandes, R.S. et al. (2025), selecionou o agregado graúdo com maior percentual de resíduo em sua composição, denominado AGS90, do terceiro ciclo de produção para ser utilizado em um concreto estrutural de resistência normal.

Este trabalho apresenta uma avaliação dos resultados das caracterizações do agregado graúdo sintético AGS90 (denominado AGS) e do agregado graúdo de origem natural (AGN), em relação às propriedades físicas, químicas e mecânicas desses agregados. A pesquisa também estabelece uma correlação da influência nas resistências mecânicas e no módulo de elasticidade de um concreto de cimento Portland com a classe de resistência normal. Esta pesquisa apresenta resultados comparativos de um concreto com agregado graúdo sintético de resíduo de bauxita, denominado CAGS, e um concreto com agregado graúdo natural, denominado CAGN, no estado fresco. Os parâmetros avaliados são consistência, densidade aparente e consumo de cimento. Já no estado endurecido, são analisados a absorção de água, a porosidade, a massa específica, o módulo de elasticidade estática. No estado da fratura do concreto, são avaliados a resistência à compressão axial, à tração diametral e à flexão. Por fim, a interface matriz-agregado é analisada pela microscopia eletrônica de varredura (MEV).

5.2 MATERIAIS E MÉTODOS

O resíduo de bauxita RB outrora conhecido por lama vermelha é oriundo do processo de beneficiamento da bauxita, conhecido como processo Bayer, Fernandes, R.S. et al. (2025). Estes depósitos de RB são conhecidos como depósito de resíduos sólidos (DRS) e a refinaria da Hydro Alunorte localizada no Estado do Pará possui depósitos com capacidade de armazenar 92,2 Mm³ (mega metros cúbicos) (Figura 34).

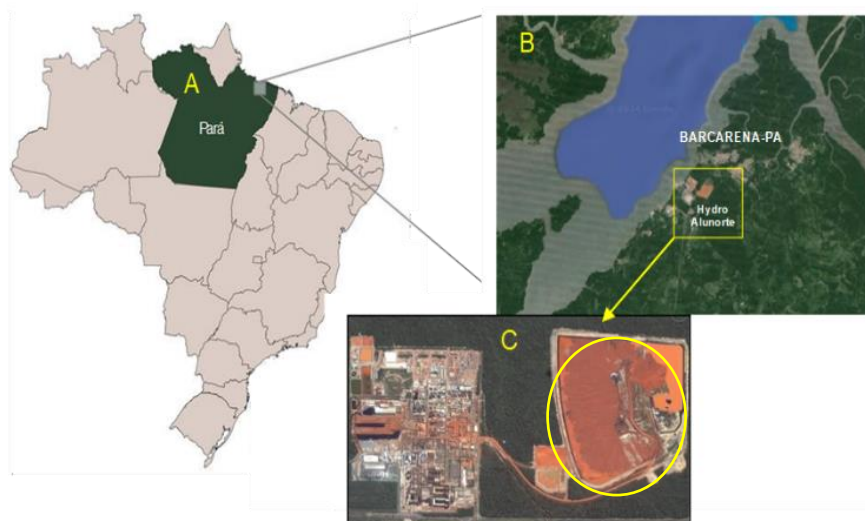


Figura 34 - Localização do local de obtenção do resíduo de bauxita. A e B) Local da Fábrica (Google Maps, 2025) e C) Área de armazenagem de resíduo pela empresa HYDRO-ALUNORTE em Barcarena – PA (Souza, J.A, et al., 2019). Adaptado. Autores, 2025.

5.2.1 Materiais

5.2.1.1 Resíduo de bauxita

Fernandes, R.S. 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 em Barcarena-PA e armazenado no Laboratório de Engenharia civil da UFPA conforme mostra a Figura 35.



Figura 35 - Armazenamento do resíduo de bauxita no laboratório de Engenharia Civil da UFPA. A) Disposição da forma que o material foi transportado e posteriormente armazenamento, B) Aspecto do Resíduo *in natura* e C) Amostra do AGS produzido. Fonte: Adaptado, Fernandes, R.S. et al. (2025).

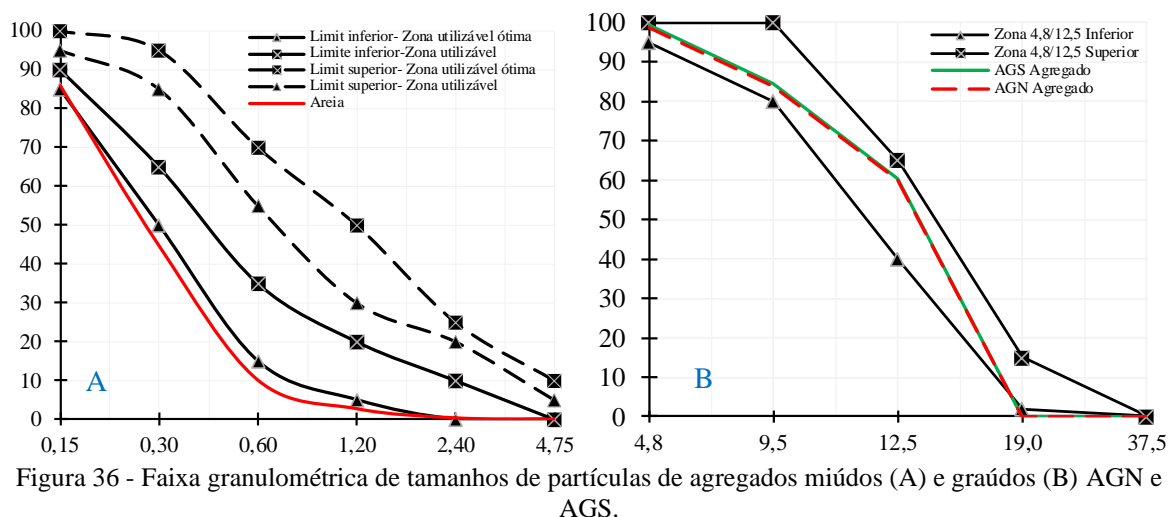
5.2.1.2 Agregados

O agregado miúdo em questão é caracterizado como um tipo de 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 $2,62 \text{ g/cm}^3$, uma 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 a dimensão máxima de 1,18 mm, o que indica que o material é classificado como areia média. Já o agregado graúdo natural foi do tipo seixo rolado (AGN), oriundo de leitos de rios da cidade de Ourém-Pa e adquirido em loja de materiais de construções na região metropolitana de Belém-Pa. Ademais, ensaios de caracterização física foram realizados, resultando em massa específica de 2,6 g/cm³, massa unitária de 1,61 g/cm³, absorção de água de 1,97%, índice de forma de 2,01 e, por meio do ensaio de granulometria, obteve-se o resultado de módulo de finura de 2,3 e a dimensão máxima de 19,0 mm, o que classifica o material como seixo médio ou n.º 1.

Entretanto, o outro agregado graúdo utilizado nesta pesquisa foi do tipo sintético, denominado AGS de terceiro ciclo, com maior percentual de resíduo bauxita em sua composição, fornecido pela empresa Hydro e produzido no laboratório de engenharia química da Universidade Federal do Pará, conforme descrito por Fernandes, R.S. et al. (2025). Para este tipo de agregado, também foram realizadas caracterizações físicas, apresentando os resultados de diâmetro máximo de 19,0 mm, módulo de finura de 1,84, índice de forma 1,99 e absorção de água de 3,20%. A temperatura de sinterização foi fixada em 1250 °C e o formato deste agregado pode ser visualizado na Figura 32.C.

Na Figuras 36.A e 36.B são mostradas as curvas granulométricas do agregado miúdo e dos agregados graúdos AGN e AGS.



A distribuição granulométrica da areia está claramente fora do enquadramento entre as faixas da zona inferior utilizável e zona inferior utilizável ótima. Já as curvas granulométricas dos agregados graúdo sintético e graúdo e natural mostram um enquadramento parcial entre as zonas superior e 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, como o de abrasão Los Angeles, cujos resultados mostraram 52% para o AGN e 27,41% para o AGS. Isso confirma que apenas o agregado sintético atende aos requisitos da NBR 7211, de 2022, para uso em concreto estrutural. O agregado natural, por sua vez, apresenta uma consistência friável, tornando-o inadequado para a produção de concretos estruturais.

A investigação é fundamental para avaliar a durabilidade dos agregados e verificar se eles são inertes quando em contato com os álcalis do cimento. Por isso, foram realizados os ensaios de reação álcali-agregado para os agregados miúdo (areia) e graúdos (seixo e AGS), conforme demonstrado na Figura 37.

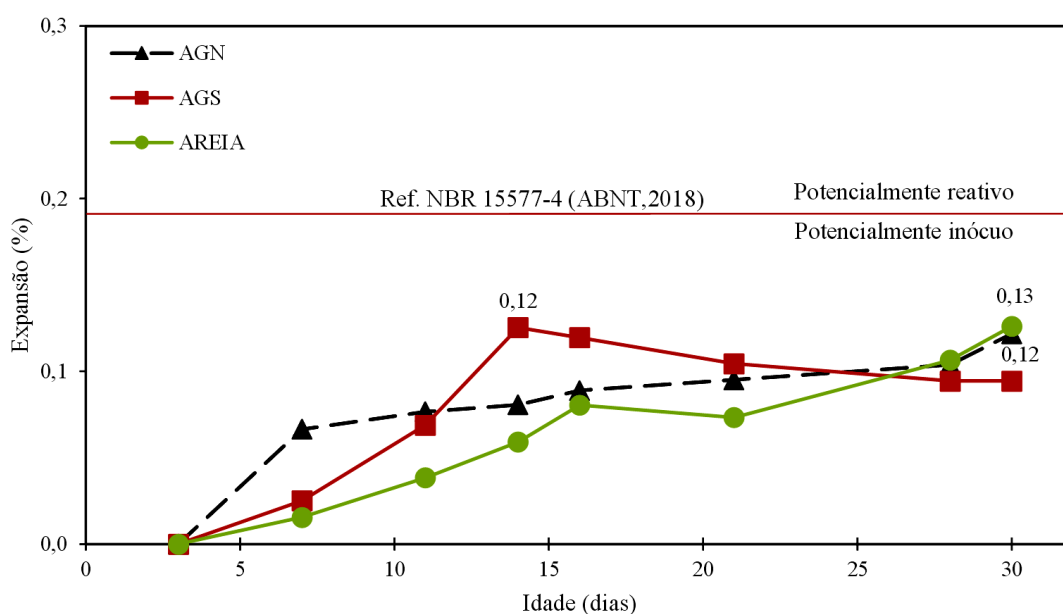


Figura 37 – Resultados dos ensaios de reação álcali agregado da areia, AGN e AGS conforme NBR 15577-4/2019.

O AGS é produzido a partir de um resíduo de mineração (bauxita) por meio de um processo laboratorial. No entanto, ainda não foi utilizado em condições de exposição direta a sulfato. Portanto, Fernandes, R.S. et al. (2025) realizaram o ensaio de avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio (DNIT 446/2024-ME) para este agregado. O resultado mostrou que houve apenas uma pequena desintegração do agregado e que a perda de massa foi menor que 0,1%, atendendo, assim, aos limites máximos admissíveis para os resultados deste ensaio de durabilidade, de acordo com o DNER 037/1997-ME.

5.2.1.3 Água de amassamento

A água é um componente essencial no processo de produção de concreto, pois é responsável pela hidratação do cimento. Segundo Neville (1997), a qualidade da água é crucial, pois suas impurezas podem interferir no processo de pega do cimento, afetar negativamente a resistência do concreto e ainda levar à corrosão de armaduras.

A água destinada ao uso em concreto deve estar em conformidade com as exigências da NBR 1900-1, de 2009, especificamente nos itens 4.2 e 4.3.1 a 4.3.3. Ademais, é imprescindível que esteja em conformidade com as exigências químicas do item 4.3.4 ou com as exigências de tempo de pega e resistência à compressão do item 4.4. Diante das condicionantes apresentadas, foi necessário optar pelo uso de água classificada como potável, fornecida pela Companhia de Saneamento do Pará e submetida a um processo de tratamento no campus da Universidade Federal do Pará.

Como ponto negativo, destaca-se a ausência de uma análise específica da água, que não atendeu aos requisitos do fluxograma da Figura 1 da NBR 1900-1:2009, que apresenta a sequência de ensaios que fornecem os subsídios necessários para a aceitação ou recusa de uma amostra de água.

5.2.1.4 Cimento Portland

O cimento empregado em toda a pesquisa é do tipo brasileiro Portland CP II F32, constituído de 75 a 89% em massa de clínquer e sulfato de cálcio, e 11 a 25% de material carbonático, de acordo com Salgado (2015, p. 7) e com a NBR 16697 (2018). Ademais, possui uma massa específica de 2,85 g/cm³. A escolha deste tipo de cimento para o desenvolvimento do trabalho se deu em virtude de sua ampla utilização em obras de construção civil na região amazônica.

5.2.2 Produção de corpos de prova proveniente do AGS

De forma singular, foram produzidos corpos de prova empregando os mesmos materiais e com a mesma proporcionalidade dos percentuais de mistura destes materiais que foram necessários para a produção do AGS90.

A metodologia empregada para a fabricação dos corpos de prova foi fundamentada nas recomendações da NBR 7182 (2016). A fabricação envolveu a produção de nove corpos de prova, com três unidades cada, destinados à realização dos ensaios de massa específica, absorção e índice de vazios, conforme estabelecido pela NBR 13278 (2005). A Figura 5 ilustra a realização dos ensaios de compressão axial, conforme estabelecido pela NBR 5739 (2018), para ensaio de módulo de deformação estático, conforme estabelecido pela NBR

10341 (ABNT, 2006), e ensaio de módulo de deformação dinâmico, conforme recomendações da NBR 8802 (2019). Todos os corpos de prova foram armazenados em ambiente controlado.

A fabricação dos corpos de prova consistiu no preenchimento de três cilindros metálicos, cujas dimensões eram de 10 centímetros de altura por 5 centímetros de diâmetro. O material foi submetido à homogeneização por um período de 10 minutos, em conformidade com as diretrizes estabelecidas na NBR 7182, de 2025. Para a realização do estudo, foi necessário dispor três camadas de material nos moldes dos corpos de prova. Em seguida, cada camada foi submetida à compactação utilizando um soquete manual, aplicando-se 26 golpes em pontos distintos em cada uma das camadas. Em um segundo momento, as amostras foram submetidas ao processo de sinterização em fornos, a uma temperatura de 1250 °C, por um período de três horas. Após a etapa de sinterização, as amostras foram submetidas ao resfriamento e à desforma. A Figura 38 ilustra o processo de produção dos corpos de prova.

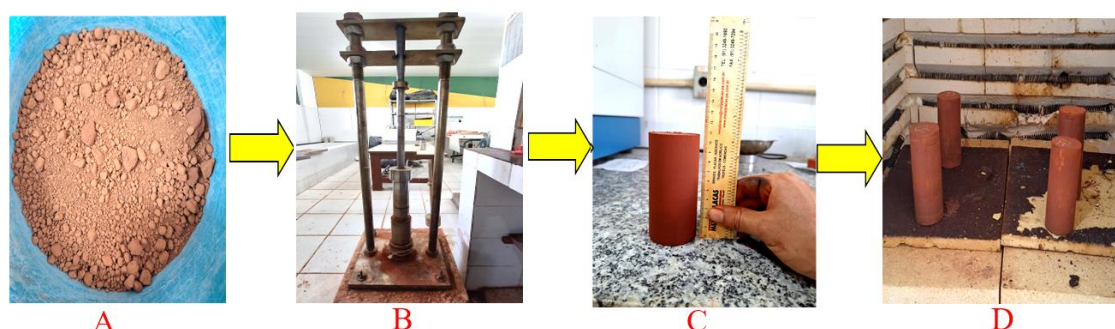


Figura 38 – Processo simplificado da produção dos corpos de prova de AGS. A) Resíduo de bauxita *in natura*. B) moldagem do corpo de prova. C) Corpo de prova moldado antes da sinterização e C) Corpo de prova moldado depois da sinterização.

O processo de mistura é demonstrado no trabalho de Fernandes, R.S. et al. (2025) para a produção do agregado graúdo sintético. No entanto, é importante ressaltar que os processos são similares apenas na etapa de mistura. Para a produção dos corpos de prova, foi utilizada a metodologia descrita na NBR 7182, de 2025. A Figura 35.D apresenta o corpo de prova, com dimensões aproximadas de 50 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, devidamente formatado, antes de ser submetido ao processo de sinterização em mufla a uma temperatura de 1250 °C. Após um período de três horas em determinada temperatura, a amostra é submetida ao processo de resfriamento natural em ambiente laboratorial. Conforme demonstrado na Figura 35.D, após a sinterização, as amostras apresentaram pequenas deformações e redução de volume. A referida condição já era prevista, entretanto, em um próximo estágio da produção de corpos de prova de agregado sintético, será necessário otimizar os ajustes durante o processo de sinterização.

Após a conclusão da produção dos corpos de prova de AGS, as propriedades mecânicas foram avaliadas por meio do ensaio de compressão axial NBR 7182, 2025 e do módulo de elasticidade dinâmico ASTM C597-16 (Figura 35.C), por intermédio do ensaio de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica NBR 8802, 2019. As figuras 39.A e 39.B demonstram o corpo de prova de AGS durante o ensaio de compressão e a fratura subsequente à ruptura.

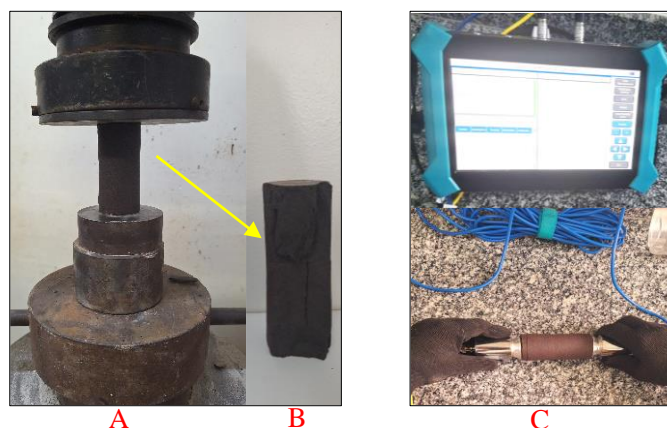


Figura 39 – Ensaios de resistência mecânica dos corpos de prova do AGS. A) Ensaio de compressão axial. B) corpo de prova rompido e C) Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico.

5.2.3 Dosagem e confecção da curva de dosagem

De acordo com a NBR 6118, de 2023, as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas, apresentem segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil de projeto. O presente estudo fundamentou-se nas recomendações da NBR 12655, de 2022, para a produção de concretos, adotando a classe de agressividade II, conforme a NBR 8953, de 2015, e o consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto, em kg/m^3 , deve ser igual ou superior a 280. Dessa forma, é possível obter um traço de concreto que apresente resistência à compressão de 30 MPa aos 28 dias, a partir do diagrama de dosagem pelo método IBRACON, anteriormente denominado IPT. Tal método se mostra versátil quando se considera a obtenção rápida de um traço para determinado F_{ck} com certo nível de confiança. Por meio de gráficos que correlacionam as principais variáveis do concreto, é possível estabelecer uma relação entre a resistência à

compressão axial e a relação água-cimento (A/C), a proporção de agregados secos (m) e o consumo de cimento por metro cúbico de concreto (C) para a obtenção do concreto. Dessa forma, para a confecção do ábaco de dosagem, são produzidos, no mínimo, três traços distintos, variando a relação de a/c, o m total (rico/1:3,5), (normal/1:5) e (pobre/1:6,5), mantendo-se o teor de argamassa definido no traço padrão.

É importante salientar que não foram utilizados aditivos de qualquer tipo em todas as dosagens deste estudo. Além disso, os AGS utilizados nos três tipos de concreto apresentaram teor de absorção de água maior que 2%, o que resultou em influência direta da porosidade dos AGS na dosagem desses concretos.

A produção dos concretos foi realizada em um ambiente controlado do laboratório de concreto da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará (UFPA), com o objetivo de reduzir a variação do desvio padrão (Sd) ao mínimo, de modo a garantir que o traço de dosagem atingisse a resistência à compressão aos 28 dias (f_{ckj}).

A Figura 40 ilustra o processo de produção dos compósitos cimentícios produzidos com AGN, denominado CAGN, e os produzidos com AGS, denominado CAGS. A Figura 40 ilustra o processo anterior por meio da elaboração das curvas de dosagem, em conformidade com as recomendações do Método IBRACON.

Tabela 14- Resistências à compressão da confecção da curva de dosagem.

Tipo de compósito/agregado	Traço	f_{ckJ} médio - Sd (MPa)
CAGN	Rico	34,91 - 0,01
	Normal	29,97 - 0,03
	Pobre	20,34 - 0,05
CAGS	Rico	29,41 - 2,23
	Normal	20,1 - 3,98
	Pobre	12,79 - 0,28

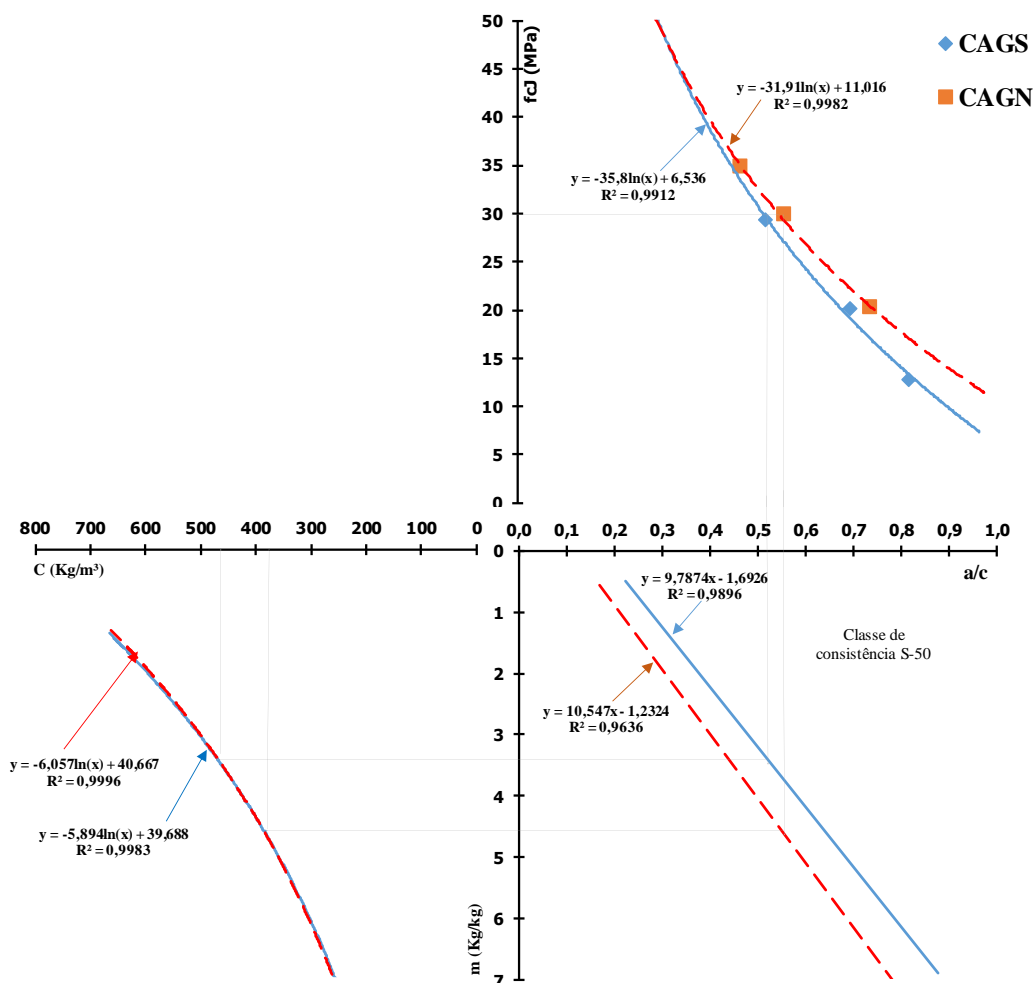


Figura 40 - Curva de dosagem dos compósitos CAGN e CAGS. Adaptado, Método IBRACON.

5.2.4 Traços unitários extraídos da curva

A dosagem dos concretos CAGN e CAGS foi calculada em conformidade com o método IBRACON. A produção dos concretos foi realizada por meio de uma betoneira de eixo inclinado, seguindo uma ordem específica de mistura dos ingredientes. Inicialmente, foram adicionados 20% de água, agregado graúdo e agregado miúdo. Em seguida, 40% de água e cimento foram incorporados à mistura. O restante da água foi utilizado para ajustar a trabalhabilidade até que o abatimento desejado fosse alcançado.

Os resultados obtidos por meio de experimentos com curvas de dosagem demandaram correções na relação a/c durante a dosagem, por meio da realização do ensaio de abatimento NM 67, 1996, a fim de mantê-los dentro da classe de consistência estabelecida. Destaca-se a relevância de enfatizar que, em sua consistência original, o concreto pode apresentar variações em seu comportamento reológico, devido à perda de água da pasta de cimento para os agregados.

Os concretos CAGN e CAGS foram avaliados no estado endurecido por meio de ensaios

mecânicos de compressão axial simples nas idades de 7, 28, 91 e 277 dias em corpos de prova cilíndricos de 100x200 mm (Figura 41.b.f), tração por compressão diametral e na flexão na idade de 28 dias em corpos de prova cilíndricos de 100x200 mm (Figura 41.c.g) e em corpos de provas prismáticos de 150x150x500 mm (Figura 38.d.h). O módulo de elasticidade estático (Figura 41.e) é mensurado em corpos de prova cilíndricos, cujas características são apresentadas na Tabela 1. Esses corpos de prova possuem 100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento. O número de réplicas para cada ensaio foi de três amostras. 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 12 utilizada foi ajustada para o CAGN, diferindo da quantidade prevista no traço inicial e sendo maior para o CAGS. 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 15, são apresentadas as propriedades dos compósitos cimentícios.

Tabela 15 - Concepção das misturas dos compósitos estudados.

Tipo de compósito/agregado	Teor de argamassa	Traço Unitário	Água ligante (inicial)	Água ligante (final)	Consistencia-S50 (mm)	Abat. (mm)	Cimento (kg/m³)	Teor de umidade (%)	Concreto fresco μ (Kg/ m³)
CAGN	55%	1:2,03:2,48	0,55	0,52	50 - 100	90	380,00	9,40	2380,96
CAGS	55%	1:1,42:1,98	0,51	0,61	50 - 100	52	475,00	13,34	2336,39

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 (classe 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, localizado na cidade de Belém, no estado do Pará, Brasil. A Figura 8 detalha o sequenciamento do processo de dosagem do concreto com o agregado gráúdo sintético. É importante ressaltar que esse processo foi realizado seguindo a mesma premissa aplicada ao concreto de referência. A Figura 42, por sua vez, demonstra a cura por imersão das amostras, bem como os ensaios mecânicos e o módulo de elasticidade estático. Esses ensaios foram realizados para todas as idades dos estudos, utilizando-se apenas dois tipos de prensas mecânicas devidamente aferidas para minimizar variações dos resultados obtidos. Os ensaios de compressão axial e de módulo de elasticidade estático foram realizados em um tipo de prensa hidráulica. Já os ensaios de tração por compressão diametral e de tração na flexão foram realizados em outro tipo de prensa hidráulica.

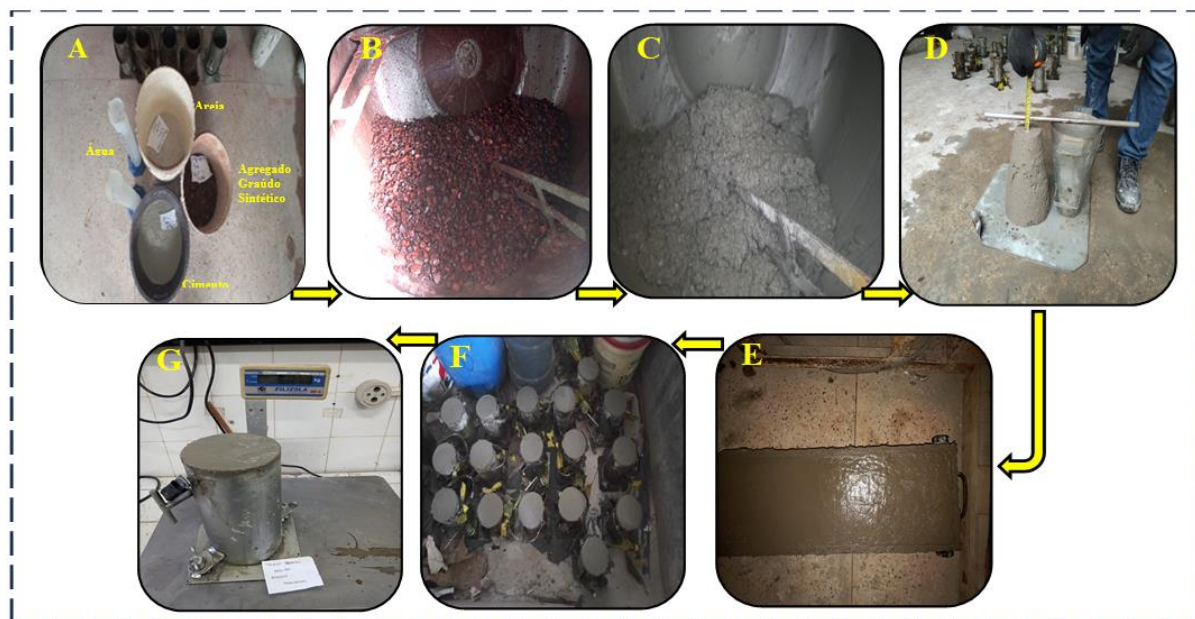


Figura 41 - Sequenciamento da dosagem e moldagem do CAGS. A) Materiais para dosagem; B e C) Misturas dos agregados na betoneira; D) ensaio de consistência do concreto; E e F) Moldagem dos corpos de provas cilíndricos e prismáticos; G) detalhe do concreto para análise da massa específica aparente.

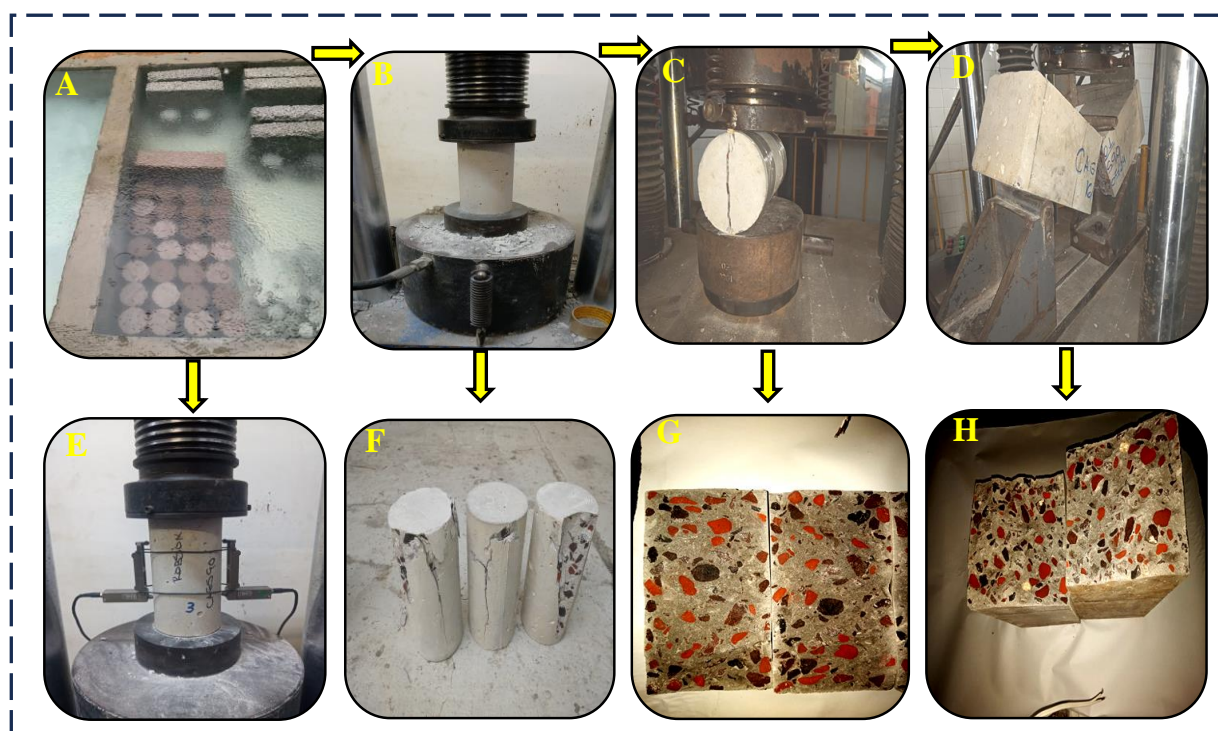


Figura 42 - Sequenciamento dos ensaios de resistência mecânica do CAGS. A) Cura imersa; B) Ensaio de compressão axial; C) Ensaio de tração por compressão diametral; D) Ensaio de tração na flexão; E) Ensaio de módulo de elasticidade estático; F/ G/ H) Detalhe do rompimento do cp's à compressão axial e diametral, tração na flexão, respectivamente.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.3.1 Influência das propriedades mecânicas dos agregados graúdos AGS e AGN nas resistências à compressão axial e módulo dos concretos CAGS e CAGN.

Conforme demonstrado anteriormente, foram produzidos corpos de prova de AGS para a realização dos ensaios físicos, tais como: absorção de água, porosidade, massa específica aparente e ensaios de resistência mecânica e módulos de elasticidade de acordo com o apresentado na Tabela 16 e as Figuras 43.A e 43.B permitem estabelecer um comparativo entre as resistências à compressão axial e os módulos dos agregados graúdos com os compósitos.

Tabela 16 - Resultados dos ensaios de caracterização e resistências mecânicas dos corpos de prova de AGS.

Tipo de agregado	Dimensão D x L (mm)	Absorção (%)	Índice de vazios	Massa Específica (g/cm ³)	f_c (MPa)	E_d (GPa)
CAGS	47 x 97	1,89	3,65	1,93	55,79	18,68

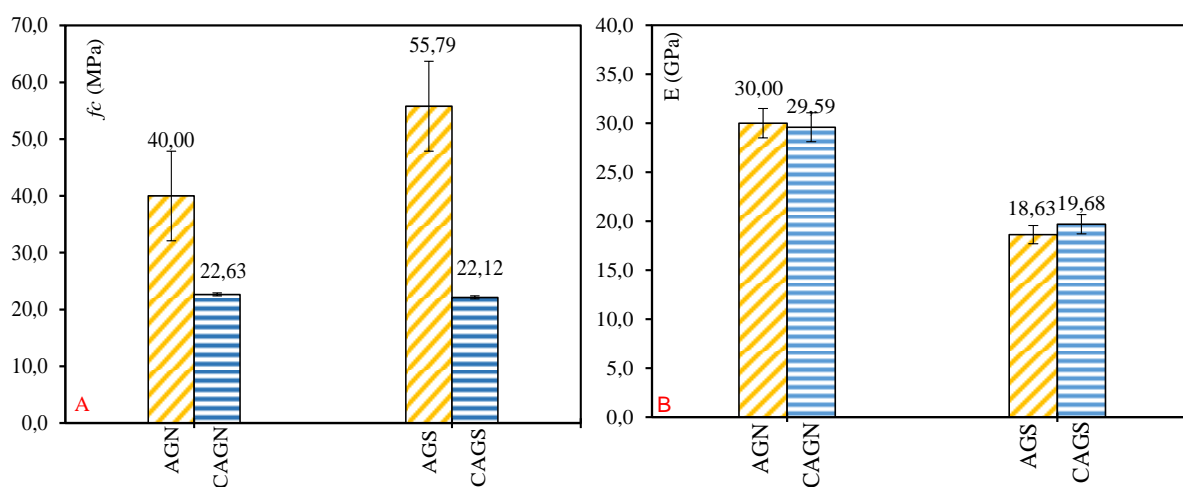


Figura 43 - Resistência mecânica dos agregados graúdos e dos compósitos na idade de 28 dias. A) compressão axial. B) módulo de elasticidade.

A Figura 43.A mostra um gráfico comparativo entre a resistência à compressão axial dos agregados graúdo natural e sintético e as resistências dos compósitos. Nesta ocasião, é importante destacar que apenas o agregado sintético foi submetido a ensaios mecânicos, e, para o seixo rolado, a resistência foi estimada de acordo com a literatura especializada. De acordo com Salvador e Giammusso (1992), os agregados apresentam resistências muito maiores que as da própria pasta de cimento. Além disso, os autores relatam que, quando um agregado possui boa qualidade, seu aumento de proporção na dosagem aumenta a resistência do concreto, e essa afirmação confirma os resultados obtidos. Constatou-se também que os

agregados graúdos naturais tendem a apresentar uma resistência à compressão axial inferior à dos agregados sintéticos. No entanto, tal fato não exerceu influência sobre os resultados de resistência à compressão axial dos concretos. Essa condição se deve ao fato de que a fratura do concreto de resistência ocorre de forma significativa na matriz cimentícia.

A Figura 43.B mostra uma comparação entre o módulo de elasticidade de agregados graúdos e as respectivas resistências dos compósitos. É importante ressaltar que apenas o agregado sintético foi submetido a testes mecânicos. Para o seixo rolado, a pesquisa se baseou no estudo de Mehta (2014), que demonstrou que os ensaios realizados com amostras de arenitos, calcários e cascalhos de variedade porosa apresentaram uma faixa de 21 a 49 GPa. O módulo de elasticidade do seixo, devido à sua composição majoritariamente mineralógica, comumente constituída por minerais como quartzo e feldspato, pode atingir valores de 40 a 70 GPa. Para a presente pesquisa, foi adotado o valor de 30 GPa para o módulo de elasticidade do seixo rolado utilizado, que é correspondente ao valor encontrado no ensaio de módulo de elasticidade dinâmico do agregado graúdo sintético, que foi de 29,59 GPa. A correlação em questão tem como fundamento os resultados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade estático dos concretos estudados, que apresentaram, respectivamente, 18,63 GPa e 19,69 GPa para o CAGN e o CAGS.

Apesar da maior porosidade apresentada pelo agregado graúdo sintético em comparação ao agregado graúdo natural, fator de suma importância para determinar sua rigidez e, por conseguinte, o módulo de elasticidade do concreto, outros fatores devem ser considerados. Entretanto, não se observou comprometimento na rigidez do concreto nem variação acentuada entre os módulos de elasticidade dos concretos analisados.

5.3.2 Influência das propriedades físicas do concreto nas resistências à compressão axial dos concretos CAGS e CAGN.

A Figura 44.A mostra o gráfico da relação entre a absorção de água e o índice de vazios nos concretos desta pesquisa. Neste contexto, ao se observar o espectro da porosidade do concreto, é possível concluir que o CAGN apresenta melhor desempenho que o CAGS, resultando em propriedades de durabilidade física superiores. É importante ressaltar que o CAGS apresenta maior porosidade em virtude do aumento da água no traço unitário, utilizado para a correção da água ligante ajustada no ensaio de abatimento. Destarte, é imperativo salientar que a condição mencionada decorre da superior porosidade do AGS. De acordo com 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. Dentre os danos mencionados,

incluem-se a retração por secagem, o aumento da massa específica e a redução da resistência ao fogo. 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". Além disso, a água absorvida pelo agregado promove a cura interna do concreto.

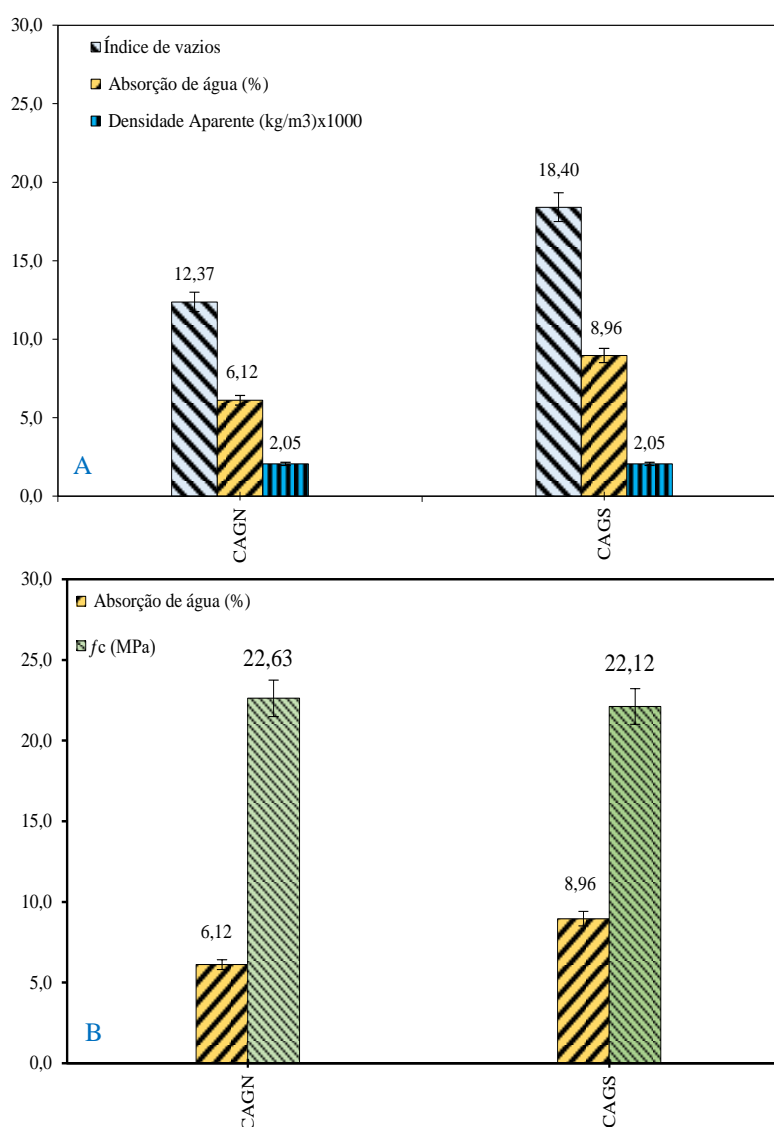


Figura 44 – Propriedades físicas dos concretos estudados. A) índice de vazios x absorção de água x densidade aparente e B) Absorção de água x resistência à compressão.

Conforme demonstrado na Figura 44, o quadro 44.A exibe a relação direta entre a absorção de água e a porosidade dos compósitos CAGS e CAGN. Ademais, os resultados obtidos a partir dos gráficos B e C correlacionam as massas específicas aparentes e a porosidade encontrada nesses compósitos com as resistências à compressão na idade de 28 dias.

Com base na literatura especializada, é possível afirmar que a relação entre a massa específica e a porosidade são inversamente proporcionais. Além disso, fatores como a porosidade do

agregado graúdo podem afetar as propriedades reológicas e mecânicas, bem como o módulo de elasticidade do concreto. Conforme demonstrado no gráfico, a absorção de água do CAGS é 46% superior à do CAGN. Tal condição não produziu efeito sobre os resultados obtidos no estudo da massa específica aparente dos compósitos. Contudo, ao se observar a resistência à compressão aos 28 dias, nota-se que, mesmo que o CAGS possuía maior porosidade e absorção de água, ele apresenta maior resistência que o CAGN, em uma proporção de 9%. Portanto, infere-se que os condicionantes de porosidade e absorção de água, quando analisados individualmente, não exercem influência sobre a compressão axial dos compósitos objeto desta pesquisa.

5.3.3 Análise das resistências à compressão axial e módulo de elasticidade em diferentes idades dos concretos CAGS e CAGN.

Conforme Neville (1997), muitos projetistas consideram a resistência à compressão axial do concreto como uma propriedade mecânica que demanda atenção especial e controle tecnológico mais rigoroso. Além disso, essa propriedade atua como um critério indireto para a avaliação de outras propriedades do material. Em determinadas ocasiões, contudo, podem ser observadas simplificações que não caracterizam precisamente determinadas características. Por conseguinte, mostra-se imprescindível um conhecimento mais aprofundado dessas propriedades, como a avaliação em paralelo do módulo de elasticidade.

Por meio de uma revisão sistemática da literatura especializada, foi possível identificar uma série de estudos relacionados à utilização de agregados de resíduos de bauxita em concreto. Embora ainda estejam em estágio inicial, os resultados desses estudos são encorajadores, especialmente os trabalhos de Souza (2010), que alcançaram uma resistência máxima de compressão axial de 40,34 MPa, e de Santos et al. (2014). Esse resultado indica que o concreto com agregado graúdo sintético apresenta potencial para alcançar elevadas resistências à compressão.

Diante da novidade do material e da busca por sua consolidação por meio de resultados adicionais provenientes de processos mitigantes de reprodutividade/repetitividade, bem como da avaliação de sua aplicabilidade/viabilidade física, química e mecânica ao longo prazo em concreto estrutural, neste caso, de concreto de resistência normal, é imprescindível a realização de mais estudos. O presente estudo objetivou avaliar a resistência à compressão axial em indivíduos nas idades de 7, 28, 91 e 277 dias, com o propósito de determinar a contribuição do AGS para essa propriedade mecânica nas idades inicial e avançada.

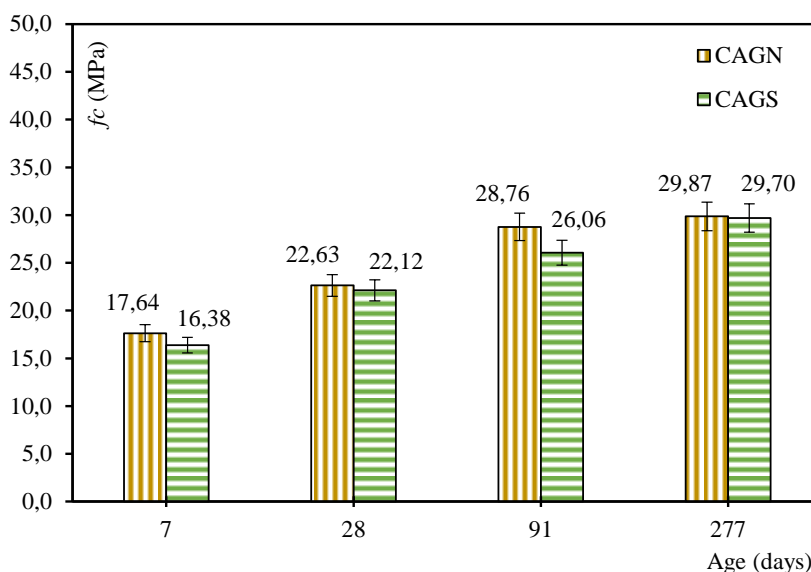


Figura 45- Gráfico do mapeamento da resistência à compressão axial dos compósitos CAGN e CAGS para as idades 7, 28, 91 e 277 dias.

O gráfico de resistência à compressão, ilustrado na Figura 45, indica que ambos os compósitos apresentaram um aumento gradual nas resistências ao longo do tempo, mesmo após mais de 91 dias. Os resultados obtidos indicam que tanto o CAGN quanto o CAGS apresentaram resistências à compressão com valores próximos. 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. No entanto, é importante ressaltar que esse resultado não o excluiria da classe de agressividade estabelecida na NBR 12655, 2022.

Alguns aspectos em que os agregados graúdos podem ter contribuído nos resultados obtidos, remetem a reflexão que o AGS possui menor perda a abrasão, mas tem maior absorção de água e vazios em relação ao AGN. Estes parâmetros geraram condicionantes que culminaram em uma equiparação nos resultados em todas as idades.

Segundo Junior, Costa e Macedo (2022), a literatura especializada não aborda de forma crítica a análise do equipamento utilizado para realizar os testes de módulo de elasticidade em concretos. Salienta-se a importância da aferição, visto que é um componente fundamental para a obtenção de resultados confiáveis.

De acordo com 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 o exposto, este estudo não se restringiu a avaliar o módulo somente na idade recomendada de 28 dias, mas também ampliou a análise para outras idades, assim como foi feito para a

compressão axial em idades mais avançadas, de 91 e 277 dias. Destaca-se que aos 28 dias o módulo de elasticidade do CAGN apresentou um resultado ligeiramente superior ao do CAGS, cerca de 10%. No entanto, é importante ressaltar que, aos 91 dias, essa diferença foi menor que 1%. Além disso, o ensaio realizado aos 277 dias confirma que houve uma consolidação intrínseca da microestrutura de ambos os compósitos, devido à pequena variação de seus módulos.

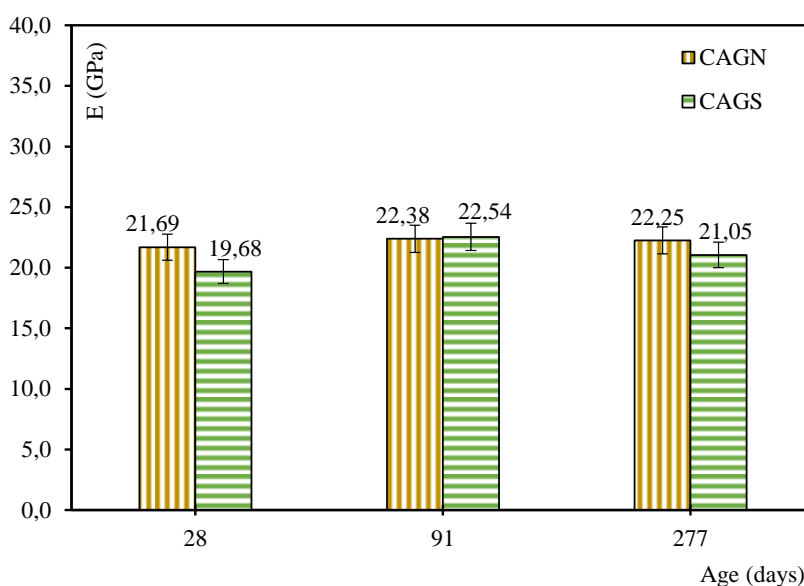


Figura 46- Gráfico do mapeamento do módulo de elasticidade dos compósitos CAGN e CAGS para as idades 28, 91 e 277 dias.

Os resultados alcançados foram considerados satisfatórios para o CAGS, 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 variando entre 20 e 50 mega pascal (MPa), o valor do módulo de deformação pode variar, em geral, entre 50% e 80% do valor obtido.

Conforme disposto no item 8.2.8 da NBR 6118, de 2023, o módulo de elasticidade (E_{ci}) deve ser obtido por meio do método de ensaio estabelecido na ABNT NBR 8522-1. Nesta norma, o módulo de deformação tangente inicial, obtido aos 28 dias de idade. Entretanto, na impossibilidade da realização do ensaio, calcula-se o valor do módulo de elasticidade inicial por meio da expressão: $E_{ci} = \alpha E_c \sqrt{f_{ck}}$, para concretos com $F_{ck} \leq 50$ MPa. Portanto, conforme a referida metodologia de cálculo se obteve os seguintes valores de αE de 0,9 para o seixo rolado (AGN) utilizado no CAGN, equivalente ao valor adotado para o calcário e de αE de 1,34 para o agregado graúdo de resíduo de bauxita (AGS) utilizado no CAGS, sendo superior ao valor adotado para basalto e diabásio.

Diante do fato de que a realização do ensaio de módulo de elasticidade estático dos concretos

fora estipulada para tensões de compressão menores que $0,5 f_c$ e para tensões de tração menores que f_{ct} , o valor do coeficiente de Poisson (μ) foi estabelecido em 0,2 (conforme disposto no item 8.2.9 da NBR 6118, 2023).

5.3.4 Análise comparativa dos resultados de tração por compressão diametral e tração na Flexão.

A Figura 47 apresenta um comparativo dos resultados obtidos a partir dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e por flexão simples, realizados aos 28 dias, para os compósitos CAGN e CAGS. A variação das respostas obtidas entre os ensaios apresentou valores de aproximadamente 12% para o CAGN e de 27% para o CAGS. Ao se comparar os resultados de compressão axial e de tração por compressão diametral para os compósitos CAGN e CAGS, pode-se concluir que a resistência à tração de ambos é aproximadamente equivalente a 10% da compressão axial. Diante do exposto, infere-se que os resultados se encontram em conformidade com os parâmetros normativos estabelecidos para concretos de resistência padrão. Essa hipótese é corroborada pela revisão sistemática Junior, Costa e Macedo (2022), que citam os resultados da resistência à tração por compressão diametral dos trabalhos de Rosário (2013) e Souza (2010). Os trabalhos em questão abordam o tema concernente ao concreto de resistência normal produzido com agregado graúdo de resíduo de bauxita. Os resultados obtidos variaram de 2,36 MPa a 3,29 MPa, confirmando, assim, a correlação direta com as resistências obtidas na compressão axial.

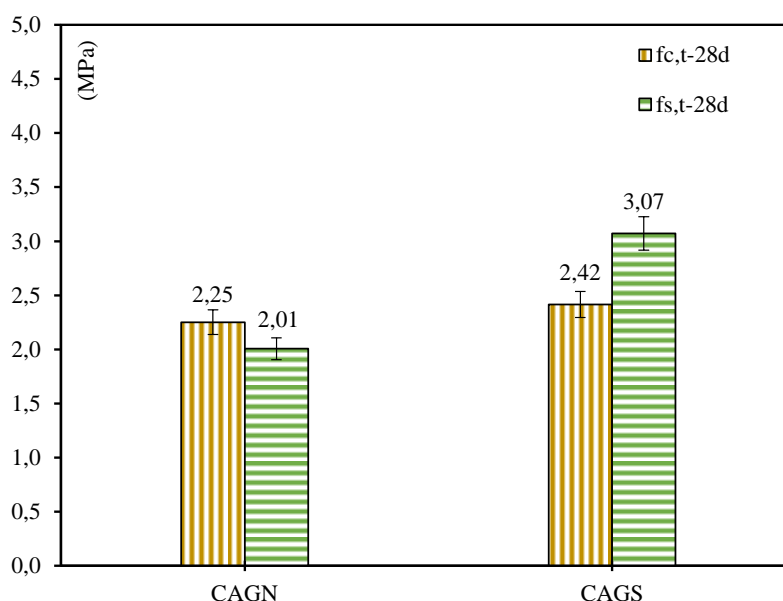
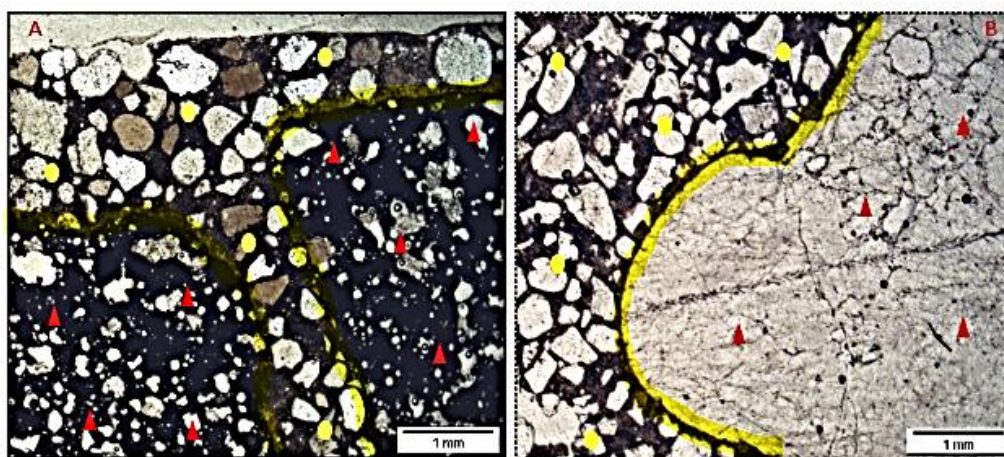


Figura 47- Gráfico que mostra a relação na tração e flexão dos compósitos CAGN e CAGS para idade 28 dias.

5.3.5 Análise da microestrutura do concreto fraturado através de microscópio óptico e eletrônico de varredura (MEV)

Com o objetivo de analisar a microestrutura das matrizes e das zonas de transição dos concretos com agregado graúdo sintético e natural, foram obtidas imagens por meio da utilização de microscópio óptico (Figura 48) e microscópio eletrônico de varredura (MEV) (Figuras 49 e 50) 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.



Legenda: ■ delimitação da zona de transição. ● Agregado graúdo (fase dispersa).

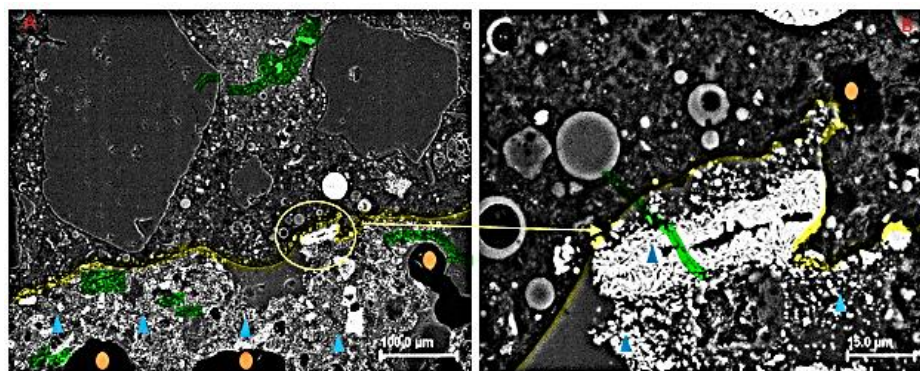
▲ argamassa (matriz cimentícia).

Figura 48- Imagem obtida através de microscópio óptico da microestrutura da zona de transição do composto.

A) Luz polarizada- CAGS. B) Luz natural- CAGN.

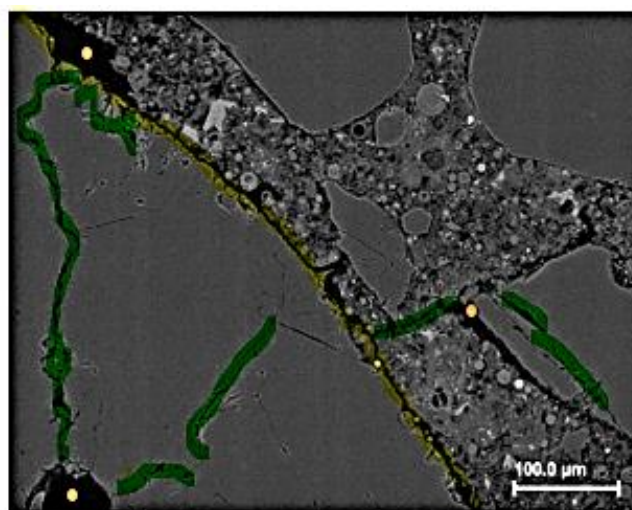
De acordo com Isaia et al. (2007), a zona de contato corresponde à relação entre os grãos dos agregados graúdos e miúdos que se fundem com a pasta de cimento, circundando e separando os agregados. Tal processo resulta na formação de filmes de água em torno dos grãos, gerando uma camada mais fraca na 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 retro espalhado (Backscattered Electron - BSE).



Legenda: ■ delimitação da zona de transição. ■ Fissuras. ▲ Agregado graúdo (impregnado com refratário). ● poros no agregado graúdo e argamassa cimentícia).

Figura 49- Imagens obtidas por (MEV) da amostra de CAGS. A) Visualização da microestrutura. B) Detalhe zona da transição, fissuras, vazios e impregnação de material refratário.



Legenda: ■ delimitação da zona de transição. ■ Fissuras. ● poros no agregado graúdo e argamassa cimentícia).

Figura 50 - Imagens obtidas por (MEV) da amostra de CAGN.

As análises dos concretos fraturados pelo microscópio óptico foram realizadas por meio da visualização das superfícies das argamassas e dos agregados graúdos, bem como da interface da zona de transição. A Figura 47 destaca a perfeita separação através da zona de transição da matriz cimentícia dos compósitos com fase dispersa e os agregados graúdos. Além disso, é possível observar na Figura 47A o detalhe do agregado graúdo 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 CAGN e CAGS, assim como das fissuras e poros existentes, conforme demonstrado nas Figuras 46 e 47. Outro aspecto relevante a ser evidenciado nas Figuras 47.A e 47.B, na região designada AGS, refere-se à significativa concentração de folhetos esbranquiçados. Segundo Fernandes, R.S. et al. (2025), essa situação decorre do fato de que, durante a produção do agregado graúdo

sintético, no estágio de sintetização em forno elétrico a uma temperatura de 1250 °C, geralmente ocorrem desprendimentos de material refratário utilizado nas paredes internas. Isso resulta na impregnação de diversas pedras de agregado produzido. Posteriormente, na etapa de confecção do compósito CAGS, foram feitas raspagens das pedras que continham impregnação de material refratário. Em algumas pedras, não foi possível realizar a raspagem completa. É importante destacar que essa situação não reduz a resistência mecânica do AGS. No entanto, pode haver problemas de reação com álcali agregados.

Foi observada a ocorrência de fraturas na matriz cimentícia tanto na amostra de CAGS quanto na de CAGN. Conforme descrito na literatura especializada, essa situação é esperada, pois se trata de um concreto de resistência normal. Com base nos dados obtidos, foi possível observar que o CAGN (Figura 46) apresentou fissuras cisalhantes em maiores quantidades e espessuras do que o CAGS (Figura 47). É imprescindível elucidar que tal fissura não é prevista em agregados graúdos presentes em concreto de resistência normal. Também, ressalta-se que os resultados obtidos anteriormente no ensaio de abrasão Los Angeles corroboram os resultados do estudo em que o AGN foi atestado como agregado graúdo friável.

Conforme observado na Figura 47, a maior quantidade de poros existentes no agregado graúdo sintético foi um fator que contribuiu significativamente para a absorção de água de amassamento. Consequentemente, tal fator ocasionou um incremento na relação da água ligante final e, por conseguinte, na possibilidade de menor resistência mecânica nas idades iniciais.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.4.1 Influência da qualidade do AGS no compósito CAGS.

A consistência e a resistência à compressão axial são propriedades do concreto que são influenciadas pelas características físicas, químicas e mecânicas dos agregados. A avaliação do tipo de agregado graúdo sintético utilizado nesta pesquisa indicou que, em relação às características físicas, tais como a forma do grão, a granulometria e a dimensão máxima, características do próprio material produzido, foi possível ajustar o melhor enquadramento de acordo com os requisitos da NBR 7211:2022, para uma dosagem adequada do concreto. Em contrapartida, o presente agregado exibe uma porosidade que supera a de um agregado graúdo natural, como o seixo rolado, empregado no estudo como parâmetro de comparação. Dessa forma, foi observado que o concreto em questão apresentou uma porosidade superior quando comparado ao concreto de referência.

Com base nos resultados obtidos nos estudos realizados por Fernandes, R.S. et al. (2025) acerca do desgaste do agregado por abrasão Los Angeles, reação álcali agregado e resistência ao ataque por sulfato, os resultados foram considerados satisfatórios, atendendo aos requisitos exigidos pela NBR 7211 (2022). Dessa forma, correlacionando com as análises da microestrutura do concreto estudado, não foram evidenciadas, até a idade de 277 dias, nenhuma anomalia deletéria.

5.4.2 Influência da porosidade do AGS na água ligante do CAGS.

Admitindo-se que o agregado graúdo sintético possui um teor de porosidade que não é o ideal, por ser tratar de material produzido por processo laboratorial, ocasionando numa maior absorção de água em comparação ao agregado graúdo natural. Esta condicionante promoveu alteração na água ligante do concreto estipulada na curva de dosagem de 0,51 para 0,61 no traço final corrigido. É importante observar que o agregado graúdo sintético adquiriu uma parcela desta água para si, e que a sua destinação deveria ser exclusivamente para hidratação da matriz cimentícia. É importante observar que a variação no aumento da água ligante, necessária para manter a consistência constante, influenciou os resultados obtidos de resistência à compressão axial, tração do concreto e módulo de elasticidade nas idades até 28 dias.

5.4.3 Influência da compressão axial e módulo de elasticidade do AGS nas propriedades mecânicas do CAGS.

Este estudo buscou avaliar a resistência à compressão axial nas idades de 7, 28, 91 e 277 dias, com o intuito de compreender a contribuição do AGS nesta propriedade mecânica nas idades inicial e avançada. O AGS apresentou um resultado bastante positivo no ensaio de abrasão, demonstrando uma resistência à compressão acima de 50 MPa, superior à da matriz.

Com base nas informações obtidas a partir dos ensaios de tração por compressão e também na flexão, os resultados encontram-se dentro dos parâmetros normativos estabelecidos para concretos de resistência normal, em conformidade com a NBR 6118 de 2023, corroborando com a revisão sistemática realizada anteriormente por Junior, Costa e Macedo (2022).

Com base na análise do módulo de elasticidade do concreto com AGS nas idades de 28, 91 e 277 dias, foi possível concluir que o uso de agregado graúdo sintético contribuiu de forma efetiva para a consolidação intrínseca da microestrutura a partir da idade de 91 dias. Isso decorre da porosidade existente no agregado, bem como da devolução, ao longo do tempo, da água absorvida na dosagem da matriz cimentícia.

Outro critério de suma importância, com caráter inédito, baseado na metodologia do cálculo

disposta no item 8.2.8 da NBR 6118, de 2023, aliado com o resultado do módulo de elasticidade estático do CAGS para a idade de 28 dias, permitiu que se chegasse ao valor de 1,4 para o αE do agregado graúdo sintético. Portanto, é possível empregá-lo como parâmetro para o cálculo teórico estimado do módulo de resistência do concreto, considerando a utilização deste tipo de agregado graúdo sintético.

5.4.4 Microestrutura do CAGS.

As imagens obtidas por microscópio óptico e eletrônico de varredura demonstram a separação através da zona de transição bem delineada entre a matriz cimentícia e os grãos do agregado graúdo sintético. Dessa forma, conforme observado em grande parte da matriz cimentícia, a literatura especializada preconiza tal situação, visto que se trata de um concreto de resistência normal.

Em relação ao agregado graúdo sintético, não foram observadas rupturas, apenas fissuras cisalhantes em pequenas quantidades, em comparação com o observado no agregado graúdo natural. Diante do exposto, é possível corroborar os resultados obtidos anteriormente no ensaio de abrasão Los Angeles. Nesse ensaio, o agregado graúdo sintético apresentou menor perda de massa, sendo considerado friável o agregado graúdo natural.

A análise da microestrutura do concreto, realizada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), revelou uma maior quantidade de poros no agregado graúdo sintético. Esse fator contribui para a absorção de água de amassamento, resultando em um aumento na relação água ligante final e, conseqüentemente, na diminuição da resistência mecânica.

5.4.5 Conclusão

É importante ressaltar que todas as etapas do processo produtivo foram fundamentais para que se pudesse chegar a um tipo de agregado graúdo sintético com maior percentual possível de incremento do resíduo em sua composição. Além disso, é imprescindível que o produto possua propriedades físicas, químicas e mecânicas adequadas conforme preconização normativa. Porém, considerando que se trata de um novo tipo de agregado graúdo, recomenda-se buscar a consolidação de resultados por meio de processos mitigantes de reprodutividade/repetitividade. Além disso, sugere-se avaliar a aplicabilidade por meio de testes contínuos ao longo prazo em concretos estruturais de resistência normal.

5.5 AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente à empresa HYDRO pelo fornecimento do resíduo de bauxita, a

CAPES pela bolsa de auxílio de doutorado, e ao PPGEC (Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil). Expresso gratidão ao LEC- e ao LEQ (laboratórios de engenharia civil e química da Universidade Federal do Pará), ao Laboratório de Análise da CPRM e à UNIFESP pela autorização de algumas análises utilizadas nesta pesquisa.

5.6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

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.

ALBUQUERQUE, NG. **Estudo das Propriedades Mecânicas de Concretos Dosados com Agregados Produzidos a partir de Lama Vermelha**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). UFPA - Departamento de Engenharia Civil, 2007.

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

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 15630**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. ABNT, 2009.

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 10341**. Agregado graúdo para concreto - determinação do módulo de deformação estático e do diagrama tensão-deformação em rocha matriz. ABNT, 2006.

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

ASTM C597-16 (Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete).

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.

Norma Mercosul, NM 67. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone: ABNT, 1996.

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

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

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

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.

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.

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.

ROSÁRIO, KA. **Concreto com utilização de agregado graúdo sintético produzido a partir da lama vermelha: estudos de dosagem, propriedades e microestrutura**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

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

6 ARTIGO 3 - INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DE AGREGADOS GRAÚDOS SINTÉTICO PRODUZIDO A PARTIR DE RESÍDUO DA MINERAÇÃO DE BAUXITA

RESUMO

Atualmente, o setor da construção civil está enfrentando desafios relacionados à redução de materiais naturais e ao aproveitamento de resíduos de mineração gerados ao longo do processo de produção do minério. Nesse sentido, é importante salientar a necessidade contínua de estudos que avaliem o uso de materiais alternativos em matrizes cimentícias. Neste contexto, sugere-se a utilização de agregados graúdos provenientes de resíduos de mineração de bauxita, em substituição aos agregados naturais, tanto para fins em concretos quanto em argamassas. Tal prática pode representar uma alternativa para a redução dos impactos gerados pelo setor construtivo. Contudo, o objetivo deste trabalho foi realizar uma comparação quantitativa dos impactos ambientais associados à produção e ao transporte de uma tonelada de agregados graúdos, sintetizados e naturais, utilizando o inventário de ciclo de vida. Os resultados do estudo realizado por Fernandes, R.S. et al. (2025) sugerem que os três tipos de agregados graúdos de resíduo de bauxita utilizados apresentaram melhor desempenho ambiental em três categorias analisadas, com reduções de mais de 95% em uma dessas categorias. Destaca-se, ainda, a influência do transporte nos resultados dos impactos obtidos, chegando a representar, para os agregados graúdos naturais, mais de 99% dos impactos totais. Isso enfatiza a importância da utilização de novos agregados graúdos produzidos com aproveitamento de resíduos de mineração como fator alternativo de substituição aos naturais.

Palavras-chave: Inventário de ciclo de vida (ICV); Agregados graúdos sintéticos; Agregados graúdos naturais; Resíduo de mineração; Impactos ambientais.

ABSTRACT

The construction sector is currently facing challenges related to the reduction of natural materials and the use of mining waste generated during the ore production process. In this sense, it is important to highlight the ongoing need for studies evaluating the use of alternative materials in cementitious matrices. In this context, the use of coarse aggregates from bauxite mining waste is suggested as a substitute for natural aggregates, both for concrete and mortar purposes. This practice could represent an alternative for reducing the impacts generated by the construction sector. However, the aim of this work was to carry out a quantitative comparison of the environmental impacts associated with the production and transport of one tonne of coarse aggregates, both synthesized and natural, using the life cycle inventory. The results of the study carried out by Fernandes, R.S. et al. (2025) suggest that the three types of bauxite residue coarse aggregates used showed better environmental performance in three categories analyzed, with reductions of more than 95% in one of these categories. The influence of transportation on the results of the impacts obtained is also noteworthy, accounting for more than 99% of the total impacts for natural coarse aggregates. This emphasizes the importance of using new coarse aggregates produced from mining waste as an alternative to natural aggregates.

Keywords: Life cycle inventory (LCI); Synthetic coarse aggregates; Natural coarse aggregates; from mining waste; Environmental impacts.

6.1 INTRODUÇÃO

Conforme exposto pela ANEPAC (2025), e de acordo com a última atualização realizada em 2022, a demanda de agregados foi de 640 milhões de toneladas, sendo 374 milhões de toneladas de areia e 266 milhões de toneladas de brita. Para 2023, previa-se um crescimento de 3%.

A literatura especializada contém diversos estudos sobre agregados reciclados ou alternativos, propostos para substituir agregados graúdos naturais na produção de concretos de cimento Portland de diferentes classes de resistência. Como apontam pesquisas de Angelin et al. (2018), não há estudos suficientes sobre o perfil ambiental desses agregados. O uso desses tipos de agregados ainda apresenta questões críticas, como a necessidade de análise das implicações ambientais e econômicas para identificar os recursos disponíveis que resultem em menores impactos (COLANGELO et al., 2018).

Sun et al. (2021) e Fernandes, R.S. et al. (2025) investigaram a otimização dos processos de produção de agregados artificiais a partir de resíduos de mineração de bauxita. Os parâmetros relacionados à microestrutura, à composição química e à temperatura de sinterização têm sido esclarecidos. Consequentemente, tais parâmetros viabilizam a produção de agregados artificiais com potencial para aplicação como alternativa ambientalmente sustentável na construção civil.

De acordo com a Norma Brasileira (NBR) ISO 14040, de 2014, a gestão ambiental é realizada por meio da avaliação do ciclo de vida, que abrange os princípios e a estrutura. Já a NBR ISO 14044, do mesmo ano, aborda os requisitos e as orientações. As referidas normas são complementares e estabelecem os fundamentos para a implementação das metodologias de definição de objetivos e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados.

O escopo do estudo abrange o sistema de produto a ser avaliado, a unidade funcional, a fronteira do sistema e suas limitações. Conforme demonstrado na seção anterior, a coleta de dados de entrada e saída do produto em estudo é realizada durante a fase de análise de inventário. De acordo com a fase de avaliação de impacto (AICV), os dados obtidos na etapa anterior são agrupados de acordo com categorias de impacto, auxiliando, assim, na interpretação de resultados, que corresponde à etapa final (2014).

O inventário do ciclo de vida (ICV) da produção de agregado graúdo sintético foi desenvolvido em escala de laboratório. Entretanto, este estudo calculou os prováveis impactos ambientais de sua produção em escala industrial. Para tanto, o estudo seguiu as orientações das normas NBR ISO 14040 (2014)⁶ e NBR ISO 14044 (2014).

Dessa forma, o objetivo do presente trabalho foi comparar, especificamente de forma

quantitativa, os impactos ambientais associados à produção e ao transporte de agregados graúdos naturais e sintéticos, utilizando a metodologia do Inventário de Ciclo de Vida (ICV). Esta ferramenta é capaz de prover suporte instrumental para o mapeamento e a mensuração dos impactos decorrentes da produção e do consumo de um material ao longo de seu ciclo de vida, bem como auxiliar na seleção de materiais ambientalmente mais favoráveis para aplicações específicas (Borges, 2014).

6.2 METODOLOGIA

6.2.1 Definição do objetivo

A elaboração do presente inventário deve-se à escassez de dados nacionais concernentes à produção de agregados alternativos, notadamente no tocante à produção de agregados sintéticos que utilizem os rejeitos da mineração de bauxita. Nesse sentido, os objetivos do inventário são: (i) realizar o inventário do ciclo de vida para a produção de agregado graúdo sintético; (ii) quantificar os benefícios ambientais obtidos com a produção dos agregados graúdos sintéticos; e (iii) obter indicadores primários das categorias de impactos ambientais relativos às mudanças climáticas em termos de gases do efeito estufa (GEE), depleção de recursos abióticos (DRA) e qualidade do ar e da água em termos de acidificação (ACI).

6.2.2 Definição do escopo

A unidade funcional do sistema é uma tonelada de agregado, que é a medida padrão empregada em estudos de ciclo de vida de agregados (Estanqueiro et al., 2018). Para a realização deste estudo, foram empregadas as dosagens de agregado sintético AGS70, AGS80 e AGS90, desenvolvidas por Fernandes, R.S. et al. (2025). O composto é formado por rejeito de mineração de bauxita, areia e argila, além de água de amassamento. Diante do exposto, optou-se por avaliar a dosagem de agregado graúdo sintético, visto que apresentou propriedades compatíveis para o desenvolvimento de concreto.

A Figura 51 ilustra o sistema de produto, com seus respectivos processos e fluxos elementares, conforme as etapas definidas no objetivo deste ICV. O sistema de produto em questão foi comparado à produção e ao transporte de agregados graúdos provenientes de Tracuateua (PA) e de Ourém (PA). O primeiro, denominado agregado britado, e o segundo, seixo rolado, ambos destinados ao campus da Universidade Federal do Pará, em Belém (PA).

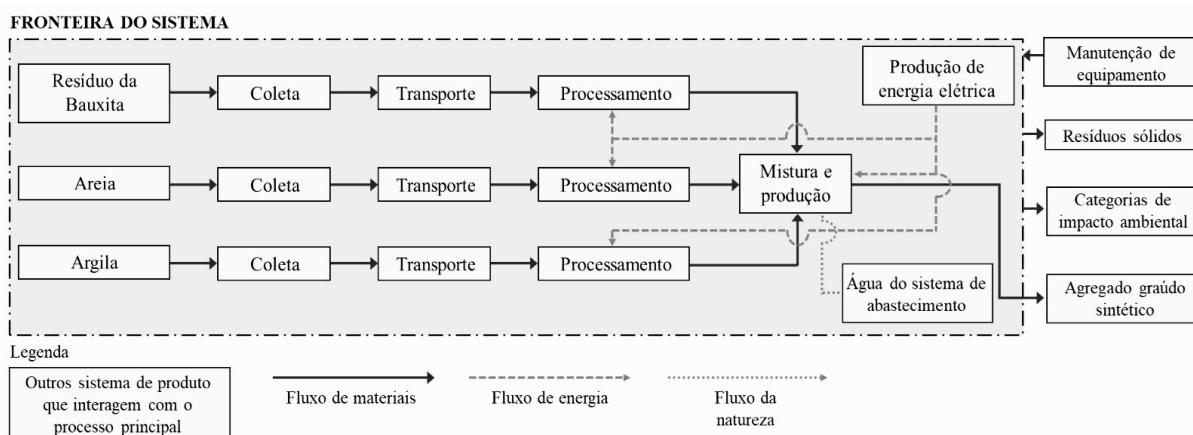


Figura 51 - Definição do sistema de produto para produção de agregados graúdos a partir de resíduo de mineração de bauxita.

6.2.3 Análise de inventário do ciclo de vida (ICV)

Os dados primários referem-se às distâncias de transporte dos insumos e à potência dos equipamentos utilizados. Já os dados secundários são provenientes da base de dados ECOINVENT, versão 3.8 (2021), e de estudos brasileiros sobre o tema. Foram selecionados para refletir as características do Brasil, visto que os insumos foram produzidos no território nacional. Essa premissa é relevante, pois as categorias de impacto ambiental podem variar conforme o nível tecnológico empregado, os processos produtivos, o tipo de combustível utilizado, a eficiência energética dos equipamentos, entre outros fatores. Conforme demonstrado nas tabelas 17 e 18, são apresentados os resumos dos dados primários de entrada para a produção e de transporte dos insumos utilizados neste estudo.

Tabela 17- Distância de transporte dos materiais.

Material	Local de obtenção	Distância (km)
Rejeito de bauxita	Hydro SA (Barcarena-PA)	113
Areia	Leito de rio (Ourém-PA)	191
Argila	Jazida de argila (São Miguel do Guamá-PA)	145
‘Seixo rolado	Leito de rio (Ourém-PA)	191
Brita	Pedreira em Tracuateua- PA	199

Tabela 18- Equipamentos utilizados na produção dos agregados sintéticos.

Equipamento	Função	Fator de potência (W)
Argamassadeira	Equipamento utilizado para mistura dos componentes do agregado sintético	1500
Estufa	Equipamento utilizado para secagem dos insumos e agregados sintéticos	3500
Forno elétrico	Equipamento utilizado para sinterização do agregado.	24000
Moinho de discos	Equipamento utilizado para redução da granulometria das matérias primas (areia, resíduo de bauxita e argila)	3750
Britador de mandíbulas	Equipamento utilizado para redução da granulometria do agregado graúdo sintético	30000
Extrusora	Equipamento utilizado para conformação dos agregados sintéticos	1100

Os cálculos foram realizados com base nos dados de quantidades para a produção de concreto e nos fatores de emissão, por meio da ferramenta Planilhas Google. As análises consideraram, de forma precisa, a unidade funcional e as fronteiras do sistema estabelecidas neste estudo.

A produção de agregados graúdos sintéticos em laboratório envolveu o uso de matérias-primas de alta qualidade, incluindo resíduo de bauxita *in natura* da empresa Hydro, argila da cidade de São Miguel do Guamá (PA), areia do leito de rio da cidade de Ourém (PA) e água da Companhia de Abastecimento de Água do Estado do Pará.

O resíduo de bauxita foi destorroado e secado em estufa a 100 °C por 24 horas. Depois, foi moído em um moinho de bolas por cerca de 2 horas, até obter a granulometria ideal para uso. A areia utilizada passou por um processo rigoroso de secagem em estufa a 100 °C por 24 horas e peneiramento, utilizando-se apenas o material passante em uma peneira com abertura de 150 µm. O objetivo do beneficiamento foi garantir um desempenho superior durante a sinterização, reduzindo significativamente os efeitos da granulometria da sílica nas reações de estado sólido subsequente. A argila foi secada em estufa a 100 °C por 24 horas e moída em um moinho de bolas por cerca de 2 horas até virar pó.

Após o processo de moagem, secagem e peneiramento, todos os materiais foram pesados com os seguintes percentuais: resíduo de bauxita em três teores (acima de 70%), areia e argila. A mistura (resíduo, areia, argila e água) foi depositada em uma betoneira de eixo inclinado. O objetivo é claro: a pelletização do agregado deve ser feita com formato semiesférico e granulometria heterogênea. Após a mistura, as pelotas foram imediatamente levadas à estufa, onde permaneceram por 24 horas a uma temperatura de 100 °C, até que estivessem

completamente secas. Após a secagem, os agregados foram sinterizados em um forno elétrico a uma temperatura entre 1200 °C e 1250 °C por 180 minutos, com resfriamento lento pelo resto do dia. O material foi então submetido aos processos de britagem, utilizando um britador de mandíbulas, e peneiração, utilizando a peneira de 4,75 mm para separação dos agregados obtidos em miúdos e graúdos.

A Figura 52.A ilustra as matérias-primas empregadas na produção do agregado graúdo sintético. A Figura 52.B ilustra um forno elétrico com capacidade térmica superior a 1000 °C. A Figura 2.C ilustra o material pelletizado no forno elétrico após as etapas de britagem e peneiramento. A Figura 53 ilustra de forma evidente o processo de produção do agregado graúdo sintético, empregando resíduos de bauxita, areia, argila e água.

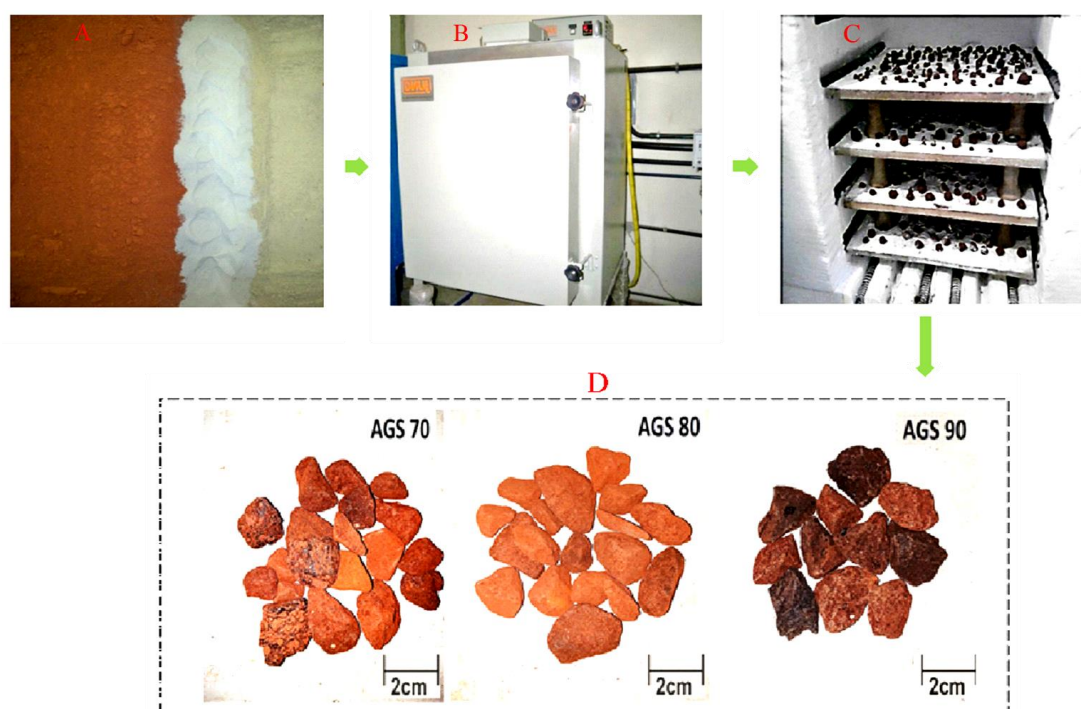


Figura 52- Sequenciamento simplificado da produção dos agregados graúdos sintéticos. A) mistura de resíduo de bauxita, areia e argila. B) vista forno elétrico fechado usado para sinterização dos agregados. C) vista forno elétrico aberto e amostras dos agregados sinterizados. Adaptado, Rosário, 2013¹⁰. D) três tipos de agregados sintéticos. Fernandes, R.S. et al. (2025)¹.

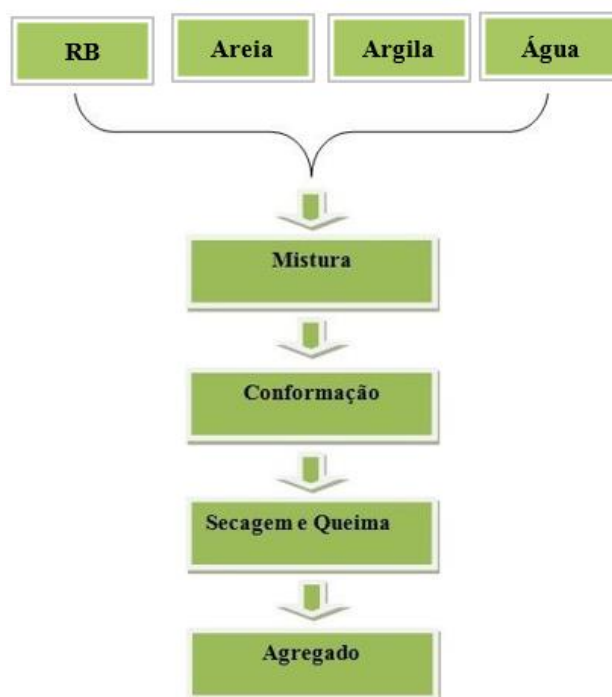


Figura 53 - Fluxograma da produção dos agregados graúdos sintéticos.

6.3 RESULTADOS

Nesta etapa, foram compilados e quantificados todos os fluxos de entradas (inputs) e de saídas (outputs), baseados na fronteira do sistema previamente definida. A coleta de dados foi realizada por meio da base de dados ECOINVENT, versão 3.8 (2021), de estudos acadêmicos anteriores e medições no próprio laboratório. Foram desenvolvidos dois sistemas de produtos distintos, designados como "agregado graúdo sintético" e "agregado graúdo natural", respectivamente.

A Tabela 19 apresenta os valores dos potenciais impactos ambientais dos diversos agregados graúdos analisados neste estudo. Conforme demonstrado na pesquisa, os agregados sintéticos AGS70, AGS80 e AGS90 apresentam um desempenho ambiental superior em todas as três categorias avaliadas quando comparados ao desempenho dos agregados graúdos naturais deste estudo.

Tabela 19 - Potenciais impactos ambientais por tonelada de agregado graúdo produzido e transportado.

Categorias de impacto ambiental	Referência unitária	Agregado graúdo sintético (AGS70)	Agregado graúdo sintético (AGS80)	Agregado graúdo sintético (AGS90)	Agregado graúdo britada (brita)	Agregado graúdo natural (Seixo rolado)
GEE (%)	kfg de CO2-eq	75	70	65	100	79
DRA (%)	kg de Sb-eq	3	3	3	100	91
ACI (%)	kg de SO2-eq	67	64	60	100	96

Os agregados graúdos sintéticos produzidos com resíduo de bauxita apresentam os menores

valores em todas as categorias de impacto ambiental neste estudo. Esse resultado é compatível com as conclusões a que chegaram Shang et al. (2002), que destacaram a superioridade dos agregados artificiais em termos de sustentabilidade quando comparados aos naturais.

A Figura 54 apresenta os percentuais de impactos para cada categoria, demonstrando que os agregados graúdos sintéticos apresentam ganhos ambientais potenciais em relação aos naturais, com variação entre 20% e 95%. Dentre as categorias analisadas, destaca-se a depleção de recursos abióticos, na qual os agregados graúdos sintéticos apresentam os menores valores de impacto ambiental.

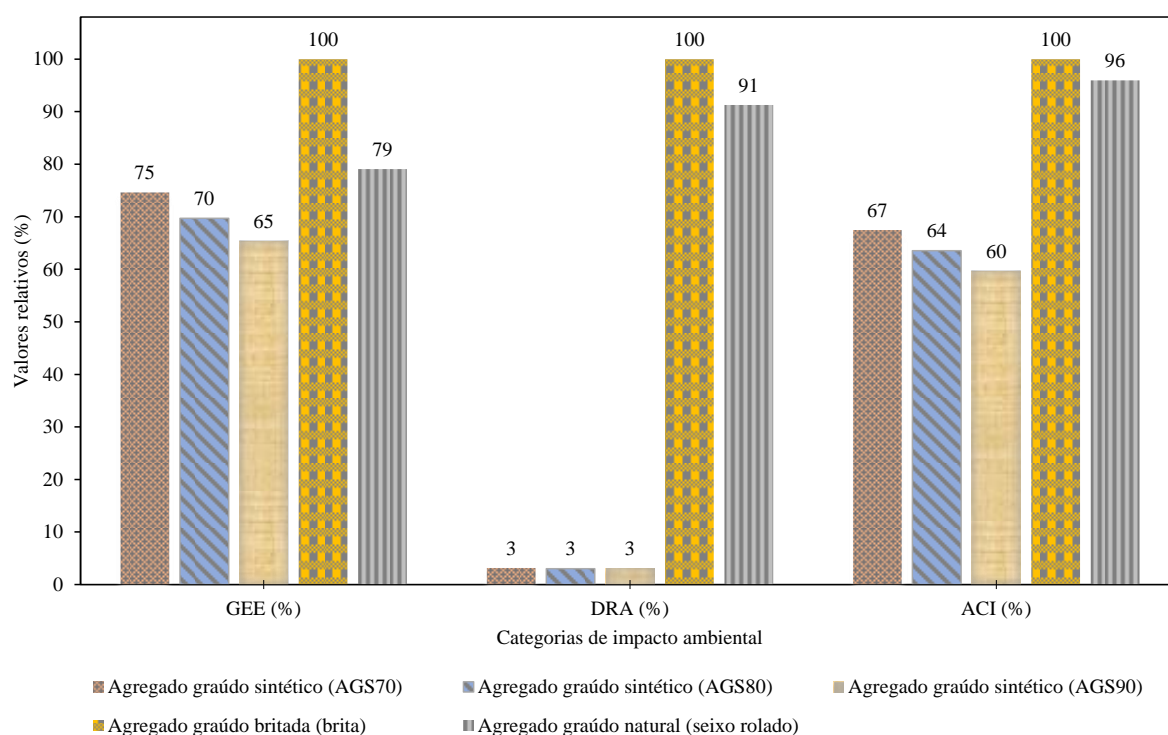


Figura 54 - Comparação percentual dos impactos ambientais potenciais relativos à produção e ao transporte de 1 Tonelada de agregado graúdo naturais e agregados graúdos sintéticos.

O menor impacto ambiental da produção de agregados graúdos sintéticos a partir do resíduo de bauxita na categoria de depleção de recursos abióticos decorre da utilização de uma matéria-prima secundária, do desvio de resíduos industriais do descarte inadequado e da redução da dependência de recursos minerais primários. Enquanto os agregados naturais são obtidos por meio de processos de extração mineral, que demandam a remoção de materiais geológicos finitos e não renováveis, os agregados artificiais AGS70, AGS80 e AGS90 utilizam, predominantemente, resíduos como matéria-prima.

Esse aproveitamento reduz a necessidade de extração de novos recursos minerais, contribuindo, portanto, para a preservação dos estoques naturais. Ademais, por se tratar de um subproduto gerado no beneficiamento da bauxita, o resíduo não gera pressão adicional sobre

as reservas de matérias-primas. A característica em questão explica os menores valores registrados pelos agregados sintéticos na categoria de depleção de recursos abióticos.

A Figura 55 demonstra a influência do transporte nos impactos ambientais totais obtidos. Considerando as distâncias dos locais de produção dos agregados até o laboratório — 113 km para o resíduo de bauxita, 191 km para a areia, 145 km para a argila, 199 km para a brita e 191 km para o seixo rolado —, verifica-se que o transporte rodoviário pode contribuir com até 99% do impacto ambiental de acidificação, independentemente do tipo de agregado graúdo.

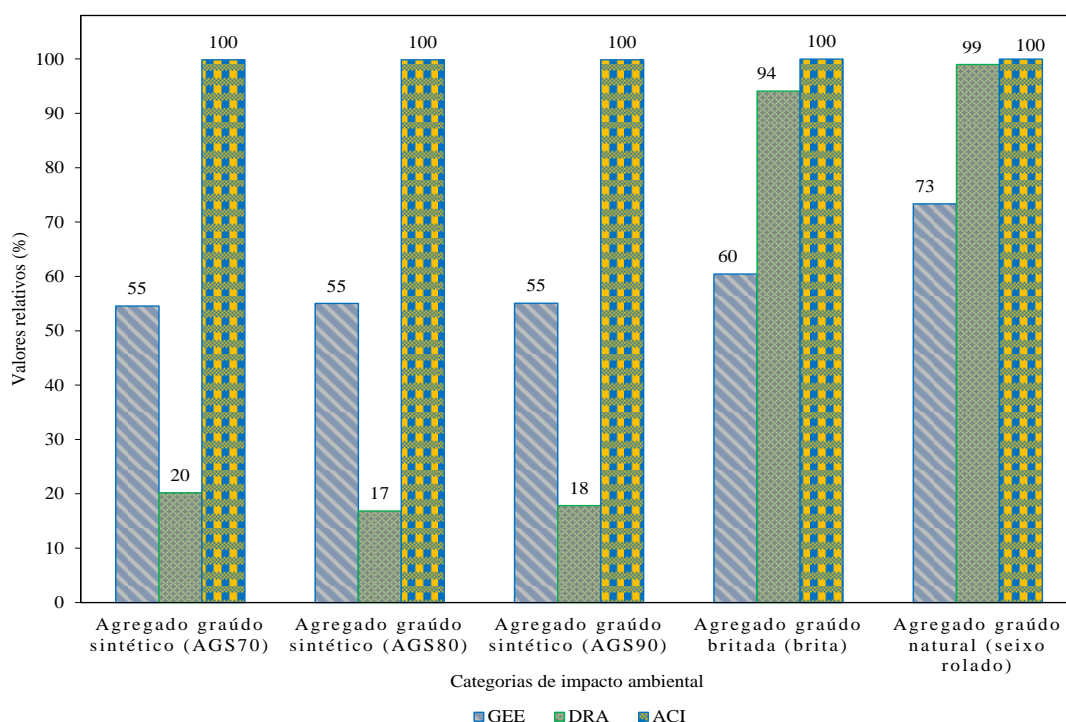


Figura 55 - Contribuição do transporte nos resultados de impactos obtidos para os agregados graúdos.

No que se refere aos agregados graúdos sintéticos, o transporte do resíduo utilizado na produção exerce influência majoritária nas categorias de impacto ambiental relacionadas à emissão de gases de efeito estufa e à acidificação, cujas contribuições alcançam aproximadamente, respectivamente, até 55% e 100% para cada categoria. Esse resultado está alinhado com a pesquisa de Shang et al. (2022), na qual os autores identificaram que a distância de transporte das matérias-primas constitui um fator crítico na produção de agregados provenientes de resíduos.

Ademais, observa-se que as emissões de gases de efeito estufa e a acidificação representam as categorias de impacto ambiental mais impactadas pelo transporte dos insumos empregados na produção de agregados graúdos sintéticos. Segundo Gonzaga, Araújo e Melo Neto (2020), o setor de transportes exerce influência significativa nas categorias de impacto ambiental, em

virtude do consumo de combustíveis fósseis, que resulta na emissão de gases como dióxido de carbono (CO₂), dióxido de nitrogênio (NO₂) e dióxido de enxofre (SO₂).

6.4 CONCLUSÕES

A metodologia de avaliação de ciclo de vida, aplicada por meio da ferramenta inventário do ciclo de vida, permitiu a comparação entre o desempenho ambiental da produção e transporte de uma tonelada de agregados naturais e sintéticos. Dentre os impactos decorrentes do uso de agregados sintéticos, destacam-se o transporte do resíduo e o beneficiamento para a produção do agregado.

Foi constatado que os impactos relacionados à produção de agregados graúdos sintéticos apresentaram ganhos ambientais potenciais em relação aos agregados naturais. Os menores valores registrados foram observados na categoria de impacto ambiental de depleção de recursos abióticos.

Em relação ao transporte, os agregados sintéticos reduzem os potenciais impactos ambientais, visto que o transporte dos insumos para três categorias de impactos analisadas apresenta redução de até 55,06% e 99,98% para cada categoria, em relação ao transporte das jazidas dos agregados graúdos naturais. Assim, é importante observar que, em geral, quanto maior a distância entre os locais de produção dos agregados e o destino final, maior o percentual do transporte nos resultados finais. De acordo com os dados apresentados, é possível afirmar que, para o seixo, esse percentual representou entre 63 e 99% dos valores totais de impactos ambientais.

Portanto, levando em conta a possibilidade concreta de esgotamento das jazidas localizadas nas proximidades das cidades metropolitanas de Belém (PA), a produção de agregados graúdos sintéticos em escala comercial, com otimização dos processos de controle de qualidade, pode ser uma alternativa ambientalmente viável para a construção civil.

6.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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).

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO. **ANEPAC**. Tendências para o mercado de agregados. Disponível em: <<https://anepac.org.br/mercado>>. Acesso em: 8 mar. 2025.

ANGELIN, A. F. ET. AL. Propriedades no estado fresco e endurecido do concreto autoadensável modificado com agregados leves e reciclados. São Paulo: **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, 2018, v. 11, n.7, p. 76-94, jan./fev.

COLANGELO, FRANCESCO *et al.* Life cycle assessment (LCA) of different kinds of concrete containing waste for sustainable construction. **Buildings**, v. 8, n. 5, p. 70, 2018.

SUN, YUEHUI; LI, JIANG-SHAN; CHEN, ZHEN; XUE, QIANG; SOL, QI; ZHOU, YIFAN; CHEN, XIN; LIU, LEI; POON, CHI SUN. Production of lightweight aggregate ceramsite from red mud and municipal solid waste incineration bottom ash: Mechanism and optimization. **Construction and Building Materials**, v. 287, p. 122993, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida: Princípios e estrutura. Rio de Janeiro. ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida: Requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

BORGES, P. H. R. *et al.* Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). Porto Alegre: **Ambiente Construído**, 2014, v. 14, n. 2, p. 153-168, abr./jun.

ESTANQUEIRO, BRUNO; SILVESTRE, JOSÉ DINIS; BRITO, JORGE; PINHEIRO, MANUEL DUARTE. Environmental life cycle assessment of coarse natural and recycled aggregates for concrete. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 22, n. 4, p. 429-449, 2018.

ROSÁRIO, KÁTIA ALRELHIA. **Concreto com utilização de agregado graúdo sintético produzido a partir da lama vermelha: estudos de dosagem, propriedades e microestrutura, 113 f.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil PPGEC, Belém, 2013.

SHANG, XIAOYU; CHANG, JIANLIN; YANG, JINGWEI; KE, XIAOJUN; DUAN, ZHENHUA. Life cycle sustainable assessment of natural vs artificial lightweight aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 367, p. 133064, 2022.

GONZAGA, NATHÁLIA LINS; ARAÚJO, MARIA LUIZA RAMALHO; MELO NETO, ANTÔNIO ACÁCIO. Avaliação do ciclo de vida aplicada a agregados naturais e agregados

reciclados. In: **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, v. 18, n. 1, p. 1-8, 2020.

7 CONCLUSÕES GERAIS

Considerando os resultados obtidos nesta pesquisa, é possível concluir que:

No tocante às caracterizações químicas, físicas e mecânicas dos agregados graúdos sintéticos, apenas os provenientes do terceiro ciclo de produção são considerados adequados para uso em concretos estruturais, de acordo com os resultados dos ensaios realizados em conformidade com a norma NBR 7211, de 2022;

Em ensaios de resistência mecânica, como a compressão axial, a tração por compressão diametral, a tração na flexão e os módulos de elasticidade estática, o concreto com maior percentual de resíduo proveniente de agregado graúdo sintético demonstrou resultados comparáveis ao concreto com agregado graúdo natural em idades mais avançadas. Diante do exposto, infere-se que, em virtude da maior capacidade de absorção de água do tipo de agregado em questão, quando comparado ao seixo rolado, este apresenta um desempenho superior;

Por meio de ensaios mecânicos realizados em corpos de prova de AGS, com dimensões de 50 x 100 mm, foi possível determinar o valor da resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade do agregado graúdo sintético. Dessa forma, é possível estabelecer uma correlação entre os resultados apresentados na literatura especializada acerca dos agregados naturais e britados. Ademais, com base nos resultados obtidos, foi possível determinar um coeficiente para atribuir ao AGS, a fim de atualizar o cálculo do módulo de elasticidade de um concreto de resistência normal.

A interface no concreto da matriz cimentícia e dos agregados graúdos foi verificada por meio da utilização de microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura (MEV). Foi observado que o agregado graúdo sintético apresenta poros de maior tamanho em comparação com o seixo, resultando em um fator que limita a absorção de água. A condição em questão é comprovada por meio da avaliação comparativa dos resultados do índice de vazios e da absorção de água.

A produção dos agregados graúdos sintéticos no âmbito laboratorial, considerando o transporte dos locais de origem das matérias-primas até o local de fabricação destes agregados, apresentou menores indicadores de impactos ambientais, como no caso da emissão de gases do efeito estufa, depleção de recursos abióticos e qualidade do ar e água em termos de acidificação, quando comparado inicialmente somente com transporte de outros agregados como o seixo rolado e a brita.

Durante o período de pesquisa, a proposta consistia em caracterizar e realizar testes/ensaios de vários tipos de agregados graúdos sintetizados, passando por diferentes estágios de produção,

até se alcançar o estágio atual. Nesse estágio, foram obtidos três tipos de agregados graúdos sintéticos, denominados AGS70, AGS80 e AGS90, que estão em conformidade com as normativas brasileiras para agregados, conforme a NBR 7211, de 2022. Nesta pesquisa, foi utilizada a caracterização física e mecânica para avaliar o melhor agregado, AGS90. Além disso, a qualidade do concreto estrutural foi testada com a substituição total do agregado graúdo natural por este tipo de agregado, que passou a ser denominado AGS e concreto de CAGS. Após a conclusão de todas as avaliações, a tese indica que o agregado graúdo sintético proveniente de resíduo de bauxita apresenta características que o torna adequado para uso em condições similares às dos agregados graúdos tradicionais e artificiais, bem como em concreto de cimento Portland de resistência normal, conforme os resultados obtidos neste trabalho. Esta pesquisa também oferece uma nova sugestão para a nomenclatura do agregado graúdo sintético de resíduo de bauxita para brita de resíduo de bauxita (BRB). Essa sugestão considera o processo de britagem pelo qual o agregado passa durante a produção.

8 SUGESTÕES FUTURAS

- Produzir agregado graúdo sintético mantendo o maior percentual de resíduo de bauxita na composição, mas ajustando parâmetros de produção que possibilitem um agregado menos poroso;
- Produzir concretos estruturais de alto desempenho com o uso do AGS para melhor avaliar a influência da resistência mecânica e módulo de deformação destes agregados em relação ao compósito;
- Avaliar os parâmetros de durabilidade física do concreto estrutural com AGS, através da influência da integridade deste tipo de agregado graúdo sob ação da carbonatação, penetração de cloretos, ataques por sulfato e reação álcali-agregado;
- Produzir e avaliar um PUC (pavimento urbano de concreto) utilizando o agregado graúdo sintético na modalidade convencional e também na condição pavimento drenante.
- Produzir e avaliar argamassas de assentamento de blocos cerâmicos ou de concreto, a partir da utilização de agregado miúdo proveniente do processo de abrasão do AGS;
- Produzir e avaliar argamassas colantes, a partir da utilização de agregado miúdo proveniente do processo de abrasão do AGS;
- Produzir e avaliar um tipo de concreto estrutural com a utilização de areia e brita sintética de resíduo de bauxita.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, A.F. **Recuperação de Finos de Barragens no Complexo Paraopeba I**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Belo Horizonte, 2012. 60 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Aproveitamento de rejeitos e estéril. **Análise de impacto regulatório**. Versão 1. ANM, 2020a. Disponível em <https://www.gov.br/anm/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/consultas-publicas/consulta-publica-04-2020-aproveitamentode-esteril-e-rejeitos-1>. Acessado em 10 mar. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas ano base 2019**. Brasília: ANM, 2020b.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – **IBRAM**. Ano 2017. Disponível em: <http://www.abal.org.br/> Acesso em: 10 mar. 2025.

SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO, MINERAÇÃO E ENERGIA DO ESTADO DO PARÁ - **SEDEME**. Sinopse da Produção Mineral do Pará 2020. Belém: SEDEME, 2020.

SAMPAIO, J. A.; ANDRADE, M. C.; DUTRA, A. J. B. 2005. **Bauxita. In: Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações**. Rio de Janeiro: CETEM. Parte II. Cap.13. p. 279-304.

RIBEIRO, M. C. D. **Agregado sintético de resíduo de Bauxita para produção de concreto**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2022.

MAGALHÃES, EDILSON MARQUES. **Estudo da Extração de Compostos de Ferro da Lama Vermelha Visando a Concentração e/ou Extração de Compostos de Titânio**. Tese (doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – **IPEA**. alumínio-2019-ano-base-2018. Disponível em: <http://www.gov.org.br> Acesso em: 10 mar. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO – **ABAL**. Ano 2017. Disponível em: <http://www.abal.org.br> Acesso em: 10 mar. 2025.

HYDRO. Ano 2022. Disponível em: [http:// www.hydro.com/br](http://www.hydro.com/br) Acesso em: 10 mar. 2025.

POWER, G.; GRÄFE, M.; KLAUBER, C. Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices, **Hydrometallurgy**, v. 108 p. 33–45, 2011.

HUAA, Y.; HEALB, K. V.; FRIESL-HANIC, W. The use of red mud as an immobilizer for metal/metalloid contaminated soil: A review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 325, p. 17–30, 2017.

CARDOSO, J. G. R.; CARVALHO, P. S. L.; FONSECA, P. S. M.; SILVA, M. M.; ROCIO, M. A. R. A indústria do Alumínio: Estrutura e Tendências. Insumos Básicos. **BNDES Setorial** 33, p. 43-88, 2012.

SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M.; DA MOTTA, M. Lama Vermelha da Indústria de Beneficiamento de Alumina: Produção, Características, Disposição e Aplicações Alternativas. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 2, p. 322-338, 2007.

LIMA, FÁDIA SIMONE SILVA. **Utilização da lama vermelha e do resíduo caulínico na produção de pigmento pozolânico para argamassas e concretos de cimento Portland**. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2006.

KALKAN, E. Utilization of red mud as a stabilization material for the preparation of clay liners. **Engineering Geology**, v. 87, p. 220–229, 2006.

GOMES, PEDRO LEONARDO SECCO. **Pigmentos Pozolânicos Produzidos a Partir de Misturas de Lama Vermelha e Caulim para Argamassas Coloridas**. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

MANFROI, ELIZ PAULA. **Avaliação da Lama Vermelha como Material Pozolânico em Substituição ao Cimento para Produção de Argamassas**. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SOUZA, J, A, S. **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 de Recursos Naturais da Amazônia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

CHAVES, A. G. F. **A lama vermelha e sua eliminação da fábrica de alumina. 2ª semana de estudos. Alumínio e Zinco**. Sociedade de Intercâmbio Cultural e Estudos Geológicos dos

Alunos de Ouro Preto, MG, 1962.

ALBUQUERQUE, N. G. **Estudo das propriedades mecânicas de concretos dosados com agregados produzidos a partir de lama vermelha**. 2007. Trabalho de conclusão de curso. (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

ROSSI, C. R. C. **Concretos para reparo com agregados de lama vermelha sob abrasão hidráulica**. 2009. Trabalho de conclusão de curso. (Especialização em Engenharia Civil)- Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.

SANTOS, D.H. **Utilização do Rejeito do Processo Bayer como Matéria-Prima na Produção de Agregados Leves**. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Elétrica) - Programa de pós-graduação em engenharia elétrica, Belém-PA. P. 73, 2011.

ROSÁRIO, K. A. **Concreto com Utilização de Agregado Graúdo Sintético Produzido a Partir da Lama Vermelha: Estudos de Dosagem, Propriedade e Microestrutura**. 2013, 113p, il. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém-PA, 2013.

REIS, A.W.C. **Caracterização Mineralógica do Agregado Obtido a Partir da Lama Vermelha do Processo Bayer**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2014.

SOUZA, PEDRO HENRIQUE RODRIGUES DE. *et al.* **Utilização da Lama Vermelha para Produção de Agregado Sintético**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 04, Ed. 03, Vol. 06, pp. 30-43. março de 2019. ISSN: 2448-0959.

NUNES, A. S. **Desenvolvimento de Cerâmicas Refratárias com Substituição da Argila Refratária por Sílica da Casca de Arroz, Microfibras Cerâmicas e Fibras de Aço: Caracterização das Propriedades Físicas, Mecânicas e Térmicas**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Pampa, 2017.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. Volume 1. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

CALLISTER, WILLIAM D., JR.; RETHWISCH, DAVID G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares. 9. ed – Rio de Janeiro: LTC, 2018.

KAZMI, S. M. S.; ABBAS, S.; SALEEM, M. A.; MUNIR, M. J.; KHITAB, A. Manufacturing of Sustainable Clay Bricks: Utilization of Waste Sugarcane Bagasse and Rice Husk Ashes. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 29–41, 2016.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. Tradução Ruy Alberto Cremonini. 2ª ed. Porto Alegre/RS: Bookman, 2013.

GAO, H.; XIA, S.; CHEN, F.; STUEDLEIN A., W.; LI, X.; WANG, Z.; SHEN, Z.; CHEN, X. Dynamic Shear Modulus and Damping of Cemented and Uncemented Lightweight Expanded Clay Aggregate (LECA) at Low Strains. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 142, p.1-11, January, 2021.

ROCES-ALONSO, E.A.; GONZÁLEZ-GALINDO, J. Experimental Study on Grain Failure of Lightweight Expanded Clay Aggregate Under Uniaxial and Biaxial Load Conditions. **Powder Technology**, 383, p. 542–553, January 2021.

RASHAD, A.M. Lightweight Expanded Clay Aggregate as a Building Material – An Overview. **Construction and Building Materials**, 170, p. 757–775, march 2018.

NAHHAB, A.H.; KETAB, A.K. Influence of Content and Maximum Size of Light Expanded Clay Aggregate on the Fresh, Strength, and Durability Properties of Self-Compacting Lightweight Concrete Reinforced with Micro Steel Fibers. **Construction and Building Materials**, 233, 117922, December, 2019.

APÊNDICE A – Tabela A.1 ARTIGO 2

- Resumo dos resultados dos ensaios de resistência mecânicas em diversas idades dos concretos CAGN e CAGS e caracterizações quanto ao índice de vazios, absorção de água e massa específica aparente do concreto.

Tabela A.1 – Resultados dos ensaios de resistência mecânicas, índice de vazios, absorção de água e massa específica aparente dos concretos CAGN e CAGS.

AMOSTRA	IDADES (Dias)	σ (MPa)- CV(%)	$f_{c,t}$ (MPa) - CV(%)	$f_{s,t}$ (MPa) - CV(%)	E (GPa) - CV(%)	ABS (%) - CV(%)	Índice Vazios - CV(%)	Massa esp. Aparente (Kg/m³) -
CAGN	7	17,63 - 4,94	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	28	22,63 - 0,20	2,25 - 0,15	2,01 - 0,00	21,69 - 0,74	6,12 - 0,01	12,37 - 0,03	2050,00 - 0,00
	91	28,76 - 0,18	NA	NA	22,38 - 2,95	NA	NA	NA
	277	29,86 - 0,12	NA	NA	22,25 - 0,17	NA	NA	NA
CAGS	7	16,38 - 1,63	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	28	22,12 - 7,73	2,42 - 0,38	3,07 - 0,00	19,68 - 0,34	8,96 - 2,75	18,4 - 0,02	2050,00 - 0,00
	91	26,06 - 66,95	NA	NA	22,54 - 8,90	NA	NA	NA
	277	29,70 - 0,42	NA	NA	21,05 - 1,31	NA	NA	NA

Legenda: NA (Não avaliado). CV: coeficiente de variação (VAR.A). CAGS: Concreto com agregado graúdo natural. CAGS: Concreto com agregado graúdo sintético

APÊNDICE B – Tabela B.1 ARTIGO 3

- Impactos ambientais gerados pela utilização de agregados graúdos a partir da contribuição dos impactos oriundo dos transportes dos insumos dos agregados graúdos sintéticos e dos agregados graúdos naturais e britados.

Tabela B.1 – Contribuição do transporte nos resultados de impactos obtidos para os agregados graúdos.

Influência do transporte em cada categoria	Referência unitária	Agregado graúdo sintético (AGS70)	Agregado graúdo sintético (AGS80)	Agregado graúdo sintético (AGS90)	Agregado graúdo britada (brita)	Agregado graúdo natural (seixo rolado)
GEE	kfg de CO2-eq	55	55	55	60	73
DRA	kg de Sb-eq	20	17	18	94	99
ACI	kg de SO2-eq	100	100	100	100	100

APENDICE C – ARTIGOS PUBLICADOS



IOSR Journals

International Organization
of Scientific Research

Australia | Qatar | India | New York | Malaysia

Certificate

Office Code :	M1867	Date :	2025-02-17
MIC No. :	2854	Status :	Published

Article Details

This is to certify that following paper has been published in IOSR Journals.

Article Title :	Use of Mining Waste for The Production of Coarse Aggregate for Concrete Manufacturing
Author's Name :	Robson Da Silva Fernandes, Joao Carlos Lisboa De Lima, Sabino Alves De Aguiar Neto, Rodrigo Rodrigues Da Cunha , Kleber Roberto Matos Da Silva , Celestina Lima De Rezende Farias , Marcelo Martins Farias , Elsimar Souza Santos, Crislayne De Miranda Moraes , Elielson Oliveira De Sousa , Leonardo Sousa Duarte , Adonay Saraty De Carvalho , Aldemar Batista Tavares De Sousa , Marcelo De Souza Picanco, Alcebiades Negro Macedo
Journal Name :	IOSR Journal of Business and Management
ISSN :	2278-487X
Publisher Name :	International Organization of Scientific Research
Journal Url :	www.iosrjournals.org
Publishing Model :	Open Access Publishing
Review Type :	Blind Peer Review Process
Journal Type :	Indexed Refereed Journal
Volume No. :	27
Issue No. :	02
Article DOI :	10.9790/487X-2702050922



Signature
Editorial Manager
IOSR Journals
support@iosrmail.org

Use Of Mining Waste For The Production Of Coarse Aggregate For Concrete Manufacturing

Robson Da Silva Fernandes¹, João Carlos Lisboa De Lima¹,
Sabino Alves De Aguiar Neto², Rodrigo Rodrigues Da Cunha³,
Kleber Roberto Matos Da Silva³, Celestina Lima De Rezende Farias³,
Marcelo Martins Farias³, Elsimar Souza Santos¹,
Crislayne De Miranda Moraes¹, Elielson Oliveira De Sousa¹,
Leonardo Sousa Duarte⁴, Adonay Saráty De Carvalho¹,
Aldemar Batista Tavares De Sousa¹, Marcelo De Souza Picanço¹,
Alcebíades Negrão Macedo¹

¹ (Institute Of Technology, Faculty Of Civil Engineering / Federal University Of Pará, Brazil)

² (Civil Engineering / State University Of Pará)

³ (Civil Engineering / Federal Institute Of Education, Science, And Technology Of Pará, Brazil)

⁴ (Civil Engineering / University Of Amazônia, Brazil)

Abstract:

Background: The bauxite residue, also known as red mud, is a byproduct of the bauxite beneficiation process through the Bayer method, generated in large volumes and with significant environmental challenges. To minimize its impacts, this study proposes the production of synthetic coarse aggregates (SCA) from this residue, aiming for its application in Portland cement structural concrete.

Materials and Methods: The production process involved a preliminary step and three optimization cycles, with tests for evaluating chemical composition, bulk density, granulometry, shape index, water absorption, mechanical strength, and durability.

Results: In the third cycle, the aggregates achieved satisfactory geometric conformation, adequate strength, and good durability, although water absorption still needs to be reduced.

Conclusion: The results demonstrate the potential of this material as a sustainable alternative for the substitution of natural aggregates, contributing to the reduction of environmental impacts from mining.

Key Word: Synthetic coarse aggregate; bauxite residue; production cycles, tests.

Date of Submission: 08-02-2025

Date of Acceptance: 18-02-2025

I. Introduction

The exploitation of natural resources causes a shortage of raw materials, which drives the search for alternative materials, clean sustainability, and waste recycling techniques¹. In this way, there is a need to seek viable and economical alternative solutions in the construction industry as a means of overcoming the limitations of natural resources and reusing waste that is harmful to the environment².

The Brazilian Amazon has one of the largest and most diverse mineral reserves on the planet, and the state of Pará is the leading mining state in the Amazon, where the mineral sector accounts for 40% of exports and 12% of the state's Gross Domestic Product³.

The mineral extraction industry occupies a significant position as one of the most vital industries in the region, generating substantial economic and social effects on a national scale. However, its environmental effects lead to a negative impact in the areas where mining is carried out⁴.

Bauxite residue belongs to a group of waste materials known as "tailings," which result from the beneficiation of ores by the mineral extraction industry. These residues are soils that once contained the mineral of interest or result from the grinding of rocks. Depending on the extraction process, chemical substances may be added, such as caustic soda, which is used in alumina refining^{5,6}.

One of the biggest challenges faced by the bauxite beneficiation industry is the environmentally appropriate disposal of the waste generated during the clarification process, known as bauxite residue. This waste requires large areas for storage, and treating these areas (deposition ponds) is very costly^{7,8}. The construction of a storage basin requires an investment of approximately \$8.3 million⁹.

There are 85 alumina production plants worldwide, with an average bauxite residue generation of approximately 1.2 tons of sludge per ton of alumina produced. Annually, 169 million tons of this residue are generated worldwide, with around 2.5 billion tons currently stored^{10,11}.

For this reason, this field of study has gained momentum globally over the past decades, as both the public sector and private companies express enthusiasm for the discoveries made in this area. Waste recycling is a crucial and indispensable measure to mitigate the ecological impacts caused by large industrial manufacturing processes^{12,13}.

It has been proven that bauxite residue has great potential as a raw material when combined with silica and clay mixtures to produce synthetic coarse aggregates. This idea emerged from the increasing need to reduce, and eventually eliminate, the use of natural coarse aggregates in concrete applications. It presents an interesting alternative to decreasing the exploitation and use of natural aggregates.

In general, this research aligns with studies from various authors who confirm the technical feasibility of using bauxite residue to manufacture coarse aggregates, particularly for structural concrete applications. However, this research stands out by presenting three different types of aggregates, varying only in the percentage of residue used in each composition, and by producing aggregates with a shape similar to commercially available crushed stone used in construction. Another highlighted aspect of this study is the demonstration of the stages involved in refining the production process to provide better understanding for the reader.

In the initial phase, twenty-five sample types were produced, varying the amount of residue and sintering time. Based on specific characterization analyses, the process advanced to a second stage, called the first production cycle, in which four types of samples were tested with variations in both the residue percentage and sintering time. In the third stage, or second production cycle, the variation was solely in the percentage of residue used, while maintaining a constant sintering temperature of 1200°C.

A third stage, or third production cycle (the current phase), was necessary to adjust the geometric conformation of the three aggregate types and to correct the high porosity and void index observed in AGS90. This required an increase in the sintering temperature to 1250°C, resulting in a darker appearance compared to AGS70 and AGS80, which were produced at 1200°C and retained a more reddish color.

II. Material And Methods

For the production of synthetic coarse aggregate, three raw materials were used: kaolinitic clay, acquired from the ceramic industrial hub of São Miguel do Guamá-PA, extracted with authorization from the competent environmental agencies; silica (sand with low iron concentration), purchased from the civil construction market in Belém-PA; and bauxite residue (BR), supplied by the company Hydro-ALUNORTE in Barcarena-PA and stored in the Civil Engineering Laboratory at UFPA.

The clay, silica, and bauxite residue were dried in an oven with air recirculation at a temperature of 105°C for 24 hours to remove excess moisture and prevent crack formation in the aggregate. They were also disaggregated using a ball mill, model WORK INDEX series 005, followed by a disk mill for 30 minutes. These processes are necessary to achieve better granulometric control, using particles smaller than 150 µm. It is important to note that silica has a spherical morphology and a high surface area when the particle diameter is less than 150 µm, which increases the efficiency of sintering reactions¹⁴.

The research phases initially involved a primary process followed by three improvement processes corresponding to three production cycles. This study aims to indicate the technical feasibility of using these synthetic coarse aggregates in structural concrete.

Table no 1: Percentage of residue, temperature, and sintering time of aggregate samples – Preliminary stage.

Sample	Bauxite residue (%)	Temperature (°C)	Time (h)
C1	60	1250	3
C2	60	1250	3
C3	70	1250	3
C4	60	1250	3
C5	70	1250	3
C6	60	1250	3
C7	80	1250	3
C8	70	1250	3
C9	80	1200	2
C10	60	1250	3
C11	75	1250	3
C12	75	1250	0,5
C13	75	1200	3
C14	75	1250	3
C15	60	1225	3
C16	70	1250	3

C17	70	1200	3
C18	70	1250	3
C19	70	1225	3
C20	70	1200	3
C21	70	1150	3
C22	80	1200	3
C23	85	1150	3
C24	80	1150	3
C25	77,5	1150	3

After the preparation of the raw materials, the experimental process for producing twenty-five types of samples was initiated by mixing the raw materials—bauxite residue, silica, clay, charcoal as biomass, and lime—identified as C1 to C25, as shown in Table 1. These samples underwent treatment and homogenization in a ball mill for 30 minutes. After homogenization, they were placed in a dry rotary drum and a continuous extruder to form the aggregates into pellets. Subsequently, the pellets were dried in an oven at 105°C for 24 hours before proceeding to sintering at different temperatures and durations.

The synthetic aggregates sintered using the rotary drum method are shown in Figure 4, with diameters ranging between 0.5 and 1.5 cm.

Figure 1: Appearance of pelletized synthetic aggregates after sintering.

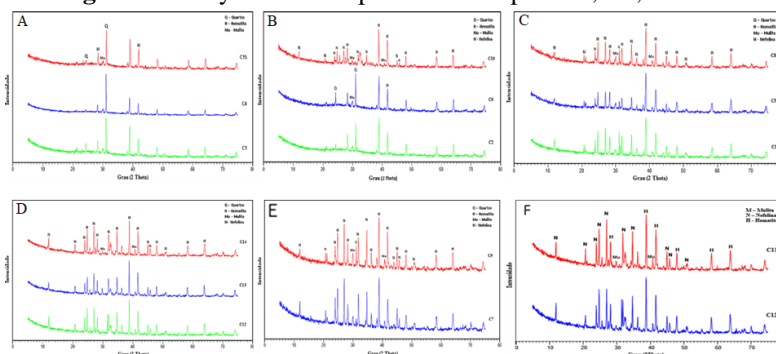


Figure 1 shows the completed sintering process, which represents the closing of pores associated with the mechanical strength of the aggregates. The efficiency of solid-state reactions is responsible for the formation of mullite and the vitreous phase. These interactions can be controlled through adjustments in the granulometry of raw materials, sintering temperature and time, and matrix formulation^{14,15}.

The samples underwent X-ray diffraction (XRD) analysis, and the results indicated the presence of quartz, hematite, mullite, and nepheline minerals. Mullite was found in all samples, identified through its characteristic peaks. The amount of mullite formed is associated with an increase in the mechanical strength of ceramic materials. Studies conducted by¹⁴ showed that the reduction in quartz content is related to the increased formation of mullite.

Figure 2 presents the XRD analyses of the samples containing 60% to 80% bauxite residue, corresponding to C1 to C15, sintered at temperatures ranging from 1225°C to 1250°C. The analyses at different sintering temperatures aimed to verify the influence of this variable on the formation of new mineral phases.

Figure 2: X-ray diffraction pattern of samples C1, C4, and C15.



In panel A of Figure 2, the diffraction pattern shows the presence of quartz, hematite, and mullite minerals. In sample C15, even at a lower sintering temperature compared to the other samples, the behavior of the crystalline phases is similar to C1 and C4, with no significant changes in the sample peaks. In panel B, sample C2 was influenced by biomass during the sintering process, sample C10 by lime, and sample C6 by silica in the mineralogical transformations. In sample C6, a more intense quartz peak is observed, indicating that part of the silica in the sample did not react to form new phases. Comparing the influence of lime and biomass in the composition, it is noted that lime had a greater impact on the formation of new phases, such as nepheline.

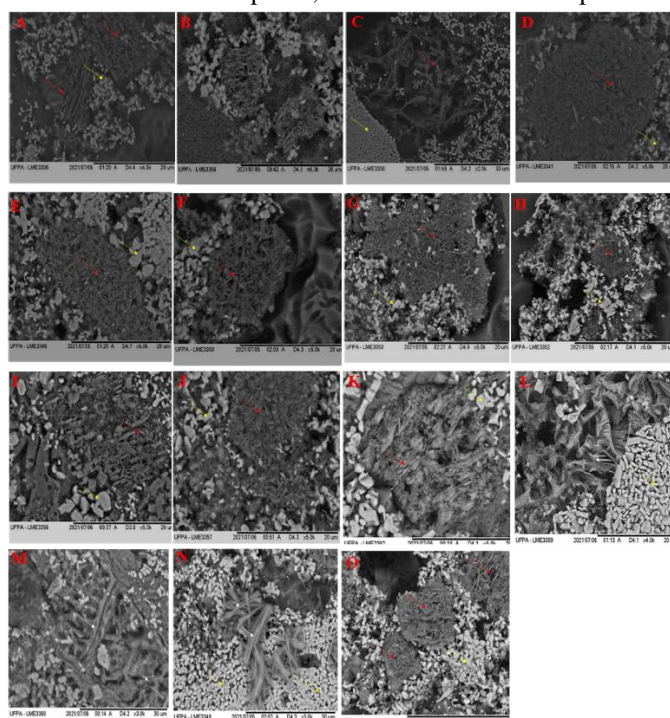
In this case, calcium and magnesium oxides present in the lime act as fluxes during sintering, forming a low-viscosity vitreous phase that facilitates the growth of crystalline phases. During the thermal treatment of bauxite residue, due to a considerable amount of sodium and silicon oxides, $\text{Na}_5\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{15}$ species—precursors of nepheline—are formed¹⁶. This can be confirmed by analyzing panels C to E, where the samples contain 70% or more bauxite residue in their composition, with nepheline as the predominant phase. The diffraction patterns of samples C3, C5, and C8, which contain 70% residue and were sintered at 1250°C, are shown in panel 3. These samples contain 25%, 15%, and 30% clay, respectively. It is also observed that there is a similarity in the formed phases among the samples, with some differences in the intensities of the quartz, hematite, mullite, and nepheline peaks.

In panel D, samples C12, C13, and C14, which have the same raw material composition but were sintered at different temperatures and durations (1250°C for 0.5 h, 1200°C for 3 h, and 1250°C for 3 h, respectively), are compared to evaluate the influence of these variables on mineral transformations. Based on the X-ray diffraction results, an increase in temperature led to a greater formation of nepheline, as indicated by the higher peak intensity in samples C12 and C14. Regarding the sintering time, no significant differences in peak intensity were observed between samples C12 and C14, suggesting the possibility of reducing the sintering duration. In panel 5, diffraction patterns of samples C7 and C9, which have the same raw material composition but were sintered at 1250°C for 3 hours and 1200°C for 2 hours, respectively, are analyzed. In sample C7, greater mullite formation was observed, leading to higher intensity in its characteristic peaks. In panel F, diffraction patterns of samples C11 (0.5 hours) and C12 (3 hours), which have the same raw material composition, were compared to assess the influence of sintering time on the formation of new phases. Based on the results, no significant changes were observed between the two samples, although the peaks related to the nepheline phase showed slight differences when comparing the two diffraction patterns. This suggests the possibility of reducing the sintering time while maintaining the mineralogical characteristics of the material.

Figure 3 presents the scanning electron microscopy (SEM) analyses for the aggregate samples from C1 to C15, according to the composition, temperature, and sintering time characteristics shown in Table 1.

The SEM analysis was necessary to observe the phase formations in the aggregate during sintering, such as the vitreous phase and mullite. Mullite is commonly found in ceramic minerals, typically in the form of flakes and needles. It originates from composite phases such as alumina and silica from kaolin, with the primary form appearing as flakes. Mullite that crystallizes from molten or low-viscosity phases, forming needle-like structures, is termed secondary mullite. When derived from kaolinite, it appears as needle-shaped structures at temperatures above 1200°C, depending on the level of impurities present or the assistance of molten phases¹⁴.

Figure 3: Scanning Electron Microscopy of Samples C1 to C15. a) C1 at 4000x magnification. b) C2 at 5000x. c) C3 at 2500x. d) C4 at 5000x. e) C5 at 5000x. f) C6 at 5000x. g) C7 at 5000x. h) C8 at 5000x. i) C9 at 5000x. j) C10 at 5000x. k) C11 at 5000x. l) C12 at 4000x. m) C13 at 3000x. n) C14 at 3000x. o) C15 at 5000x. White arrow: unidentified phase; Yellow arrow: vitreous phase.



The preliminary results of scanning electron microscopy indicate the presence of secondary mullite with an acicular morphology. This formation occurs in post-reactive processes through solid-state reactions or thermal decomposition. In the case of stoichiometric mixtures of alumina and silica powders, mullite formation occurs between temperatures of 1400 and 1800°C. However, when dealing with bauxite residue, this temperature can be reduced due to the presence of fluxing oxides, which form a low-viscosity vitreous phase, facilitating the growth and formation of secondary mullite crystals.

After the initial experimental stage, the subsequent stages were referred to as production cycles. In the first cycle, four types of synthetic coarse aggregates were produced, followed by three in the second cycle, and finally, three more in the third cycle. These were developed by the engineering team at the Chemistry Laboratory of the Federal University of Pará. The samples were identified in the first cycle as A1, A2, A3, and A4, while in the second and third cycles, they were labeled AGS70, AGS80, and AGS90, corresponding to compositions containing 70%, 80%, and 90% bauxite residue, respectively.

Figure 4 illustrates the progress in improving the conformation (physical aspects) of these aggregates up to the current phase (third cycle). Table 1 presents the characterization tests conducted, following the NBR 7211:2022¹⁷ standard, carried out in the Civil Engineering Laboratory of the Federal University.

Figure 4: Samples from the first stage of the AGS production process. Samples designated as A1, A2, A3, and A4.

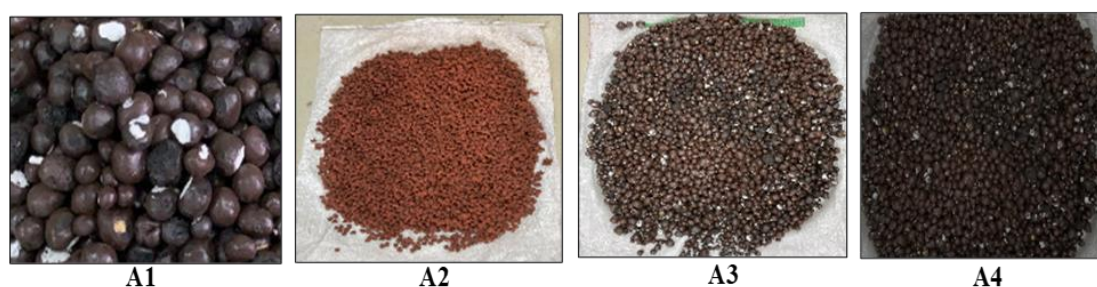


Figure 7 shows photographs of the samples in rounded shapes with the following designations: A1, containing 60% bauxite residue in its composition; A2, with 85%; A3, with 85%; and A4, with 80%. Leaching and solubilization tests were also conducted, indicating the feasibility of producing synthetic aggregates at this stage, even with concentrations above 80%, while maintaining safety standards—particularly regarding NaOH content, which remains within the limits required by leaching and solubilization regulations. In this context, samples A2 to A4 contained the highest amounts of bauxite residue, increasing its reuse without compromising physical characteristics or application potential, as presented in Table 2.

Table no 2: Composition, temperature, and sintering time of aggregate samples – First production cycle.

Sample	Bauxite Residue (%)	Sílica (%)	Clay (%)	Lime (%)	Temperature (°C)	Time (h)
A1	60	15	25	-	1250	3
A2	85	10	5	-	1150	3
A3	85	10	5	-	1200	3
A4	80	15	5	-	1200	3

In order to increase the consumption of bauxite residue and the scale of aggregate production, some adjustments were made to the process aiming for a production of 350 kg/week of aggregate. The adjustments resulted in three types of aggregates (AGS70, AGS80, and AGS90), as shown in Table 3.

Table no 3: Composition, bulk density, temperature, and sintering time of the aggregate samples.

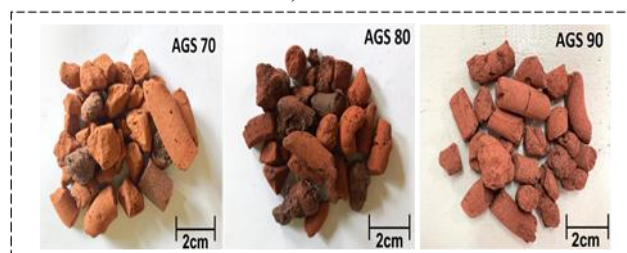
Sample	Bauxite Residue (%)	Sílica (%)	Clay (%)	specific gravity (g/cm³)	Temperature (°C)	Time (h)
AGS70	75 - 70	20 - 25	5	< 1,5	1200	3
AGS80	85 - 80	10 - 15	5	> 1,5 e < 2,0	1200	3
AGS90	95 - 90	0 - 5	5	> 2,0	1200	3

The aggregate samples presented in Table 3 are based on the results obtained so far, which indicated that it would be possible to produce synthetic aggregates in different proportions of raw materials (bauxite residue, silica, and clay) and, primarily, in line with the specifications of commercially used aggregates (light, normal, and heavy). Additionally, the use of the AGS70, AGS80, and AGS90 samples aims to increase the production scale of the aggregate and consequently the consumption of bauxite residue.

In the production of the AGS70, AGS80, and AGS90 samples, control was carried out through the composition ranges, bulk density, temperature, and sintering time to ensure compliance with legislation for

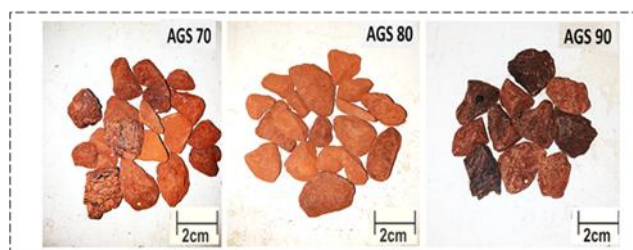
potential commercialization of the product. The bulk density values were controlled to produce aggregates similar to those used commercially. Figure 5 shows the physical aspects of the synthetic coarse aggregates in the second stage of production.

Figure 5: Samples from the second stage of the AGS production process. Samples designated AGS70, AGS80, and AGS90.



At this stage of the research, AGS70 had a maximum diameter of 19.0 mm, a fineness modulus of 7.37, a shape index of 1.39, an abrasion loss (Los Angeles) of 31.0%, and a water absorption of 2.60%. AGS80 had a maximum diameter of 19.0 mm, a fineness modulus of 6.71, a shape index of 1.77, an abrasion loss (Los Angeles) of 38.0%, and a water absorption of 8.12%. AGS90 had a maximum diameter of 19.0 mm, a fineness modulus of 6.55, a shape index of 1.61, an abrasion loss (Los Angeles) of 42.2%, and a water absorption of 11.35%.

Figure 6: Samples from the second stage of the AGS production process. Samples designated AGS70, AGS80, and AGS90



With the aim of maintaining the consumption of bauxite residue and the production scale of the aggregates as outlined in the previous stage, but making some adjustments to the process primarily aimed at reducing the porosity of AGS90 and adapting the shape of the aggregates to a more lamellar and even cylindrical appearance (Figure 7), these adjustments led to changes in the specific mass of these aggregates and an increase in the sintering temperature of AGS90, as shown in Table 4.

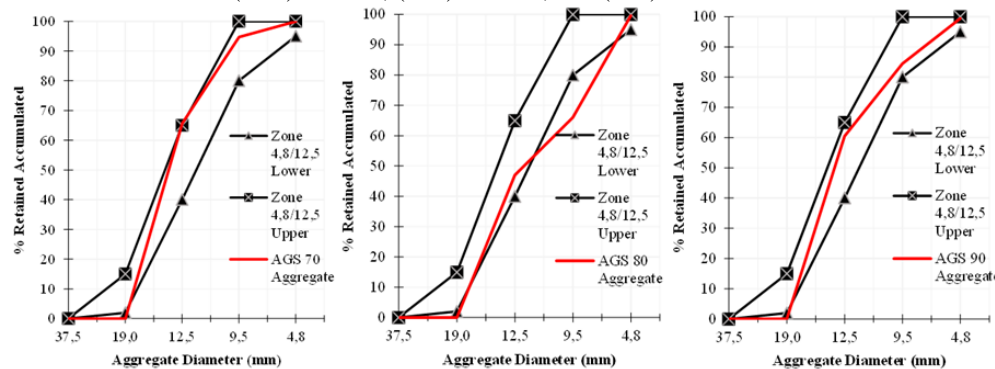
Table no 4: Composition, bulk density, temperature, and sintering time of the aggregate samples.

Sample	Bauxite Residue (%)	Sílica (%)	Clay (%)	specific gravity (g/cm ³)	Temperature (°C)	Time (h)
AGS-70	75 - 70	20 - 25	5	2,21	1200	3
AGS-80	85 - 80	10 - 15	5	2,26	1200	3
AGS-90	95 - 90	0 - 5	5	2,41	1250	3

At this stage of the research (current), as shown in Figure 9, AGS70 has a maximum diameter of 19.0 mm, a fineness modulus of 1.95, a shape index of 2.07, an abrasion loss (Los Angeles) of 41.06%, and a water absorption of 6.50%. AGS80 has a maximum diameter of 19.0 mm, a fineness modulus of 1.66, a shape index of 2.08, an abrasion loss (Los Angeles) of 43.94%, and a water absorption of 5.24%. AGS90 has a maximum diameter of 19.0 mm, a fineness modulus of 1.84, a shape index of 1.99, an abrasion loss (Los Angeles) of 27.41%, and a water absorption of 3.20%.

Table 5 summarizes the characterization tests performed, as per the standard (NBR 7211, 2022)¹⁷, conducted at the Civil Construction Materials Laboratory (LeMaC) and the Concrete Laboratory (LaCon) of the Civil Construction Laboratory at the Federal University of Pará. A total of 100 kg of each sample was used, as established by (NM 26, 2009)¹⁸. Aliquots of the samples were sieved dry to comply with the standard (NBR 7211, 2022)¹⁷, with sizes ranging from crushed 0 (4.75 mm to 12.5 mm) and 1 (9.50 mm, restricted to 19.0 mm).

Figure 7: Granulometric distribution of the samples from the second and third production cycles, respectively: (A/D) AGS70; (B/E) AGS80; and (C/F) AGS90.

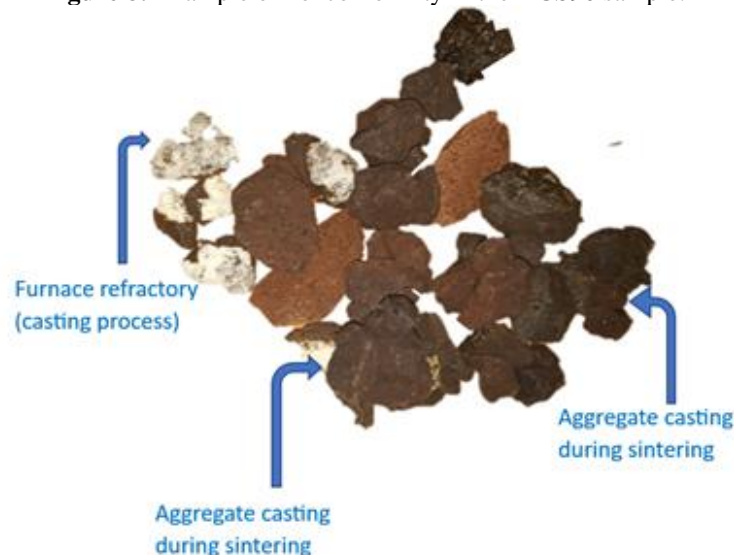


Regarding the particle sizes, these aggregates are classified as coarse aggregates according to (NBR 7211, 2022) [1]. According to (Souza, 2010)¹⁴, there is no ideal granulometry for a given aggregate, as the general goal is to achieve a balance between physical and economic requirements. A balanced granulometric distribution will result in more workable and economical concrete mixes, as well as a more compacted concrete mass, reducing the volume of voids and, consequently, the spaces through which potentially aggressive agents could penetrate the concrete. Among the other studies used as the basis for this work, only ^{19, 20} presented results regarding the granulometric distribution of bauxite residue. However, it is important to highlight that there is still a significant gap in information on this subject, as shown by the results obtained by²¹.

III. Result And Discussion

The synthetic coarse aggregates were produced and made available by the Chemical Engineering Laboratory to the Civil Engineering Laboratory at the Federal University of Pará. The produced aggregates were sent without any separation by diameter for better classification into granulometric ranges, and an estimated percentage of 1% of the total sent showed some production defects, as shown in Figure 9. After removing the aggregates with defects, it was decided to restrict the study in this research to aggregates with dimensions retained on the #4.8mm sieve and passing through the #19.0mm sieve.

Figure 8: Example of nonconformity in the AGS90 sample.



The granulometric distribution of the samples from the second and third production cycles after adjustments in the granulometric ranges of the synthetic coarse aggregates, according to the (NBR 7211, 2022) standard, is shown in Figure 8. The results obtained from the granulometric curves showed that in the third cycle (the current stage of the research), AGS70 and AGS90 were entirely within the #4.8-19.0mm granulometric range, while AGS80 did not have enough particles to fit into the granulometric range between the #6.3-9.5mm sieves. However, all three types studied exhibited well-distributed granulometric curves, making them suitable for use in the production of Portland cement concrete.

Figure 9: Average specific masses of the tested samples.

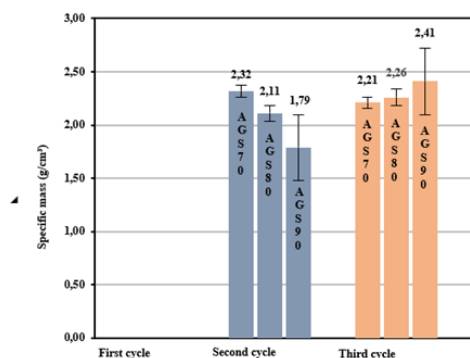
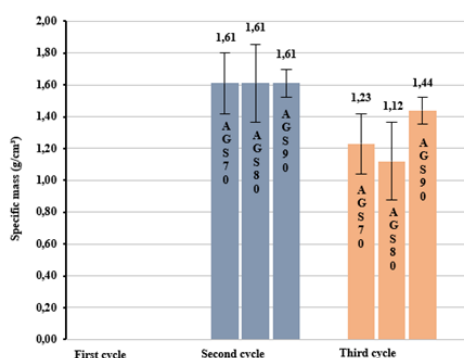


Figure 10: Average unit mass of the tested samples.



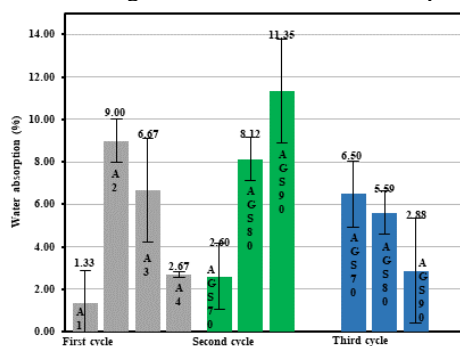
The specific mass of aggregates derived from rocks, commonly used in construction, ranges from 2.60 g/cm³ to 2.70 g/cm³, while the unit mass of normal aggregates ranges from 1.38 g/cm³ to 1.58 g/cm³. The research took these assumptions into consideration for evaluating the results. However, in the first production cycle, specific and unit masses were not evaluated²⁴. In the second cycle, information about the aggregate masses can be observed, but due to the unsatisfactory shape of the aggregates (Figure 6), it was necessary to produce a third cycle (the current shape). Figures 10 and 11 illustrate the results obtained in the third cycle, where the specific mass varied from 2.21 g/cm³ to 2.41 g/cm³, and the unit mass varied from 1.23 g/cm³ to 1.44 g/cm³.

To be classified as lightweight, aggregates must have an apparent specific mass (MEA) value lower than 2 g/cm³. European standards, on the other hand, state that lightweight aggregates, intended for use in concrete and mortar, must have a unit mass lower than 1.20 g/cm³ and a specific mass not exceeding 2.0 g/cm³²³. They further assert that lightweight aggregates are typically those with a unit mass lower than 1.2 g/cm³, with this low density directly related to their cellular or highly porous microstructure²⁴.

In this research, the aggregates from the second and third cycles, due to their specific masses being higher than 2.0 g/cm³, are classified as traditional aggregates.

It is important to emphasize that, as with most of the studies used as the foundation for this research, the sample production occurred at firing temperatures above 1200°C, and muffled furnaces were used for the production of AGS. Rotating furnaces would be the most suitable for ensuring proper and homogeneous temperature distribution, thus optimizing the production process while reducing energy expenditure.

Figure 11: Average results of the water absorption tests.



Some authors explain that the water absorption capacity of aggregates and the speed at which this phenomenon occurs depend on factors such as total porosity, pore connectivity, aggregate surface characteristics, and the moisture content of the aggregate before mixing²². Commercial aggregates typically exhibit water absorption, after 24 hours of immersion, of less than 20%²⁵. According to some authors, the morphology of the aggregate plays a significant role in controlling water absorption because when an aggregate has a more interconnected pore structure, it will absorb more water compared to a material with isolated pores and a vitreous surface²⁵. Another issue raised by these authors concerns the firing temperature, which plays a fundamental role in controlling the water absorption capacity. This is because the sintering of the mixture promotes particle densification, reducing the ingress of water into the aggregate matrix.

The high porosity index of the aggregate is directly related to its water absorption capacity. The higher the percentage of porosity in the material, the greater its water absorption capacity. Two adverse conditions are highlighted in relation to the high percentage of water absorption in aggregates in concrete. The first is negative, as excessively porous aggregates are directly detrimental to hardened concrete, causing issues such as shrinkage due to drying, increased specific mass, and reduced fire resistance¹⁹. The second is positive, bringing benefits such as improving the properties of the transition zone between the aggregate and the cement paste, reducing the wall effect, and enhancing internal curing.

Figure 12 shows the average results of the water absorption tests for the three production cycles through the improvement process, both in terms of sample conformation and the reduction of porosity. It is noted that the samples tested in the third cycle exhibited absorption rates between 2.88% and 6.50%. Therefore, at this stage, the aggregates already met the limits established by the (NBR 7211, 2022)¹⁷ standard. However, they still did not correspond to aggregates produced from rocks, which typically have water absorption between 1% and 2%. The water absorption properties of aggregates directly influence the conditions of the concrete in its fresh state, as well as the cement hydration process.

Figure 12: Average results of the amount of fine material passing through the 75 µm sieve by washing.

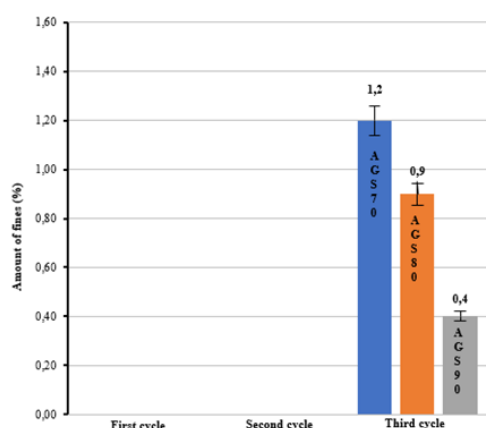
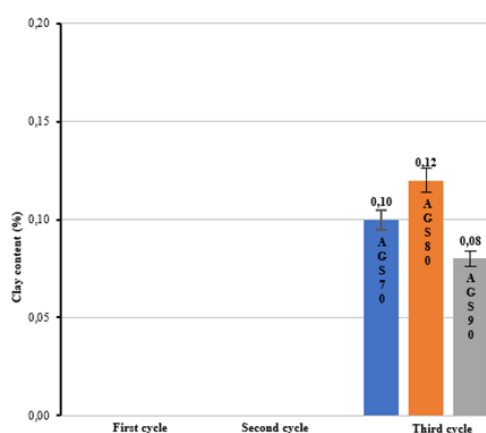


Figure 13: Average results of clay lumps and friable materials present in the samples.



Clay lumps and friable materials alter the granulometric characteristics of coarse aggregates and reduce the strength of both the aggregate itself and the concrete made with it²². Aggregates that have high levels of clay lumps and friable materials can cause modifications in the appearance of the concrete, potentially leading to stains on its surface. The percentage of clay lumps and friable materials in aggregates should not exceed 3.0%¹⁷. Only in the third production cycle were the percentage of fine material (Figure 14) and the presence of clay lumps and friable materials (Figure 15) evaluated. The analysis showed that all the tested samples passed, as the values obtained for fine material ranged from 0.4% to 1.20%, and for friable materials and clay lumps, they ranged from 0.08% to 0.12%.

Figure 14: Results of the shape index tests of coarse aggregates using the caliper method.

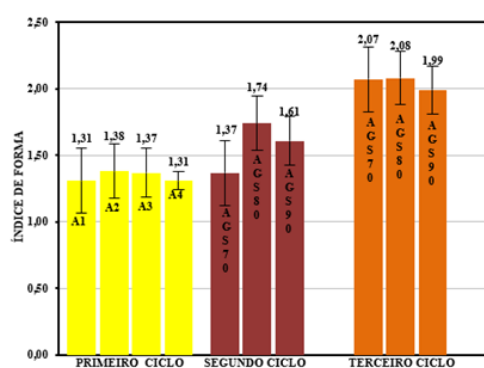
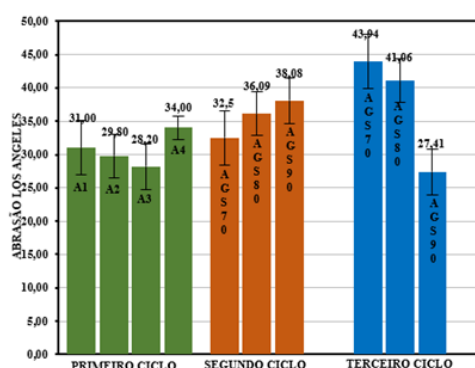
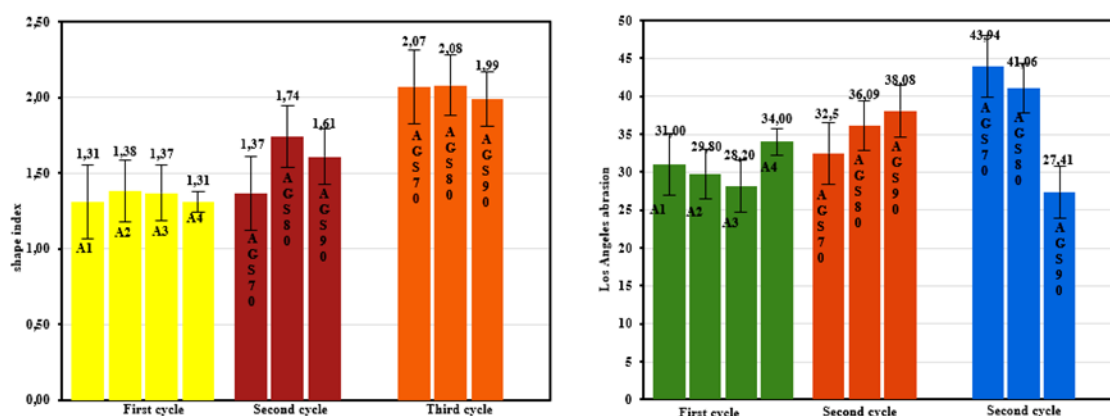


Figure 15: Average results of Los Angeles abrasion wear indices.





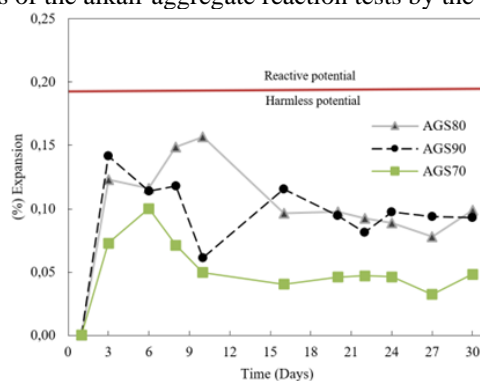
According to Borba and Santos (2019)²⁶, the shape index of coarse aggregate grains indicates how closely they resemble a cube. Such a shape ensures the interlocking of the coarse aggregate when compacted, thus increasing its shear strength. However, the NBR 7211, 2022¹⁷ states that the shape index of a coarse aggregate, determined in accordance with NBR 7809, 2016²⁷, must not exceed 3, allowing for aggregates with a lamellar shape. Figure 14 presents the average shape indices found for the tested samples. For the current stage of the research, the result to be considered is from the third cycle, where it is possible to observe that all samples remained below the regulatory limit, thus meeting the required standards.

Following the same criteria previously used to analyze the shape index, and observing the results obtained in the third production cycle regarding water absorption (Figure 11), it is important to note that highly porous aggregates are typically more fragile, making them unsuitable for structural concrete production. However, Figure 15 presents the average results of the Los Angeles abrasion index, conducted according to the NM 51, 2001²⁸ standard, where the analyzed samples showed abrasion resistance between 27% and 43.94%. These indices are considered satisfactory since the NBR 7211, 2022¹⁷ stipulates that the mass loss percentage should be less than 50%.

It is worth noting that the higher the water absorption of the aggregates, the greater the mass loss through the abrasion test. Furthermore, the results obtained in this research demonstrated that the coarse aggregates are suitable for use in the production of concrete for various purposes, as abrasivity is directly related to axial compression and durability. In this case, the samples tested showed superior performance compared to riverbed pebbles, which are commonly used aggregates in the North of the country, as these typically have higher abrasion loss values around 50%.

Durability tests were conducted to qualitatively assess the condition of the aggregates, through alkali-aggregate reaction tests, sulfate resistance tests, and X-ray diffraction, with the primary aim of ensuring that the third-cycle aggregates do not contain conditions that would limit their use in Portland cement production.

Figure 16: Results of the alkali-aggregate reaction tests by the accelerated method.



The tests were conducted according to the criteria established by (NBR15577-4, 2018)²⁹, and the chosen cement was type CP IV due to the high amount of pozzolana included in the composition. The graph in Figure 16 shows the behavior of the mortar expansion over a 30-day period, and the results qualitatively indicated that synthetic aggregates produced from bauxite residue at various levels, under the conditions stated in the third cycle, do not exhibit reactivity potential with the alkalis in the studied cement, meaning they are inert.

Figure 17: Durability evaluation tests of the AGS90 from the third production cycle. A) Initial dry sample retained on sieves #19.0mm and #12.5mm. B) Detail of the sample immersed in NaSO₄ solution (a,b), appearance after undergoing the fifth cycle (c), and C) final dry sample, fragmented and retained on sieves #19.0mm to #4.8mm.



Figure 18: Durability test results of the aggregate according to DNIT 446/2024-ME.

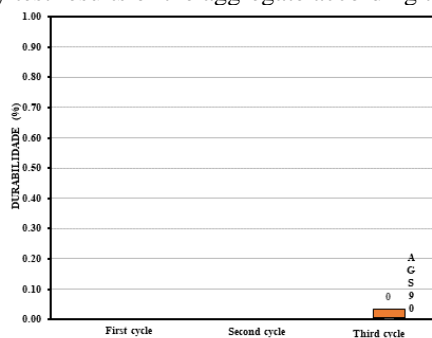
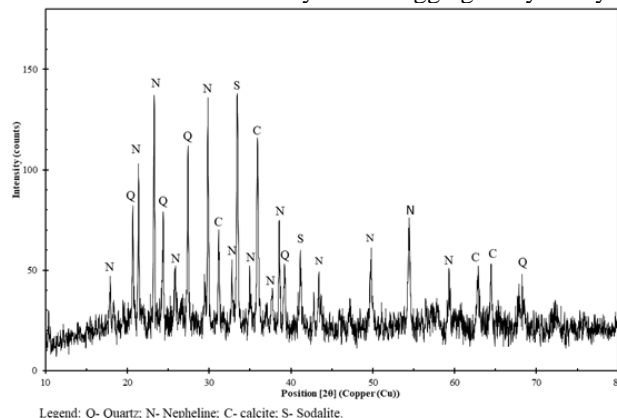


Figure 18 A summary of the washing stages of the aggregates using sodium sulfate and barium chloride solutions for the AGS90 from the third production cycle, following a process divided into five cycles as recommended by (DNIT 446/2024-ME)³⁰ to determine the resistance of the aggregates over time. The AGS90 was chosen to represent the third-cycle aggregates due to its higher percentage of residue in its composition.

The maximum permissible limits for the results of this durability test, according to (DNER 037/1997-ME)³¹, should not show a loss greater than 12%. The tested sample showed no disintegration when exposed to these sulfates, with a durability index for disintegration of 0.00%, as shown in Figure 19.

Additionally, an important analysis was performed using X-ray diffraction on the AGS90 from the third production cycle to identify the mineral phases in this sample. The result obtained is presented in Figure 20 and will be analyzed subsequently.

Figure 19: Mineral Identification of AGS90 Synthetic Aggregate by X-ray Diffraction (XRD).



Based on the X-ray diffraction (XRD) results, the main peaks identified are Nepheline (Na,K)AlSiO₄ or feldspar, Sodalite (Na₄Al₃(SiO₄)₃Cl), Calcite (CaCO₃), followed by peaks of Quartz (SiO₂), which indicate a stable condition for the produced sample. Additionally, through the lower intensity peaks, the presence of minerals such as iron and zeolite was also observed. This graphical configuration suggests that a significant amount of amorphous material is present, and its mineral phases represent an inert compound. This is a highly satisfactory condition for a synthetic coarse aggregate.

To validate the chemical characterization of the synthetic coarse aggregate, Table 6 presents the results obtained through X-ray fluorescence analysis for the main oxides.

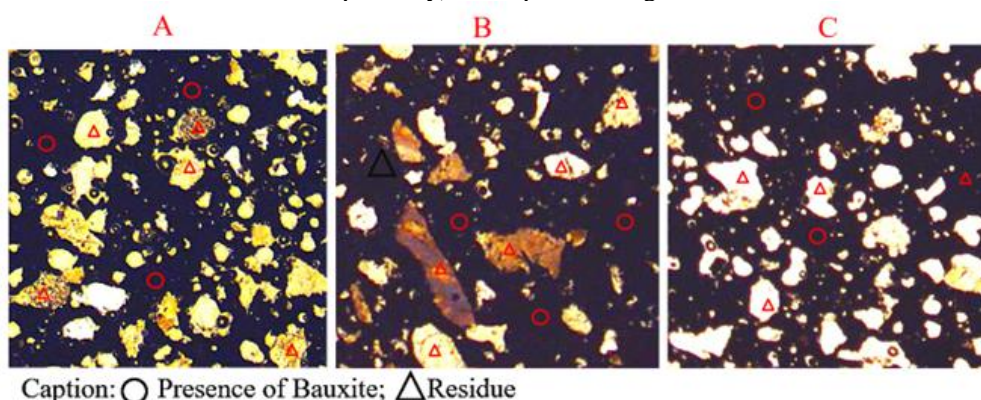
Table no 6: Test FRX

Compound	Concentration m/m (%)
SiO ₂	28,74
TiO ₂	5,42
Al ₂ O ₃	21,29
Fe ₂ O ₃	31,7
MnO	0,14
MgO	0,12
CaO	1,23
Na ₂ O	9,08
K ₂ O	0,14
P ₂ O ₅	0,11
SO ₃	0,28
LOI	0,99

Based on the results obtained from the X-Ray Fluorescence test, there was a predominance of silicon oxides (SiO₂) at 28.74%, followed by aluminum oxides (Al₂O₃) at 21.29%, sodium oxides (Na₂O) at 9.08%, and titanium oxides (TiO₂) at 9.08%. It is also important to highlight the presence of elements such as potassium oxide (K₂O), manganese oxide (MnO), and magnesium oxide (MgO), which could contribute to the product being considered expansive.

According to the XRD results, the main identified peaks are for Calcite (CaCO₃), followed by peaks for quartz (SiO₂), ensuring a stable condition for the produced sample. Furthermore, it is necessary to note that through peaks of lower intensities, the presence of the following minerals was also identified: iron and zeolite. Thus, this graphical configuration indicates the presence of a large amount of amorphous material, and its mineral phases are represented as an inert compound. This condition is very satisfactory for a synthetic coarse aggregate.

Figure 20: Images through optical microscope of the third production cycle samples (A/B/C - AGS 70/80/90 respectively) under polarized light.



In the images obtained through an optical microscope using polarized light, as shown in Figure 20, the distribution of the constituent materials of the synthetic coarse aggregates from the third production cycle is highlighted. The dark areas in the images represent the occupation of the residue, and the other particles are sections of silica sand and clay particles. It is also possible to observe in the images of frame C that the greater the use of bauxite residue, the lower the densification of silica in the sample, which presents a challenge, as silica directly contributes to the vitrification of the material, ensuring a reduction in porosity and an increase in mechanical strength and modulus of elasticity. However, as a compensating criterion, AGS90 was sintered at a temperature of 1250 °C, resulting in a 50 °C difference compared to AGS70 and AGS80 for increased vitrification of the material

IV. Conclusion

This study aimed to explore the production of synthetic coarse aggregates (AGS) using bauxite residue from the Hydro mining company in Barcarena-PA. The process was optimized in three stages, focusing on the geometric shape, specific mass, mechanical strength, and durability of the aggregates. In the final stage, aggregates were produced with residue percentages between 70% and 95%, at temperatures ranging from 1200°C to 1250°C.

Physical and mechanical tests confirmed that the aggregates from the second cycle met most normative parameters (NBR 7211, 2022), with the exception of AGS90's water absorption, which exceeded 10%, making it unsuitable for structural concrete. To improve these properties, a third cycle was conducted, resulting in improved geometric conformation and better performance, particularly in Los Angeles abrasion.

Durability tests, including sodium sulfate and barium chloride solutions and alkali-aggregate reaction (AAR) tests, confirmed that the bauxite residue does not present a reactive potential to cement alkalis, indicating its suitability for use in foundation concrete. The third-cycle aggregates fully met the relevant standards and showed the best results in abrasion, shape index, and water absorption.

In conclusion, this research demonstrates the environmental benefits of using in natura bauxite residue for producing synthetic coarse aggregates, reducing reliance on natural resources like river pebbles and mitigating the environmental impacts of extraction, transport, and CO₂ emissions.

Acknowledgments

The authors would like to thank HYDRO, the Brazilian funding agency CAPES, and PPGEc for the master's and doctoral scholarships, which were essential for the completion of this study. Additionally, we express our gratitude to LEC and LEQ (Civil Engineering and Chemistry Laboratories of the Federal University of Pará), the CPRM analysis laboratory, and UNIFESP for allowing some of the analyses conducted in this research.

References

- [1]. Oliveira, Drcde, Rossi, CRC. Concretes With Red Mud Coarse Aggregates. *Materials Research*, V. 15, N. 3, P. 333–340, Maio 2012.
- [2]. Albuquerque, NG. Estudo Das Propriedades Mecânicas De Concretos Dosados Com Agregados Produzidos A Partir De Lama Vermelha. Trabalho De Conclusão De Curso (Graduação). UFPA - Departamento De Engenharia Civil, 2007.
- [3]. ALCOA (2024). <https://www.alcoa.com/brasil/pt>.
- [4]. Araújo, ER, Olivieri, RD & Fernandes, FRC. Atividade Mineradora Gera Riqueza E Impactos Negativos Nas Comunidades E No Meio Ambiente. 2014.
- [5]. Bertocchi, AF, Ghiani, M., Peretti, R. & Zucca, A., (2006). Red Mud And Fly Ash For Remediation Of Mine Sites Contaminated With As, Cd, Cu, Pb And Zn. *Journal Of Hazardous Materials*. 134, 112-119, 2006
- [6]. Associação Brasileira De Normas Técnicas, NBR 10004-1 (2024). Resíduos Sólidos – Classificação.
- [7]. Ribeiro, DV & Morelli, MR. Estudo Da Viabilidade Da Utilização Do Resíduo De Bauxita Como Adição Ao Cimento Portland. In: Congresso Brasileiro De Engenharia E Ciência Dos Materiais, Pernambuco, 2008.
- [8]. Venâncio, L. C. A., (2013). Desenvolvimento De Unidade Piloto De Transferência De Massa Gás/Líquido: Redução Da Reatividade Do Resíduo Da Indústria De Alumina Através De Reação Com Gases De Combustão. (Tese De Doutorado). Universidade Federal Do Pará, Belém, PA, Brasil.
- [9]. Rosário, KA. Concreto Com Utilização De Agregado Graúdo Sintético Produzido A Partir Da Lama Vermelha: Estudos De Dosagem, Propriedades E Microestrutura. (Dissertação De Mestrado). Universidade Federal Do Pará, Belém, PA, Brasil, 2013.
- [10]. Tsakiridis, PE, Agatzini-Leonardou, S., Oustadakis, P. Red Mud Addition In The Raw Meal For The Production Of Portland Cement Clinker. *Journal Of Hazardous Materials*. 103-110, 2004.
- [11]. Guo, T., Yang, H., Liu, Q., Hannian, G., Wang, N., Yu, W., & Dai, Y. (2018). Adsorptive Removal Of Phosphate From Aqueous Solutions Using Different Types Of Red Mud. *Water Sci. Technol.* 2017, 570-577, 2018.
- [12]. Santos, DH. Influência Da Sílica E Temperatura Nas Propriedades Físicas Dos Agregados Sintéticos Produzidos Com Resíduo Do Processo Bayer. (Tese De Doutorado). Universidade Federal Do Pará, Belém, PA, Brasil, 2019.
- [13]. Cunha, MVPO & Corrêa, JAM. Síntese E Caracterização De Hidróxidos Duplos A Partir Da Lama Vermelha (Synthesis And Characterization Of Layered Double Hydroxides From Red Mud). *Revista Cerâmica*, 57, 85- 93, 2011.
- [14]. 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 De Doutorado). Universidade Federal Do Pará, Belém, PA, Brasil, 2010.
- [15]. Mörtel, H., Heimstadt, K. Mikrobielle Werkstoffzerstörung - Simulation, Schadensfälle Und Gegenmaßnahmen Für Anorganische Nichtmetallische Werkstoffe: Keramik. *Materials And Corrosion*, 45(2), Pp. 128-136, 1994.
- [16]. Viegas, B. M., Et Al. A Influência Da Temperatura Nas Transformações De Fases Dos Minerais Presentes Na Lama Vermelha: Redução Da Hematita À Magnetita. *Matéria (Rio De Janeiro)*, V. 25, 2020.
- [17]. Associação Brasileira De Normas Técnicas, NBR 7211 (2022). Agregados Para Concreto – Requisitos.
- [18]. Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR NM 26 (2009): Agregados: Amostragem.
- [19]. Rossignolo, J. A., (2009). Concreto Leve Estrutural: Produção, Propriedades, Microestrutura E Aplicações. Pini.
- [20]. Reis, A. W. (2014). Caracterização Mineralógica Do Agregado Obtido A Partir Da Lama Vermelha Do Processo Bayer. (Dissertação De Mestrado). Universidade Federal Do Pará, Belém, PA, Brasil.
- [21]. 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.
- [22]. Mehta PK, Monteiro PJM. Concreto: Microestruturas, Propriedades E Materiais. 2. Ed. São Paulo: Nicole Pagan Hasparyk; 2014.
- [23]. Associação Brasileira De Normas Técnicas, NBR 12655 (2022). Concreto De Cimento Portland – Preparo, Controle, Recebimento E Aceitação – Procedimento.

- [24]. Santos, D. H., Dalmeida, A. P., Figueiredo, W. B., Valente, A. L., & Souza, J. A. S., (2014). 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.
- [25]. Tuan, B. L. A., Hwang, C. L., Lin, K. L., Chen, Y. Y., & Young, M. P., (2013). Development Of Lightweight Aggregate From Sewage Sludge And Waste Glass Powder For Concrete. *Construction And Building Materials*, 47, 334-339.
- [26]. Borba VQ, Santos AA. Projeto De Base Drenante Realizado De Acordo Com A Especificação Técnica DER/SP ET-DEP00/008 [Trabalho De Conclusão De Curso]. Criciúma: Universidade Do Extremo Sul Catarinense; 2013.
- [27]. Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 7809 (2019). Agregados Graúdo. Determinação Do Índice De Forma Pelo Método Do Paquímetro: Método De Ensaio.
- [28]. Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR NM 51 (2006). Agregado Graúdo: Ensaio De Abrasão “Los Angeles”.
- [29]. Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 15577-4 (2018). Agregados: Ensaio De Reação Álcali- Agregado.
- [30]. Departamento Nacional De Infraestrutura Terrestre. DNIT 446/2024-ME: Agregado - Avaliação Da Durabilidade Pelo Emprego De Soluções De Sulfato De Sódio Ou Magnésio - Método De Ensaio.
- [31]. Departamento Nacional De Estradas E Rodagem. DNER 037/1997-ME: Agregado Graúdo Para Concreto De Cimento.



IOSR Journals

International Organization
of Scientific Research

Australia | Qatar | India | New York | Malaysia

Certificate

Office Code :	M1867	Date :	2025-03-26
MIC No. :	2854	Status :	Published

Article Details

This is to certify that following paper has been published in IOSR Journals.

Article Title	:	Evaluation of the total replacement of natural coarse aggregate with mining waste coarse aggregate in the production of Portland cement structural concrete physical and mechanical properties
Author's Name	:	Robson da Silva Fernandes, Joao Carlos Lisboa de Lima, Sabino Alves de Aguiar Neto, Carlos Alberto Bendelack Nicolau Junior, Francisco Matheus de Oliveira Brito, Anderson Cleiton Batista da Silva, Paulo Sergio Mota dos Santos Junior, Cristiane Araujo dos Santos Silva, Alessandro Resende Machado, Adonay Saraty de Carvalho, Kleber Roberto Matos da Silva, Vinicius do Carmo Reis, Aedjota Matos de Jesus, Lucineide Nazare Barata Pinheiro, Marcelo de Souza Picanco, Alcebiades Negrao Macedo
Journal Name	:	IOSR Journal of Business and Management
ISSN	:	2278-487X
Publisher Name	:	International Organization of Scientific Research
Journal Url	:	www.iosrjournals.org
Publishing Model	:	Open Access Publishing
Review Type	:	Blind Peer Review Process
Journal Type	:	Indexed Refereed Journal
Volume No.	:	27
Issue No.	:	03
Article DOI	:	10.9790/487X-2703105366



Signature
Editorial Manager
IOSR Journals
support@iosrmail.org

Evaluation of the total replacement of natural coarse aggregate with mining waste coarse aggregate in the production of Portland cement structural concrete: physical and mechanical properties

Robson da Silva Fernandes¹, João Carlos Lisboa de Lima¹, Sabino Alves de Aguiar Neto², Carlos Alberto Bendelack Nicolau Junior³, Francisco Matheus de Oliveira Brito³, Anderson Cleiton Batista da Silva⁶, Paulo Sérgio Mota dos Santos Junior¹, Cristiane Araújo dos Santos Silva¹, Alessandro Resende Machado⁵, Adonay Saráty de Carvalho¹, Kleber Roberto Matos da Silva³, Vinicius do Carmo Reis¹, Aedjota Matos de Jesus⁴, Lucineide Nazaré Barata Pinheiro¹, Marcelo de Souza Picanço¹, Alcebíades Negrão Macedo¹

¹(Institute of Technology, Faculty of Civil Engineering / Federal University of Pará, Brazil)

²(Civil Engineering / State University of Pará)

³(Civil Engineering / Federal Institute of Education, Science, and Technology of Pará, Brazil)

⁴(Civil Engineering / Technology Center, Federal University of Rondônia, Brazil)

⁵(Sanitary and Environmental Engineering/ Federal University of Bahia, Brazil)

Abstract:

Background: Following the concern of proposing solutions to minimize the environmental impacts caused by the mining industry in the state of Pará, in partnership with the company HYDRO S.A., this research was guided by the study of Fernandes, which analyzed the production stages of different types of coarse aggregates derived from bauxite, clay, and silica waste. The study utilized the coarse aggregate produced in the third production cycle, which had the highest percentage of waste in its composition, designated as AGS90.

Materials and Methods: This work presents an evaluation of the characterization results of the synthetic coarse aggregate (AGS) with normal specific mass compared to the natural coarse aggregate (AGN), considering their physical, chemical, and mechanical properties. Furthermore, a correlation is established between these factors and their influence on the mechanical strength and modulus of elasticity of Portland cement concrete with a normal strength class.

Results: Through the characterization of AGS, a disadvantage was identified, as it is still a type of aggregate with higher porosity in its structure and, consequently, greater water absorption compared to AGN. This condition negatively affected the mechanical properties of the concrete with synthetic aggregate (CAGS) up to 28 days of age. However, from the tests conducted at 91 and 277 days, an intrinsic consolidation of the composite occurred, and the results for axial compressive strength, indirect tensile strength, flexural tensile strength, and modulus of elasticity became equivalent to those of concrete with natural coarse aggregate (CAGN).

Conclusion: The study confirmed the technical feasibility of fully replacing natural aggregate (AGN) with synthetic aggregate (AGS) derived from bauxite waste in structural concrete of class C30. Despite the higher porosity and water absorption of AGS, the mechanical properties of the composite (CAGS) equaled those of conventional concrete (CAGN) from 91 days onward, meeting technical standards. Microstructural analysis confirmed adequate adhesion at the matrix-aggregate interface without deleterious reactions, while adjustments in binder water highlighted the need for dosage optimization. Aligning with COP30 goals, the use of AGS demonstrates sustainable potential to reduce the extraction of natural resources and repurpose mining waste. However, long-term durability studies and methods to minimize the porosity of synthetic aggregate are essential for practical applications in regions such as the Amazon.

Key Word: Synthetic coarse aggregate; Bauxite waste; Concrete; Testing; Microstructure; Aggregate modulus.

Date of Submission: 14-03-2025

Date of Acceptance: 27-03-2025

I. Introduction

The 30th United Nations Climate Change Conference (COP 30)¹, to be held in 2025 in the Brazilian Amazon Region, specifically in Belém, Pará, Brazil, is a major event dedicated to addressing global climate issues. This event has sparked initiatives within the scientific community that promote the reduction of the ecological footprint and the development of sustainable technologies. Specifically, one of these initiatives involves the replacement of natural coarse aggregates with aggregates derived from mining waste, aligning directly with this event. This study focuses on evaluating the feasibility of using a coarse aggregate produced from bauxite residue in the production of structural concrete, which is widely used in civil construction projects in the Brazilian Amazon region.

The synthetic coarse aggregate (SCA) from bauxite residue is a byproduct of bauxite ore production, which reached approximately 2.8 billion tons worldwide in 2022, with the state of Pará contributing 45% of Brazil's national production. This synthetic coarse aggregate was used as a replacement for traditional coarse aggregate, which is typically represented by crushed stone.

The extraction of natural resources leads to raw material shortages, driving the search for alternative materials, cleaner sustainability solutions, and waste recycling techniques². Therefore, it is essential to seek viable and economical alternative solutions in the construction industry to mitigate the limitations of natural resources and reuse waste materials that are harmful to the environment³.

Neville⁴ highlighted that $\frac{3}{4}$ of the concrete volume is occupied by aggregates, making the quality of these materials crucial. The properties of aggregates directly affect the durability and structural performance of concrete, as well as limit the maximum strength that can be achieved in a mix. This occurs because rock fractures before visible cracks appear in the cement paste⁵.

Since the synthetic coarse aggregate can be used primarily in large-scale civil construction concrete applications, this material presents a sustainable solution for managing bauxite residue, which is currently stored in containment ponds and retention systems. By recycling large amounts of this waste into coarse aggregate production, this approach reduces environmental impacts by minimizing the extraction of natural aggregate materials⁶.

Currently, the Federal University of Pará (UFPA) conducts several studies in collaboration with Hydro/Alunorte to explore the application of synthetic aggregate (AGS) in construction. These studies aim to optimize the physical-mechanical and chemical properties of the material to establish it as a viable alternative to conventional aggregates, offering cost-effectiveness and environmental sustainability⁷.

This research, based on the study by Fernandes et al.⁸, selected the synthetic coarse aggregate with the highest percentage of bauxite residue in its composition, referred to as AGS90, from the third production cycle, for use in structural concrete with normal strength classification.

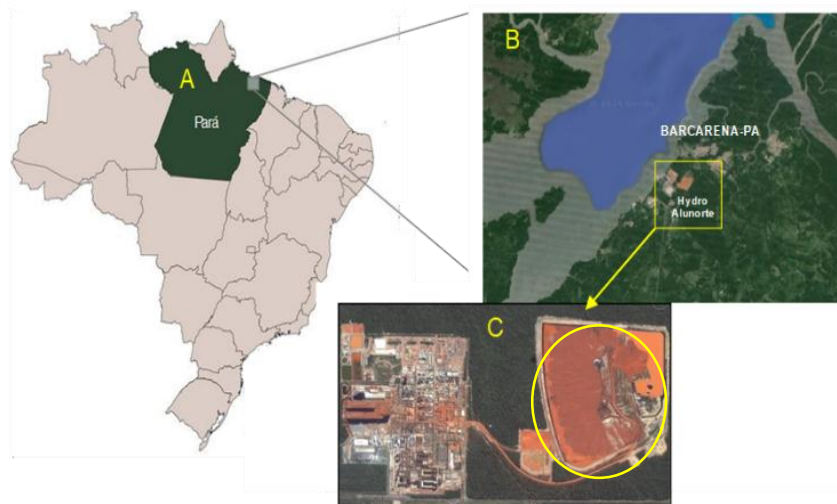
This study presents an evaluation of the characterization results of the synthetic coarse aggregate (AGS) with normal specific mass, compared to natural coarse aggregate (NCA), in terms of their physical, chemical, and mechanical properties. The influence of these aggregates on mechanical strength and elastic modulus in Portland cement concrete of normal strength classification is analyzed. Specifically, the research also provides comparative results between synthetic coarse aggregate concrete from bauxite residue (CAGS) and natural coarse aggregate concrete (CAGN).

The study evaluates these concretes in both their fresh state (analyzing workability, bulk density, and cement consumption) and their hardened state (examining water absorption, porosity, specific mass, static elastic modulus, fracture behavior, compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength, and matrix-aggregate interface through scanning electron microscopy (SEM)).

II. Material And Methods

Bauxite residue (BR), formerly known as red mud, originates from the bauxite beneficiation process, known as the Bayer process⁸. These BR deposits are classified as solid waste deposits (SWD), and the Hydro Alunorte refinery, located in the state of Pará, has storage facilities with a capacity of 92.2 Mm³ (million cubic meters) (Figure 1).

Figure 1: Location of the bauxite residue study area. A and B) Factory site (Google Maps, 2025) C) Residue storage area managed by HYDRO-ALUNORTE in Barcarena – PA⁶. Adapted. Authors, 2025.

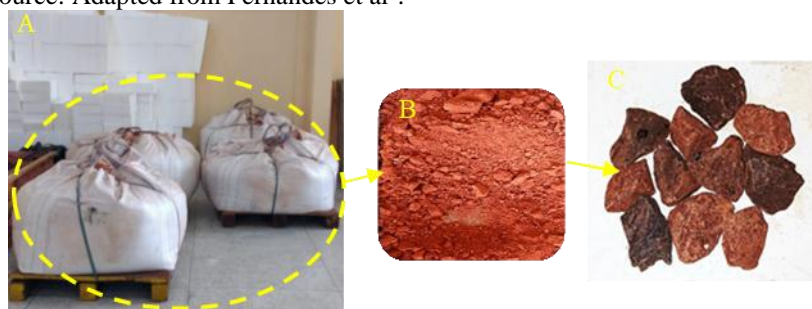


Materials

Bauxite Residue

Fernandes et al.⁸ emphasize that the production of synthetic coarse aggregate was achieved through the use of raw materials: kaolinite clay, silica, and bauxite residue (BR) supplied by the company HYDRO-ALUNORTE in Barcarena-PA and stored at the Civil Engineering Laboratory of UFPA, as shown in Figure 2.

Figure 2: Storage of bauxite residue in the Civil Engineering Laboratory of UFPA. A) Arrangement of the material as it was transported and subsequently stored, B) Appearance of the raw residue, and C) Sample of the produced SCA. Source: Adapted from Fernandes et al.⁸.



Aggregates

The fine aggregate is natural sand from a quartz riverbed in the Amazon region, near the municipality of Ourém, in the state of Pará. Only physical characterization tests were conducted on this material, yielding results of a specific gravity of 2.62 g/cm³, a unit weight of 1.61 g/cm³, and a water absorption of 1.5%. Through the granulometric analysis, a fineness modulus of 2.4 and a maximum particle size of 1.18 mm were obtained, classifying it as medium sand.

The natural coarse aggregate used was river gravel (NCA) sourced from riverbeds in the city of Ourém, PA, and purchased from a construction materials store in the Metropolitan Region of Belém, PA. Physical characterization tests were also conducted on this material, resulting in a specific gravity of 2.6 g/cm³, a unit weight of 1.61 g/cm³, a water absorption of 1.97%, a shape index of 2.01, and a fineness modulus of 2.3. The maximum particle size was 19.0 mm, classifying it as medium gravel or No. 1 gravel.

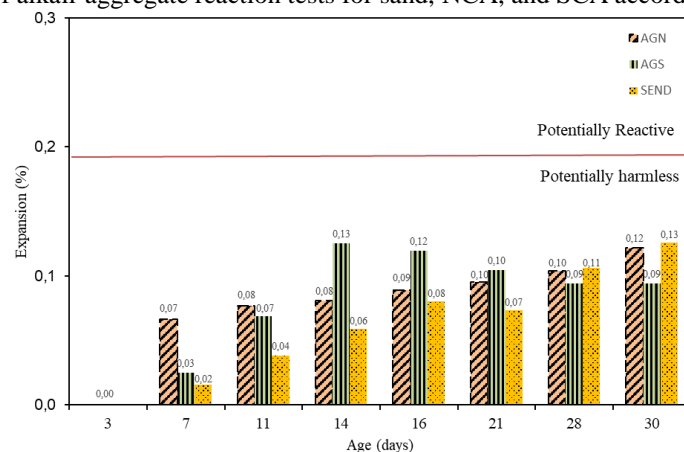
However, another coarse aggregate used in this research was a synthetic type produced at a temperature of 1250°C, referred to as third-cycle SCA, with a higher percentage of bauxite residue in its composition. It was supplied by the company HYDRO ALUNORTE and produced in the chemical engineering laboratory of the Federal University of Pará, as described by Fernandes et al.⁸. Physical characterization tests were also performed on this type of aggregate, yielding results of a maximum diameter of 19.0 mm, a fineness modulus of 1.84, a shape index of 1.99, and a water absorption of 3.20%.

Specifically, only the coarse aggregates underwent mechanical characterization through the Los Angeles abrasion test. The results were 52% for NCA and 27.41% for SCA, demonstrating that only the

synthetic aggregate is suitable for use in structural concrete mix design, in accordance with NBR 7211⁹:2022³. In contrast, the natural aggregate is considered friable and is not recommended for use in structural concrete.

Considering the importance of investigating aggregate durability and verifying whether they are inert when in contact with cement alkalis, alkali-aggregate reaction tests were conducted on the fine aggregate (sand) and the coarse aggregates, both natural (gravel) and synthetic (SCA), as shown in Figure 3.

Figure 3: Results of alkali-aggregate reaction tests for sand, NCA, and SCA according to NBR 15577-4.



Since SCA is produced from a mining residue (bauxite) in a laboratory-controlled process and has not yet been used in direct exposure conditions to sulfate, Fernandes et al⁸, conducted a durability evaluation test using sodium sulfate solutions (DNIT 446/2024-ME)¹⁰ for this aggregate. The results showed only minor disintegration of the aggregate, with a mass loss of less than 0.1%, thus meeting the maximum allowable limits for this durability test, in accordance with DNER 037/1997-ME¹¹.

Portland Cement

The cement used throughout the research is the Brazilian Portland CP II F32 type, consisting of 75-89% by mass of clinker and calcium sulfate, and 11-25% carbonate material, according to NBR 16697:2018¹². It has a specific gravity of 2.85 g/cm³. This type of cement was chosen for the study due to its common use in construction projects in the Amazon region.

Production of Specimens from AGS

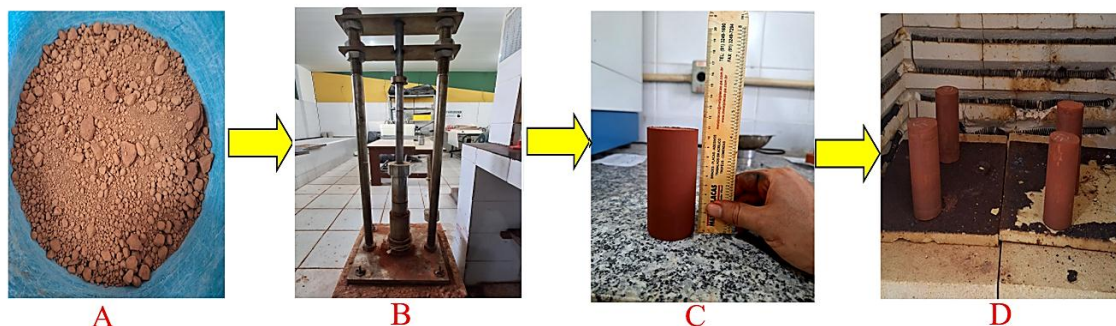
Uniquely, specimens were produced using the same materials and the same proportional mixture percentages required for the production of AGS90.

The methodology applied for the preparation of the specimens was based on the recommendations of NBR 7182¹³. A total of nine specimens were produced, with three units designated for each of the following tests: specific mass, absorption, and void index determination, in accordance with NBR 13278¹⁴ Figure 5 illustrates the axial compression tests performed according to NBR 5739:2018¹⁵, the static deformation modulus test following NBR 10341¹⁶ and the dynamic deformation modulus test, as recommended by NBR 8802:2019¹⁷. All specimens were stored in a controlled environment.

The specimen preparation process involved filling three metallic cylinders, each with a height of 10 cm and a diameter of 5 cm. The material was homogenized for 10 minutes, following the guidelines of NBR 7182:2025¹³. Three layers of material were placed in the molds, and each layer was compacted using a manual tamper, applying 26 blows at distinct points.

Afterwards, the samples underwent a sintering process in furnaces for three hours at a temperature of 1250°C. Once sintered, the samples were cooled and demolded. Figure 4 shows the specimen production process.

Figure 4: Simplified process of producing AGS specimens. A) Raw bauxite residue. B) Specimen molding. C) Molded specimen before sintering. D) Molded specimen after sintering.

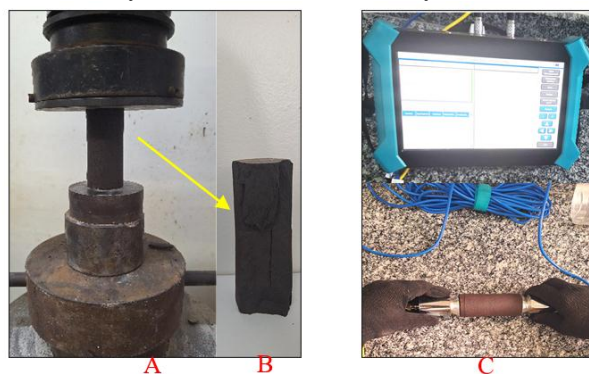


The mixing process is demonstrated in the work of Fernandes et al⁸ for the production of synthetic coarse aggregate. However, it is important to emphasize that the processes are similar only in the mixing stage. For the production of the specimens, the methodology described in NBR 7182¹³ was followed.

Figure 4 a shows well-formed specimens with dimensions of 50 mm in diameter and 100 mm in length, before being placed in the muffle furnace for sintering at a temperature of 1250°C. After three hours at this temperature, the samples underwent a natural cooling process in a laboratory environment. It is observed in Figure C that after sintering, the samples experienced slight deformations and volume reduction. This situation was expected; however, since this is a pilot study, the extent of deformation was unknown. Therefore, this production stage will be better evaluated in future research.

After the AGS specimen production was completed, the mechanical properties were evaluated through the axial compression test¹³ and the dynamic modulus of elasticity test (ASTM C597-16¹⁷), using the ultrasonic pulse velocity test¹⁸ (Figure 4.C). Figures 5.A and 4.B show the AGS specimen during the compression test and the fracture after failure.

Figure 4: Mechanical Strength Tests of AGS Specimens. A) Axial compression test. B) Fractured specimen. C) Dynamic modulus of elasticity test.



Mix Proportioning and Preparation of Unit Mix Designs

NBR 6118:2023¹⁸ establishes that concrete structures must be designed and constructed so that, under the expected environmental conditions at the time of design and during use, they ensure safety, stability, and serviceability throughout their intended service life.

This research was based on the recommendations of NBR 12655²⁰ for concrete production, adopting Aggressiveness Class II, concrete classification according to NBR 8953²¹ ($CA \geq C30$), and ensuring a Portland cement consumption per cubic meter of concrete of at least 280 kg/m³. Thus, a concrete mix with a characteristic compressive strength of 30 MPa at 28 days was obtained, based on the mix design diagram using the IBRACON method.

It is important to emphasize that no additives were used in the AGS concrete mix to better assess the influence of the porosity of this type of aggregate, given that it has an absorption rate greater than 2%. The concrete production took place in a controlled laboratory environment at the Civil Engineering Department of UFPA, aiming to minimize standard deviation (Sd) variations as much as possible.

Table 1: Compressive Strength Results for Mix Design Curve Development.

Strength (Mix - MPa)		Average Fckj (28 days)	Standard Deviation (Sd)
CAGN	Rich	34,91	0,01
	Normal	29,97	0,03
	Lean	20,34	0,05
CAGS	Rich	29,41	2,23
	Normal	20,10	3,98
	Lean	12,79	0,28

The experimental mix designs obtained from the dosage curves required adjustments to the water/cement ratio during dosing through the slump test²² to maintain consistency within the designated class. The concretes CAGN and CAGS were evaluated in their hardened state through mechanical tests, including simple axial compression at the ages of 7, 28, 91, and 277 days on cylindrical specimens (100x200 mm), split tensile strength, and flexural strength at 28 days on cylindrical specimens (100x200 mm) and prismatic specimens (150x150x500 mm). The static modulus of elasticity was assessed at 28 and 91 days on cylindrical specimens (100x200 mm), with three replicas per test. Additionally, the concretes were analyzed through water absorption and void index tests to establish correlations with mechanical strength.

Table 2 summarizes the properties of the cementitious composites produced with AGN, referred to as CAGN, and those produced with AGS, referred to as CAGS. Due to the requirement that the experimental concrete mixes maintain the same consistency range determined by the dosage curves, the mixing water used for CAGN was lower than initially planned, whereas CAGS required a higher water content. These adjustments directly influenced the final binder water ratio of the composites and their respective mechanical properties.

Table 2: Mix design for the composites studied.

Composite/ aggregate type	Mortar content (%)	Unit mixture	Water/cement binder (initial)	Water/cement binder (final)	Slump test (mm)	Cement (kg/m ³)	Moisture content (%)	Fresh concrete μ (Kg/m ³)
CAGN	55	1:2,03:2,48	0.55	0.52	90	380	9,40	2380,96
CAGS	55	1:1,42:1,98	0.51	0,61	52	370	13,84	2336,39

The concrete slump was set between 50 mm and 100 mm, in accordance with resistance class S-50²³. The axial compressive strength in this study was defined as 30 MPa, as it corresponds to class C30²⁴, a type of concrete commonly used in vertical construction projects. The concrete mixing process was conducted at the Civil Engineering Laboratory of the Federal University of Pará in Belém, Pará, Brazil.

III. Result and Discussion

Influence of the Mechanical Properties of Coarse Aggregates on the Axial Compressive Strength and Modulus of Elasticity of Concretes

As previously demonstrated, specimens of AGS were produced for physical tests, including water absorption, porosity, apparent specific gravity, and mechanical strength and modulus of elasticity tests. Table 3 presents a summary of the results of the physical and mechanical tests, while Figures 10 and 11 show a comparison between the axial compressive strengths and moduli of the coarse aggregates with the composites.

Table 3: Results of the Characterization Tests and Mechanical Strengths of AGS Specimens.

Aggregate type	Dimensão DxL (mm)	Absorção (%)	Void Index	Specific Gravity (g/cm ³)	f_c (MPa)	E_d (GPa)
CAGS	47 x 97	1,89	3,65	1,93	55,79	18,68

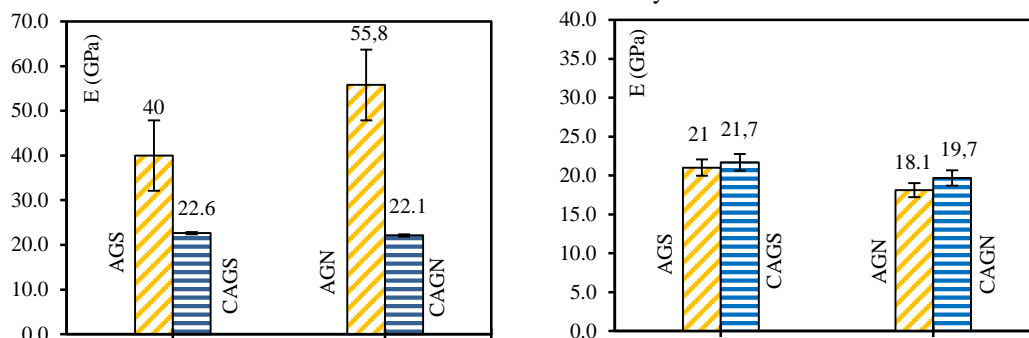
Figure 5: Mechanical Strength of Coarse Aggregates and Composites at 28 Days. A) Axial Compression. B) Modulus of Elasticity.

Figure 5A presents a comparative graph of the axial compressive strength of natural and synthetic coarse aggregates against the strengths of the composites. It is worth noting that only the synthetic aggregate was tested through mechanical testing, while the strength of the rolled gravel was estimated based on the literature. According to Neville⁶ aggregates exhibit significantly higher strengths than the cement paste itself and also report that when an aggregate has good quality, its increased proportion in the mix design enhances the strength of the concrete. This assertion aligns with the results obtained, as despite the natural coarse aggregate having a higher strength than the synthetic one, the strengths of the concretes were similar. Thus, it is understood that the failure occurred significantly in the paste.

Figure 5B shows comparative results between the modulus of elasticity of coarse aggregates and the strengths of the composites. It should also be emphasized that only the synthetic aggregate was tested through mechanical testing. For the rolled gravel, the study by Mehta²³ was followed, in which tests conducted with samples of sandstones, limestones, and porous gravels indicated moduli ranging from 21 to 49 GPa. The modulus of elasticity of gravel, being generally composed of minerals such as quartz and feldspar, can be around 40-70 GPa. For this research, a value of 30 GPa was adopted for the modulus of the rolled gravel used in the study, corresponding to the value found in the dynamic modulus of elasticity test of the synthetic coarse aggregate, which was 29.59 GPa. This correlation is based on the results obtained from the static modulus of elasticity tests of the studied concretes, which were 18.63 GPa and 19.69 GPa for CAGN and CAGS, respectively.

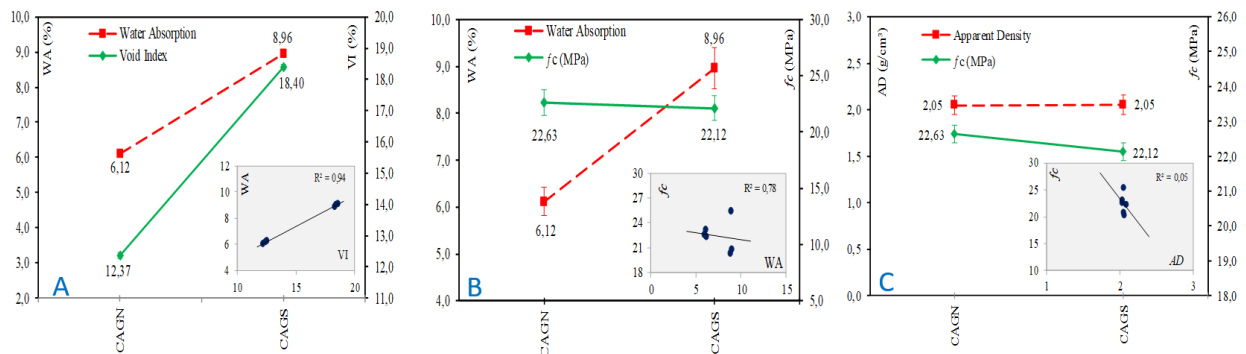
Although the synthetic coarse aggregate has a higher porosity than the natural coarse aggregate, which is a significant characteristic that determines its stiffness and directly affects the modulus of elasticity of the concrete, no impairment in the stiffness of the concrete was observed, resulting in no significant difference between the moduli of elasticity of the studied concretes.

Influence of the Physical Properties of Concrete on the Axial Compressive Strength of Concretes

Figure 6A shows the graph of the relationship between water absorption and void index in the concretes of this study. In this context, when observing only the spectrum of concrete porosity, CAGN performs better than CAGS and will yield better results concerning the physical durability properties of the concrete.

It is important to note that CAGS is more porous due to the increased water in the unit mix for correcting the binder water adjusted in the slump test. Additionally, this condition is attributed to the porosity of AGS. According to Rossignolo²⁴, a high percentage of water absorption in the aggregate can cause damage to the concrete in its hardened state, such as drying shrinkage, increased specific gravity, and reduced fire resistance. However, there are also some benefits derived from a high water absorption capacity of the aggregate, such as improving the properties of the transition zone between the aggregate and the cement paste, thereby reducing the "wall effect." Moreover, the water absorbed by the aggregate benefits the internal curing of the concrete.

Figure 6: Physical Properties of the Studied Concretes. A) Void Index vs. Absorption. B) Apparent Density vs. Compressive Strength. C) Absorption vs. Compressive Strength.



Panel A shows the directly proportional relationship between water absorption and the porosity of the composites CAGS and CAGN. The other results obtained from graphs B and C relate the apparent specific gravities and porosities found in these composites to the compressive strengths at 28 days.

It is established that the relationship between specific gravity and porosity is inversely proportional and that factors such as the porosity of coarse aggregates can affect the rheological and mechanical properties and the modulus of elasticity of concrete. Thus, it can be observed from the graph that the water absorption of CAGS is 46% higher than that of CAGN. This condition did not create a difference in the results found for the apparent specific gravity of the composites, as shown in the panel. However, when observing the compressive strength at 28 days, even though CAGS is more porous and has a higher percentage of water absorption, it exhibits a higher strength by approximately 9%. This indicates that factors of porosity and water absorption, when analyzed in isolation, do not significantly influence the axial compression of the composites in this research.

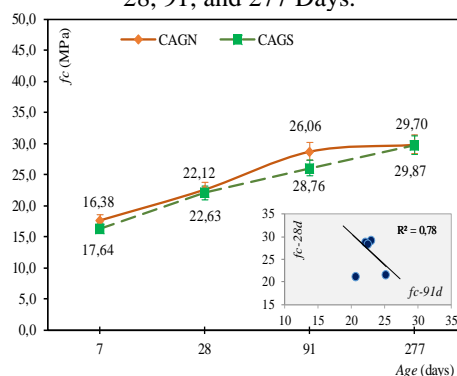
Analysis of Axial Compressive Strength and Modulus of Elasticity at Different Ages of Concretes

Compressive strength is considered by many to be the fundamental technological control in concrete, often overshadowing other tests that may require greater attention from the designer⁶. The compressive strength of concrete serves as an indirect assessment for determining other properties of the material. However, there may often be simplifications that do not accurately characterize certain characteristics, which is why a deeper understanding of these properties, such as the modulus of elasticity, becomes essential⁷.

Through a systematic analysis of the literature, it was possible to verify that there are several studies related to concrete with coarse aggregate made from bauxite residue. Although these studies are still in their infancy, the results presented are promising, particularly the works of Souza²⁵, Junior et al²⁶ and Santos et al²⁷, which produced concrete that achieved a maximum axial compressive strength of 40.34 MPa. This demonstrates that concrete with synthetic coarse aggregate has the potential to reach high compressive strengths.

As a new material, efforts are still being made to consolidate results through mitigating processes of reproducibility/repeatability, and to evaluate the physical, chemical, and mechanical applicability/viability over the long term in structural concrete, in this case, of normal strength. This study evaluated the axial compressive strength at ages of 7, 28, 91, and 277 days to determine the contribution of AGS to this mechanical property at both early and advanced ages.

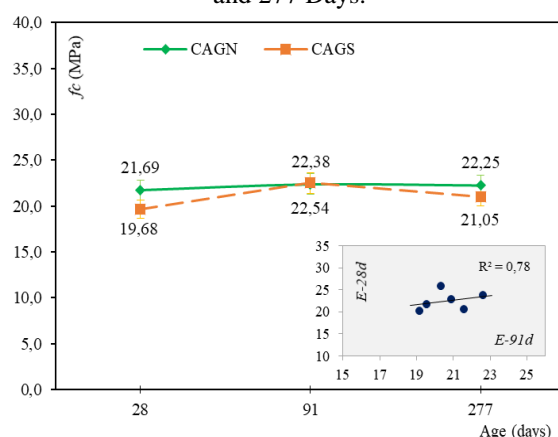
Figure 7: Graph of the Mapping of Axial Compressive Strength of Composites CAGN and CAGS at Ages 7, 28, 91, and 277 Days.



The compressive strength graph shows that both composites experienced a significant increase in strength up to ages greater than 91 days. The results also indicated that both CAGN and CAGS achieved very similar strength values. However, when related to the experimental mix derived from the dosage curve for the age of 28 days, estimated at 30 MPa, the produced batch of specimens initially would not meet the pre-established strength requirement but would still comply with the requirements established in NBR 12655²⁰ concerning aggressiveness class.

A more critical analysis of the calibration of the equipment used to conduct the modulus of elasticity tests on concrete is rarely addressed in the literature. However, one cannot overlook the importance of this calibration in obtaining reliable results²⁶. NBR 6118¹⁹ states that the elastic deformation of concrete depends on the composition of the concrete mix, especially the nature of the aggregates. Mehta and Monteiro²³ emphasize that the modulus of elasticity and the compressive strength of concrete are two properties that do not evolve in the same manner over time⁷. Based on this assertion, this research did not limit its evaluation of the modulus at the prescribed age of 28 days but extended the analysis to other ages, similar to that done for axial compression at more advanced ages of 91 and 277 days, as demonstrated in Figure 15. At 28 days, the modulus of CAGN was about 15% higher than that of CAGS, but at 91 days, this difference was less than 1%. The test conducted at 277 days confirms, based on the results obtained, that there was an intrinsic consolidation of the microstructure of both composites due to the small variation in their respective moduli.

Figure 8: Graph of the Mapping of the Modulus of Elasticity of Composites CAGN and CAGS at Ages 28, 91, and 277 Days.



The results were considered satisfactory for CAGS, taking into account the considerations highlighted by Rossignolo²⁴, who stated that for concretes with normal specific gravity and axial compressive strength values ranging from 20 to 50 MPa, the modulus of deformation can typically vary between 50% and 80% of the obtained value.

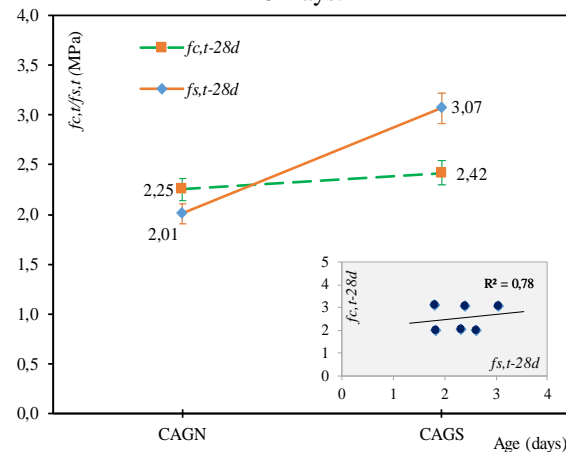
In item 8.2.8 of NBR 6118¹⁹ it is described that the modulus of elasticity (E_{ci}) should be obtained according to the testing method established in ABNT NBR 8522, with this standard considering the initial tangent modulus obtained at 28 days of age. Additionally, if it is not possible to perform the tests, the initial modulus of elasticity can be estimated using the expression: $E_{ci} = \alpha E \cdot \sqrt{f_c}$, for concretes with $f_{ck} \leq 50$ MPa. Following this calculation methodology, values of α were determined to be 0.9 for the rolled gravel AGN used in CAGN, the same value adopted for limestone as stated in this standard, and 1.34 for the coarse aggregate of bauxite residue (AGS) used in CAGS, which is greater than the value adopted for basalt and diabase.

Since the static modulus of elasticity test of the concretes was stipulated for compression stresses less than $0.5 f_c$ and tensile stresses less than f_{ct} , the Poisson's ratio (ν) can be taken as equal to 0.2, as stated in item 8.2.9 of NBR 6118¹⁹.

Comparative Analysis of the Results of Split Tensile Strength and Flexural Strength

When analyzing the graph of indirect tensile strength and simple flexural strength^{28,29,30}, as demonstrated in Figure 16, and making an analogy with the results obtained for axial compression at 28 days, there is an approximate variation of 10-11% related to indirect tensile strength and 9-14% related to simple flexural strength. These results are within the normative parameters for normal strength concretes and align with the systematic review²⁷ referencing the results of split tensile strength from the works of Rosário³¹ and Souza²⁵, which addressed this topic related to normal strength concrete produced with coarse aggregate made from bauxite residue, with results ranging from 2.36 MPa to 3.29 MPa, respectively, thereby confirming a direct correlation with the strengths obtained in axial compression.

Figure 9: Graph Showing the Relationship in Tensile and Flexural Strength of Composites CAGN and CAGS at 28 Days.

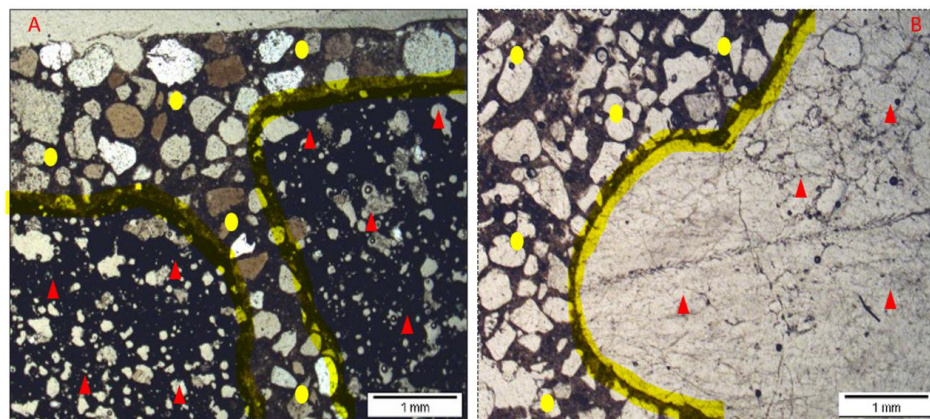


Analysis of the Microstructure of Fractured Concrete Using Optical and Scanning Electron Microscopy (SEM)

In order to analyze the microstructure of the matrices and transition zones of concretes with synthetic and natural coarse aggregates, images were obtained using an optical microscope (Figure 17) and a scanning electron microscope (SEM) (Figures 19 and 20) from samples of fractured concrete specimens tested for split tensile strength at 28 days. The sample preparation involved fragmenting the samples into convenient sizes, followed by drying them in an oven at 100°C for a period of 24 hours, and finally polishing them into thin sections.

Figure 10: Image Obtained Through an Optical Microscope of the Microstructure of the Transition Zone of the Composite. A) Polarized Light - CAGS. B) Natural Light - CAGN.

Legend: Delimitation of the transition zone. ▲ Coarse Aggregate (dispersed phase). Mortar (cementitious matrix).



Isaia et al ³³ define the contact zone as the relationship between the grains of coarse and fine aggregates that merge with the cement paste, surrounding and separating the aggregates, generating films of water around the grains and forming a weaker layer at the interface. Neville⁶ concludes that this transition zone has higher porosity and, therefore, lower strength.

The SEM analyses were performed using the LS15 EVO model microscope from Zeiss at LAMIN-BE. The samples were metalized with a thin layer of gold to obtain backscattered electron (BSE) images.

Figure 11: mages Obtained by Scanning Electron Microscopy (SEM) of the CAGS Sample. A) Visualization of the Microstructure. B) Detail of the Zone.

Legend: Delimitation of the Transition Zone Cracks ▲ Coarse Aggregate (impregnated with refractory material). Porosity in the Coarse Aggregate and Cementitious Mortar.

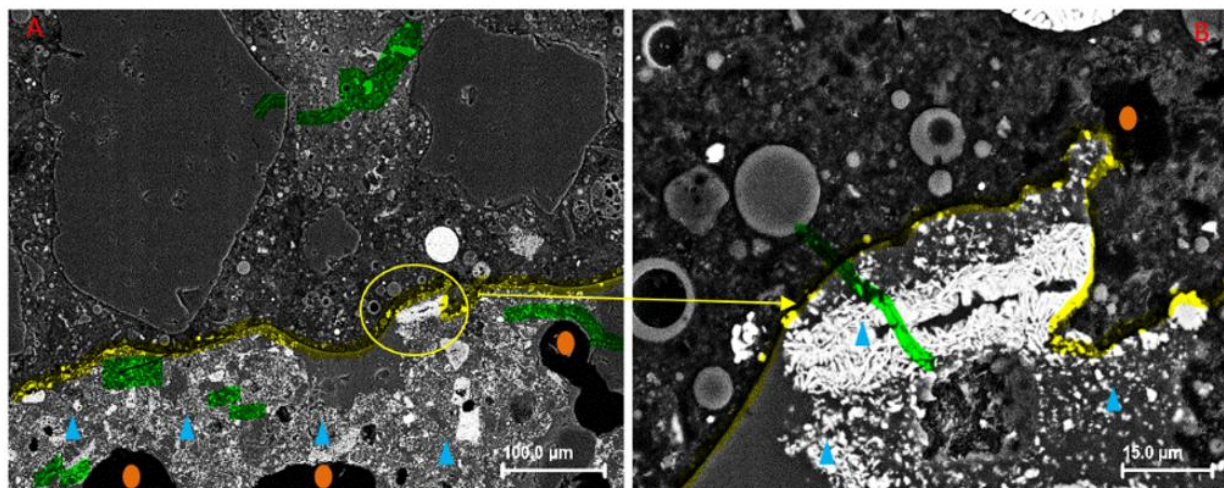
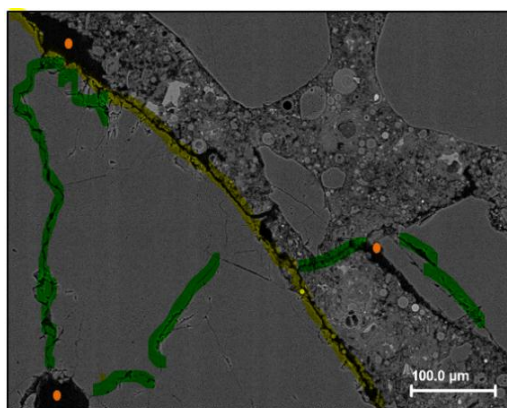


Figure 12: Images Obtained by Scanning Electron Microscopy (SEM) of the CAGN Sample. Source: (Authors, 2024).

Legend: Delimitation of the Transition Zone. Cracks. Porosity in the Coarse Aggregate and Cementitious Mortar.



The analyses of the fractured concretes using the optical microscope involved visualizing the surfaces of the mortars and coarse aggregates, as well as the interface of the transition zone. Figure 17 highlights the clear separation through the transition zone between the cementitious matrix of the composites with the dispersed phase and the coarse aggregates. Figure 17.A also shows a detail of the synthetic coarse aggregate concerning the distribution of silica grains, represented by the white dots in the bauxite residue, covering the entire dark area.

Through the use of SEM, it was possible to verify in Figures 18 and 19 the delimitation of the matrix and dispersed phases through the zones of the CAGN and CAGS composites, as well as the existing cracks and pores. Another important aspect to highlight in Figures 18.A and 18.B, in the region where the AGS is located, is the high concentration of whitish flakes. This situation arises, as explained in the work of Fernandes et al.⁸, because during the production of the synthetic coarse aggregate, in the sintering stage in an electric furnace at a temperature of 1250°C, there is often detachment of refractory material used on the internal walls, resulting in the impregnation of various produced aggregate stones. Subsequently, during the production of the CAGS composite, scraping was performed on the stones that contained impregnation of refractory material. However, in some stones, complete scraping could not be achieved. Nevertheless, it is important to note that this situation does not cause reactions with the alkalis in the cement or lead to a loss of mechanical strength of the AGS.

Both the CAGS and CAGN samples exhibited fractures in the cementitious matrix, which is documented in the specific literature for normal strength concrete. However, it is observed in Figure 19 that

CAGN exhibited greater quantities and thicknesses of shear cracks compared to CAGS, as shown in Figure 18. This type of crack is not expected in coarse aggregates present in normal strength concrete. However, it corroborates the results obtained earlier in the Los Angeles abrasion test, where AGN was identified as a friable coarse aggregate.

Figure 19 shows a higher quantity of pores in the synthetic coarse aggregate, which is a factor that contributed to the mixing water absorption, thus increasing the final binder water ratio and consequently decreasing the mechanical strength. It was also observed that there is good adhesion between the mortar and CAGS in the transition zone.

IV. Conclusion

Influence of AGS Quality on the CAGS Composite

The consistency and axial compressive strength are concrete properties influenced by the physical, chemical, and mechanical characteristics of aggregates. In this research, the synthetic coarse aggregate used had the highest proportion of bauxite waste in its composition, as reported in the study by Fernandes et al. (2025). The results demonstrated that, concerning physical characteristics—such as grain shape, particle size distribution, and maximum aggregate size—it was possible to adjust the classification in accordance with the requirements of NBR 7211, 2022, allowing for proper concrete mix design.

On the other hand, this aggregate still has higher porosity compared to natural coarse aggregate, specifically river gravel, which was used in this study as a benchmark. This resulted in a concrete with greater porosity compared to the reference concrete.

Based on the findings of Fernandes regarding aggregate wear due to the Los Angeles abrasion test, alkali-aggregate reaction, and sulfate attack resistance, the results were considered satisfactory, as they met the requirements of NBR 7211. Correlating these findings with the microstructural analysis of the studied concrete, no deleterious anomalies were observed up to 277 days of age.

Influence of AGS Porosity on the Binder Water of CAGS

Given that the synthetic coarse aggregate has a porosity level that is not ideal due to its laboratory-based production process, it results in higher water absorption compared to natural coarse aggregate. This condition altered the binder water content of the concrete, increasing it from 0.51 to 0.61 in the final corrected mix design. This adjustment was necessary because the synthetic coarse aggregate absorbed a portion of the water that was intended exclusively for cement matrix hydration. Consequently, additional water was used in the mix to adjust the concrete consistency.

This increase in binder water to maintain consistent workability affected the results of axial compressive and tensile strength, as well as the modulus of elasticity, up to 28 days of age.

Influence of Axial Compression and Modulus of Elasticity of AGS on the Mechanical Properties of CAGS

This study evaluated axial compressive strength at 7, 28, 91, and 277 days to determine the contribution of AGS to this mechanical property at both early and advanced ages. AGS contributed positively since it was not considered friable, as indicated by the abrasion test results, and because it had a compressive strength above 50 MPa, which is greater than that of the cementitious matrix.

The results obtained from compression and flexural tensile strength tests were within the standard parameters for normal-strength concrete, according to NBR 6118, 2023, supporting the systematic review conducted.

From the evaluation of the modulus of elasticity of concrete with AGS at 28, 91, and 277 days, it was concluded that the synthetic coarse aggregate contributed effectively to the intrinsic consolidation of the microstructure from 91 days onward. This was due to the aggregate's porosity and the gradual release of absorbed water back into the cementitious matrix over time.

A particularly important and unprecedented criterion, based on the calculation methodology outlined in item 8.2.8 of NBR 6118, 2023, combined with the static modulus of elasticity results for CAGS at 28 days, allowed the determination of the α_e value for the synthetic coarse aggregate as 1.4. This value can be used as a theoretical reference for estimating the modulus of elasticity of normal-strength concrete containing this type of synthetic coarse aggregate.

CAGS Microstructure

Optical and scanning electron microscope (SEM) images revealed a well-defined transition zone between the cementitious matrix and the synthetic coarse aggregate grains. Additionally, most fractures were observed in the cementitious matrix, a situation predicted in the literature for normal-strength concrete.

No ruptures were observed in the synthetic coarse aggregate, only minor shear cracks, which were significantly fewer than those found in the natural coarse aggregate. This finding is consistent with the results of

the Los Angeles abrasion test, in which the synthetic coarse aggregate exhibited less mass loss, while the natural coarse aggregate was classified as friable.

SEM microstructural images of the concrete also revealed a greater number of pores in the synthetic coarse aggregate, which contributed to the absorption of mixing water, leading to an increase in the final binder water ratio and, consequently, a reduction in mechanical strength.

Final Considerations

One aspect observed in the characterization of the synthetic coarse aggregate was its limited contribution to the mechanical properties of concrete. The aggregate's porosity led to higher water absorption and increased voids in the concrete compared to concrete with natural coarse aggregate.

Another noteworthy point is that, as this is a novel material still undergoing research, further studies are needed to consolidate results based on mitigating processes for reproducibility/repeatability and to evaluate its long-term physical, chemical, and mechanical applicability and feasibility in normal-strength structural concrete.

V. Acknowledgments

The authors would like to thank HYDRO, the Brazilian funding agency CAPES, and PPGECE for the master's and doctoral scholarships, which were essential for the completion of this study. Furthermore, we extend our gratitude to LEC and LEQ (Civil and Chemical Engineering Laboratories at the Federal University of Pará), the CPRM Analysis Laboratory, and UNIFESP for allowing the use of their facilities for some of the analyses conducted in this research.

References

- [1]. Brasil. ONU confirma Belém (PA) como cidade-sede da Cop-30, a conferência do clima. 2023.
- [2]. Oliveira e Rossi, 2012. Concretes with red mud coarse aggregates. *Materials Research*, v. 15, n. 3, p. 333–340, maio, 2012.
- [3]. Albuquerque, NG. Estudo das Propriedades Mecânicas de Concretos Dosados com Agregados Produzidos a partir de Lama Vermelha. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). UFPA - Departamento de Engenharia Civil, 2007.
- [4]. Neville, A.M, 1997, *Propriedades do concreto*. Tradução de Salvador E. Giammusso. 2ª edição, Ed. Pini, Brasil.
- [5]. 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.
- [6]. 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.
- [7]. Hydro e UFPA pesquisam diferentes aplicações para o rejeito da bauxita da Mineração Paragominas. Disponível em: <https://www.hydro.com/pt-BR/imprensa/noticias/2021/hydro-e-ufpa-pesquisam-diferentes-aplicacoes-para-o-rejeito-da-bauxita-da-mineracao-paragominas/>.
- [8]. Fernandes 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.
- [9]. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7211 (2022). Agregados para concreto – Requisitos.
- [10]. Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre. DNIT 446/2024-ME: Agregado - Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou magnésio - Método de ensaio.
- [11]. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. DNER 037/1997-ME: Agregado graúdo para concreto de cimento.
- [12]. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 16697 (2018). Cimento Portland — Requisitos.
- [13]. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7182 (2025). Solos — Ensaio de compactação.
- [14]. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 15630 (2009). Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica.
- [15]. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 5739 (2007). Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.
- [16]. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 10341 (2006). Agregado graúdo para concreto - determinação do módulo de deformação estático e do diagrama tensão-deformação em rocha matriz.
- [17]. ASTM C597-16 (Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete).
- [18]. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 8802 (2019). Concreto endurecido - determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica
- [19]. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6118 (2023). Projeto de estruturas de concreto.
- [20]. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 12655 (2022). Concreto de cimento Portland - preparo, controle, recebimento e aceitação – procedimento.
- [21]. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 8953 (2015). Concreto para fins estruturais - classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.
- [22]. Norma Mercosul, NM 67 (1996). Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.
- [23]. Mehta PK, Monteiro PJM. *Concreto: microestruturas, propriedades e materiais*. 2. Ed. São Paulo: Nicole Pagan Hasparyk; 2014.
- [24]. Rossignolo, J. A., (2009). *Concreto leve estrutural: Produção, propriedades, microestrutura e aplicações*. Pini.
- [25]. 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 de Doutorado). Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil, 2010
- [26]. Junior, A.J.P.C.; Costa, D. C. L.; Macedo, A.N., 2022. 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.
- [27]. Santos, D. H., Dalmeida, A. P., Figueiredo, W. B., Valente, A. L., & Souza, J. A. S., (2014). 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.
- [28]. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 12655 (2022). concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - parte 1: Módulos estáticos à compressão.

- [29]. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7222 (2011). Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.
- [30]. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 12142 (2010). Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.
- [31]. Rosário, KA. Concreto com utilização de agregado graúdo sintético produzido a partir da lama vermelha: estudos de dosagem, propriedades e microestrutura. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil, 2013.
- [32]. Isaia, G. E. et al. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais, IBRACON, 2007.