

UFPA

PPGEC

Universidade Federal do Pará



Rodrigo Pedroso da Silva

Produção e análise do agregado graúdo sintético leve composto a partir do resíduo da bauxita no sistema de dosagem parcial e total nas propriedades do concreto.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Dissertação orientada pelo Professor Dr. Alcebíades Negrão Macêdo

Belém – Pará – Brasil

2023



PRODUÇÃO E ANÁLISE DO AGREGADO GRAÚDO SINTÉTICO LEVE COMPOSTO A PARTIR DO RESÍDUO DA BAUXITA NO SISTEMA DE DOSAGEM PARCIAL E TOTAL NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

AUTOR:

RODRIGO PEDROSO DA SILVA

DISSERTAÇÃO 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 MESTRA EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 07 / 02 / 2024.

BANCA EXAMINADORA:



Documento assinado digitalmente

ALCEBIADES NEGRÃO MACEDO

Data: 23/02/2024 15:26:21-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alcebiades Negrão Macêdo
Orientador (UFPA)

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



Documento assinado digitalmente

RODRIGO RODRIGUES DA CUNHA

Data: 23/02/2024 14:40:22-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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



Documento assinado digitalmente

MARCELO DE SOUZA PICANÇO

Data: 23/02/2024 06:56:40-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Membro Interno (UFPA)

Visto:

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

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)

- S586p Silva, Rodrigo Pedroso da.
Produção e análise do agregado graúdo sintético leve
composto a partir do resíduo da bauxita no sistema de
dosagem parcial e total nas propriedades do concreto /
Rodrigo Pedroso da Silva. — 2024.
132 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Alcebiades Negrão Macêdo
Coorientador(a): Prof. Dr. Rodrigo Rodrigues da Cunha
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Belém, 2024.
1. Resíduo da Bauxita. 2. Agregado Sintético. 3.
Concreto. I. Título.

CDD 624

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus, por estar vivo, pela capacidade intelectual e força de vontade que foi me concedida e por nos permitir ter pessoas tão especiais junto a mim, sem as quais não estaria aqui hoje.

Gostaria de agradecer a minha mãe Rosangela Pedroso da Silva e avó Idena Campos Pedroso, pelo amor concedido, orações, pelos valores ensinados em nossa casa, como caráter, dedicação, comprometimento e caridade, que a cada ano de vida confirmam que são a melhor forma de atingir o sucesso. Onde sempre me apoiaram nos meus estudos e acreditaram na minha capacidade em realizar essa pesquisa.

Destaco esse agradecimento em especial a então intitulada Co-Autora da pesquisa Tayanne Christina Melo Vieira, que colaborou assiduamente desde o princípio do trabalho, tanto na fabricação dos agregados sintéticos, quanto na confecção dos concretos, ensaios em geral e escrita da dissertação. Obrigado pela compreensão e apoio nos momentos de dificuldade, pelo incentivo, e principalmente pela dedicação ao longo destes anos de pesquisa, que tornou este período mais tranquilo e leve.

Agradeço ao Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macêdo, na minha aprovação ao Programa de Pós-graduação, quanto por aceitar essa pesquisa.

Meu muito obrigado ao Prof. Dr. Rodrigo Rodrigues da Cunha que se mostrou muito solícito e mesmo em poucos encontros e com seu trabalho e afazeres particulares, contribuiu de forma fundamental tanto na leitura quanto na correção para o alcance dos resultados desta pesquisa.

Agradeço ao Técnico Joel Silva Martins, que realizou os ensaios mecânicos. E ao MSc. Robson Fernandes, que forneceu a mim moldes e contatos. E disponibilizou seu tempo para colaborar no transporte dos materiais base e ensaios desta dissertação.

Agradeço ao Prof. Dr. Cláudio Remédios pela utilização dos equipamentos do LABNANO-AMAZON/UFPA. E a Dra. Graziela Telles e Técnico João Godinho pela realização dos ensaios de DRX, FTIR e MEV.

Desejo, a todos que contribuíram com este trabalho, que Deus lhes conceda muita saúde e que obtenham sempre muito sucesso na vida.

Sonhe grande, pois ter sonhos grandes dão o mesmo trabalho dos sonhos pequenos.

Jorge Paulo Lemann

RESUMO

SILVA, R. P. Produção e análise do agregado graúdo sintético leve composto a partir do resíduo da bauxita no sistema de dosagem parcial e total nas propriedades do concreto. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2023.

As atividades profusamente empregues pela indústria do alumínio tendo como primordial a extração mineral da bauxita que é um dos maiores recursos econômicos do estado do Pará, porém é desenvolvido um subproduto que resulta em esfacelos ao meio ambiente, que é o resíduo da bauxita (RB) oriundo do processo Bayer, com a aplicação de técnicas hodiernas eficientes de fabricação de agregados sintéticos, a matéria-prima tem se transformado cada vez mais considerável para a indústria da construção civil. A pesquisa em questão tem como objetivo confeccionar e analisar o comportamento do agregado graúdo cerâmico sintéticos de resíduo da bauxita sinterizados a 1000°C com 85% de matéria-prima, 10% de areia fina e 5% de argila, apresentando a efetividade para fabricação de um concreto, que exibe atributos que seja usual na indústria da construção civil, utilizando a conformações granulométricas de 4,75 mm a 19 mm e combinações de dosagem com 0%, 30%, 50%, 70% e 100% de agregado sintético em relação aos agregados graúdos usuais como seixo rolado e pedra britada. A metodologia empregada para a produção dos agregados consistiu da secagem da RB, argila e areia, moagem com passante a 100 mesh e mistura das matérias-primas, secagem em estufa a 100°C e britagem, posteriormente sinterizadas por 180 min. Em seguida submetidas a análises por difratometria de Raios-X, fluorescência de Raios-X e estudos físicos. A confecção do concreto seguiu as normas pré-estabelecidas, e análises em seu estado endurecido e fresco, juntamente com microscopia eletrônica de varredura para caracterização. Embora as adversidades na etapa de fabricação os resultados são auspiciosos, fundamentando que em todos os preceitos averiguados os agregados sintéticos confeccionados exibiram uma elevada porosidade e, por conseguinte, baixa massa específica seguindo os parâmetros normativos requisitados na atualidade com excelentes resultados, para seus atributos físicos e mecânicos, onde o (CPB50AS e CSR50AS) que alcançaram valores de resistência à compressão (24,11 e 23,79 MPa) respectivamente sem o uso de superplastificantes, obtendo dinamismo análogo aos de concretos com inclusão de agregados convencionais. Entende-se, portanto, que os agregados sintéticos leves fabricados com uso do resíduo da bauxita retêm efetividade técnica, ratificando a capacidade do resíduo para este epílogo.

Palavras-chave: Agregado Sintético. Resíduo da Bauxita. Concreto.

ABSTRACT

SILVA, R. P. Production and analysis of lightweight synthetic coarse aggregate composed from bauxite residue in the partial and total dosing system on concrete properties. Masters dissertation. Post-graduate Program in Civil Engineering. Federal University of Pará. Belém, 2023.

The activities profusely employed by the aluminum industry have as their primary mineral extraction of bauxite, which is one of the largest economic resources in the state of Pará, however, a by-product is developed that results in waste in the environment, which is bauxite residue (RB) Coming from the Bayer process, with the application of modern efficient techniques for manufacturing synthetic aggregates, the raw material has become increasingly important for the construction industry. The research in question aims to manufacture and analyze the behavior of coarse synthetic ceramic aggregate from bauxite residue sintered at 1000°C with 85% raw material, 10% fine sand 5% clay and, presenting the effectiveness for manufacturing of a concrete, which exhibits attributes that are common in the construction industry, using granulometric conformations from 4.75 mm to 19 mm and dosage combinations with 0%, 30%, 50%, 70% and 100% synthetic aggregate in relation to the usual coarse aggregates such as pebbles and crushed stone. The methodology used to produce the aggregates consisted of drying RB, clay and sand, grinding with a through mill at 100 mesh and mixing the raw materials, drying in an oven at 100°C and crushing, subsequently sintered for 180 min. They were then subjected to analysis by X-ray diffractometry, X-ray fluorescence and physical studies. The concrete was manufactured following pre-established standards, and analyzes were carried out in its hardened and fresh state, together with scanning electron microscopy for characterization. Despite the adversities in the manufacturing stage, the results are auspicious, based on the fact that in all the precepts investigated, the manufactured synthetic aggregates exhibited high porosity and, therefore, low specific mass, following the normative parameters currently required, with excellent results, for their physical attributes. and mechanical, where the (CPB50AS and CSR50AS) achieved compressive strength values (24.11 and 23.79 MPa) respectively without the use of superplasticizers, obtaining dynamism similar to that of concrete with the inclusion of conventional aggregates. It is understood, therefore, that light synthetic aggregates manufactured using bauxite residue retain technical effectiveness, confirming the residue's capacity for this epilogue.

Palavras-chave: Synthetic Aggregate. Bauxite Residue. Concrete.

LISTA DE SIGLAS

ABAL	Associação Brasileira de Alumínio
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
A/C	Relação água/cimento
ACI	American Concrete Institute
AS	Agregado Sintético
ASTM	American Society for Testing and Materials
CP	Corpo de Prova
DIN	German Institute for Standardization
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRS	Depósito de Rejeitos Sólidos
DRX	Difratometria de Raios-X
EDS	Espectrografia por Dispersão de Energia
FCJ	Resistência média do concreto à compressão
FCK	Resistência característica do concreto à compressão
FRX	Fluorescência de Raios-X
ISO	International Standard
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PH	Potencial Hidrogeniônico
PPGF	Programa de Pós-Graduação em Física
RA2-R	Redutor de água tipo 2/retardador
RAA	Reatividade álcali-agregado
RAS	Reações álcalis-silicato
RB	Resíduo da Bauxita
UFPA	Universidade Federal do Pará

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Indústria do alumínio no mundo no ano de 2018 e 2019	16
Figura 2 - Estrutura da dissertação	19
Figura 3 - Produção de Bauxita Milhões Tonelada ao ano	22
Figura 4 - Produção de Alumina Milhões Tonelada ao ano	24
Figura 5 - O Processo Bayer	25
Figura 6 - Resíduo de bauxita da produção de alumina	26
Figura 7 - Depósito de resíduo sólido (DRS 1) e (DRS 2) da Alunorte Barcarena – PA ano de 2022	27
Figura 8 - Limites da composição granulométrica do agregado graúdo.	34
Figura 9 - Fluxograma da Metodologia.	40
Figura 10 - Resíduo da bauxita, areia e argila.	41
Figura 11 - Fluxograma das etapas da produção do agregado sintético (AS).	42
Figura 12 - (a) RB destorroada; (b) RB no moinho de bolas.	43
Figura 13 - Porcentagem de material passante na peneira 100 mesh usando o moinho de bolas.....	43
Figura 14 - (a) Areia antes do moinho de bola; (b) Areia passante na p. 100 mesh.	44
Figura 15 - (a) argila destorroada; (b) argila no moinho de bolas.	45
Figura 16 - Massa cerâmica homogênea	46
Figura 17 - (a) Projeção do forno; (b) Interno do forno; (c) Temperatura externa do forno.	47
Figura 18 - Agregados secos em estufa a 100°C e após a queima a 1000°C	47
Figura 19 - (a) Agregado sintético mais as esferas dentro do tambor; (b) Material passante da peneira 1,7mm; (c) Material retido na peneira 1,7mm.	54
Figura 20 - (a) Comparador de comprimento mais a amostra; (b) Comparador de comprimento mais a barra padrão.....	55
Figura 21 - Curva Granulométrica do Retido Acumulado% do Agregado Miúdo com os limites da distribuição.	58
Figura 22 - Curva Granulométrica do Retido Acumulado% do Agregado Graúdo (Seixo) com os limites da distribuição.	59
Figura 23 - Curva Granulométrica do Retido Acumulado% do Agregado Graúdo (Brita) com os limites da distribuição.	61

Figura 24 - Curva Granulométrica do Retido Acumulado% do Agregado Graúdo (Sintético) com os limites da distribuição.....	62
Figura 25 - Distribuição dos grãos do Agregado Graúdo (Sintético).	63
Figura 26 - Início e Fim de pega do cimento Portland CP II-F-32.....	64
Figura 27 - Difractogramas do resíduo da bauxita in natura e agregado sintético calcinado a 1000°C	65
Figura 28 - Reatividade potencial do agregado sintético	67
Figura 29 - Agregado Sintético e Hidróxido de Cálcio P.A.	68
Figura 30 - Fluxograma da confecção do concreto.	80
Figura 31 - Fluxograma das etapas de execução do método ABCP	82
Figura 32 - Fluxograma da execução do concreto	86
Figura 33 - Abatimento de tronco de cone (Slump Test)	87
Figura 34 - Esquema de aplicação de carga em prismas.....	91
Figura 35 - Classes de agressividade ambiental (CAA)	92
Figura 36 - Fenolftaleína, Álcool etílico, Água deionizada.....	93
Figura 37 - Indicação de pH nas amostras	94
Figura 38 - Massa específica no estado fresco	97
Figura 39 - Relação entre a massa específica estado endurecido, absorção de água e índice de vazios dos concretos com agregados naturais e agregados sintéticos. .	98
Figura 40 - Massa específica do concreto no estado endurecido e estado fresco ...	99
Figura 41 - Resistência a compressão aos 7 e 28 dias	100
Figura 42 - Tipos de ruptura do corpo de prova	102
Figura 43 - Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.	104
Figura 44 - Corpos de prova após ensaio de tração por compressão diametral. ...	105
Figura 45 - Resistência à Tração na Flexão aos 28 dias.....	107
Figura 46 - Corpos de prova após ensaio de tração na flexão	107
Figura 47 - Resultados de módulo de deformação aos 28 dias.....	109
Figura 48 - Médias das espessuras das amostras de carbonatação natural.....	111
Figura 49 - Concreto CAS100 (a) MEV a 1Kx e (b) MEV a 5Kx	112
Figura 50 - Concreto CSR70AS (a) MEV a 200x e (b) MEV a 1Kx	112
Figura 51 - Concreto CAS100 (a) MEV a 1Kx e (b) MEV a 5Kx	113
Figura 52 - Concreto CPB50AS (a) MEV a 1Kx e (b) MEV a 2Kx	113
Figura 53 - Concreto CSR70AS (a) MEV a 200x e (b) MEV a 1Kx	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de Bauxita no ano de 2018 e 2019	21
Tabela 2 - Produção bruta de alumínio no Pará	21
Tabela 3 - Produção de Alumina no ano de 2018 e 2019	23
Tabela 4 - Composição química, expressa em óxidos, comumente encontrado em resíduo de bauxita	27
Tabela 5 - Pesquisas sobre o agregado graúdo com utilização do resíduo da bauxita	29
Tabela 6 - Classificação dos agregados graúdos referente a origem	32
Tabela 7 - Análise química da argila caulinitica	45
Tabela 8 - Características físicas, químicas e mecânicas do cimento CP II F 32	50
Tabela 9 - Propriedade e característica do aditivo	51
Tabela 10 - Procedimentos experimentais para análise dos agregados	52
Tabela 11 - Características do Agregado Miúdo (Areia) obtido em Laboratório	57
Tabela 12 - Características do Agregado Graúdo (Seixo Rolado) obtido em Laboratório	59
Tabela 13 - Características do Agregado Graúdo (Brita) obtido em Laboratório	60
Tabela 14 - Características do Agregado Graúdo (Sintético) obtido em Laboratório	62
Tabela 15 - Fluorescência de Raios-X da RB in natura	64
Tabela 16 - Resultado do ensaio de Abrasão “Los Angeles”	66
Tabela 17 - Grau de risco de ocorrência de RAS	68
Tabela 18 - Índice de atividade pozolânica (IAP) com hidróxido de cálcio do Agregado Sintético	69
Tabela 19 - Grupos de concretos produzidos	81
Tabela 20 - Fator a/c, Fck e Traço	83
Tabela 21 - Procedimentos experimentais para análise dos concretos	84
Tabela 22 - Número de corpos de prova moldados	85
Tabela 23 - Propriedades dos concretos no estado fresco	96
Tabela 24 - Resistência à compressão simples aos 7 e 28 dias, abatimento, massa especifica no estado endurecido aos 7 dias e classificação segundo a NBR 8953 (ABNT, 2015)	100
Tabela 25 - Tipos de ruptura de corpos de prova conforme o (Anexo A) da NBR 5739 (ABNT, 2018)	103

Tabela 26 - Resistência à tração por compressão diametral.	104
Tabela 27 - Resistência à Tração na Flexão.....	106
Tabela 28 - Valores de módulo de deformação e resistência a compressão aos 28 dias.....	108

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. RELEVÂNCIA DO TEMA E JUSTIFICATIVA.....	15
1.2. OBJETIVOS.....	17
1.2.1. Objetivo geral	17
1.2.2. Objetivos específicos	17
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	18
2- REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1. BAUXITA.....	20
2.2. ALUMINA	22
2.3. PROCESSO BAYER.....	24
2.4. RESIDUO DA BAUXITA (RB)	25
2.5. PESQUISAS REALIZADAS COM A UTILIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO DE RESIDUOS DA BAUXITA.....	28
2.6. AGREGADOS GRAÚDOS CONVENCIONAIS E LEVES PARA CONCRETO.....	31
2.6.1. Caracterização dos agregados	33
2.6.1.1 <i>Composição granulométrica</i>	33
2.6.1.2 <i>Forma e textura superficial</i>	34
2.6.1.3 <i>Resistência mecânica</i>	34
2.7. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO AGREGADO SINTÉTICO NO CONCRETO.....	34
2.8. MINERALOGICAS	36
3- ARTIGO 1 - CARACTERIZAÇÃO E PRODUÇÃO DOS MATERIAIS DE UMA MISTURA CIMENTÍCIA COM AGREGADO GRAÚDO SINTETICO PROVENIENTE DO RESÍDUO DA BAUXITA	37
3.1. INTRODUÇÃO	38
3.2. METODOLOGIA	40
3.2.1. Materiais para a confecção dos agregados sintéticos	41
3.2.2. Etapas da Produção do agregado	41
3.2.3. Materiais	48
3.2.4. Métodos	52
3.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	57
3.3.1. Agregado Miúdo	57
3.3.2. Agregado Graúdo	58

3.3.3.	Início e Fim de Pega	63
3.3.4.	Espectrometria por fluorescência de raios-X (FRX)	64
3.3.5.	Difração de raios-X (DRX)	64
3.3.6.	Abrasão “Los Angeles”	65
3.3.7.	Análise da Reação Álcali Agregado (RAA) para o agregado sintético	66
3.3.8.	Índice de Atividade Pozolânica (IAP) – Hidróxido de Cálcio.....	68
3.4.	CONCLUSÃO	69
3.5.	REFERÊNCIAS	71
4-	ARTIGO 2 – ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO PRODUZIDO COM AGREGADO GRAÚDO SINTÉTICO LEVE COMPOSTO A PARTIR DO RESÍDUO DA BAUXITA	76
4.1.	INTRODUÇÃO	77
4.2.	METODOLOGIA.	79
4.2.1.	Materiais	79
4.2.2.	Métodos.....	80
4.3-	ANÁLISE DE RESULTADOS	95
4.3.1.	Índice de consistência.....	95
4.3.2.	Massa específica do concreto fresco	96
4.3.3.	Massa específica, Absorção de água por imersão e índice de vazios	97
4.3.4.	Resistência à compressão axial.....	99
4.3.5.	Resistência à tração por compressão diametral.	103
4.3.6.	Resistência à tração na flexão.....	106
4.3.7.	Módulo de elasticidade estático	108
4.3.8.	Carbonatação Natural.....	109
4.3.9.	Análise Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	111
4.4.	CONCLUSÃO	114
4.5.	REFERÊNCIAS	116
5-	CONCLUSÃO GERAL	120
5.1	PROPOSTA PARA PESQUISAS FUTURAS	122
5-	REFERÊNCIAS GERAIS	123

1. INTRODUÇÃO

1.1. RELEVÂNCIA DO TEMA E JUSTIFICATIVA

As minerações de determinadas indústrias do setor primário geram uma grande profusão de rejeitos sólidos, segundo Chagas, Resende e Guerreiro (2018) em sua maioria, depositados em ambientes próximos às fábricas, devido ao elevado custo que representam seu transporte, tratamento e gestão adequada.

De acordo com Chagas, Resende e Guerreiro (2018) para cada tonelada de alumina (Al_2O_3) produzida, de 0,5 a 2 toneladas de resíduo da bauxita (RB) sejam geradas, levando a uma produção global de cerca de 120 milhões de toneladas de RB por ano. Onde enormes consequências no ambiente têm sido referidas, resultante da proeminente proporção de RB. É de grande interesse o desenvolvimento de tecnologias que permitam dar o resíduo da bauxita um destino adequado (CHAGAS, RESENDE E GUERREIRO, 2018).

Devido à grande demanda para o discernimento dos elevados volumes de resíduos constituído, a pesquisa em questão propõe a produção de agregados graúdo sintéticos compostos por resíduos da bauxita e sua incorporação no concreto nas combinações com agregados graúdos de seixo e brita, pois apesar do avanço tecnológico da construção civil e dos novos materiais que são implantados diariamente para atender a necessidade de altas resistências no concreto, onde este continua a ser um problema frequentes quando agregados convencionais são utilizados.

Pois o material em questão mostrou-se bastante útil em pesquisas anteriores como a de (Oliveira e Rossi (2012); Isaias et.al (2014); Rosário (2013); etc.), tendo resultados significativos comparados com os agregados naturais.

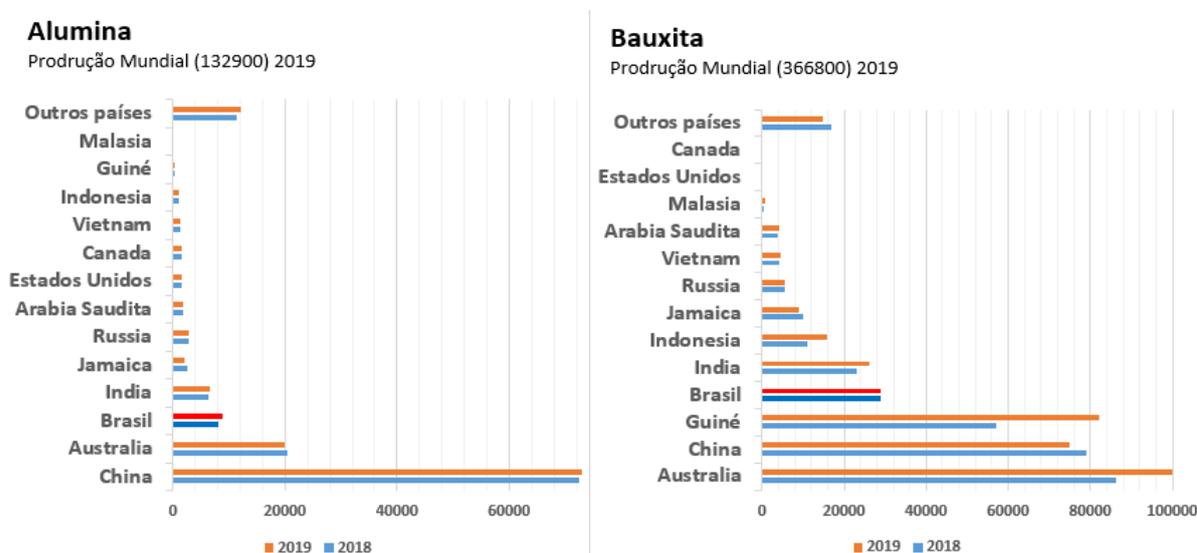
O resíduo da bauxita (RB) gerado do processo Bayer é um subproduto da indústria do alumínio, centralizada na região norte do país, particularmente no estado do Pará, nordeste da floresta amazônica. O que, se mal administrado, pode levar a problemas ambientais segundo Oliveira e Rossi (2012) são de descarte de resíduos variam da contaminação de rios, água subterrânea, solo, danos à flora e fauna, corrosão de equipamentos metálicos e o aspecto ruim das áreas de armazenamento.

Segundo a associação brasileira de alumínio ABAL (2019) o alumínio é obtido a partir da bauxita, um minério encontrado em três principais grupos climáticos:

Mediterrâneo, Tropical e Subtropical. A bauxita deve apresentar no mínimo 30% de óxido de alumínio (Al_2O_3) aproveitável para que a produção seja economicamente viável, onde as reservas brasileiras, além da ótima qualidade do minério, também estão entre as maiores do mundo (ABAL 2019).

De acordo com a USGS (2020) estima-se que os recursos de bauxita sejam de 55 a 75 bilhões de toneladas, na África (32%), Oceania (23%), América do Sul e Caribe (21%), Ásia (18%) e em outros lugares (6%) como pode ser visto no gráfico da figura 1.

Figura 1 Indústria do alumínio no mundo no ano de 2018 e 2019



FONTE: USGS, 2020

A produção mundial de bauxita 2019 foi 13,15% superior à quantidade revisada em 2018, atribuída principalmente a um aumento significativo da produção na Guiné (25 mil T), bem como ao aumento da produção na Austrália (13,60 mil T) e na Índia (3 mil T) que foi parcialmente compensado pela diminuição da produção na China (4 mil T) figura 1. O Brasil aparece em quarto mantendo sua produção do ano de 2018 com 29 mil toneladas extraídas no ano de 2019.

A produção mundial de alumina decresceu 0,76% em 2019 em comparação com a de 2018 figura 1. O aumento da produção na China, Brasil e na Índia foi parcialmente compensado pela diminuição da produção na Austrália e Jamaica. O Brasil aparece em terceiro aumentando sua produção 9,88% com 8,9 mil toneladas extraídas em comparação com ano de 2018.

Escassez dos recursos naturais é motivo de grande preocupação causando ausência de matérias-primas, subsidiando a busca por materiais opcionais, sustentabilidade limpa e técnicas de reciclagem de resíduos. O progresso sustentável das indústrias depende de eficácia de disponibilização e gestão de resíduos industriais e conservação de recursos naturais. Por isso, à muitas pesquisas para aplicação de RB como substitutos de materiais naturais na engenharia civil.

O estado do Pará é caracterizado pela mineração, pois uma de suas primordiais atividades econômicas é a produção mineral. Isso levou o Banco Mundial a categorizar sua economia principalmente como mineradora. Dentre as múltiplas indústrias instaladas no estado, elas geram uma série de detritos, como os resíduos do processo Bayer que, se manejados erroneamente, podem causar diversos problemas ambientais. O resíduo da bauxita ao ser usado na confecção de agregados sintéticos, permutaria o uso dos agregados convencionais para fabricação do concreto, como seixos naturais e pedras britadas.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

Produzir e analisar o comportamento físico e químico do agregado graúdo sintéticos leve de resíduo da bauxita sinterizados a 1000°C com 85% de matéria-prima, 10% de areia fina e 5% de argila, apresentando a efetividade para fabricação de um concreto, que exibe atributos que seja usual na indústria da construção civil, utilizando a conformações granulométricas de 4,75 mm a 19 mm e combinações de dosagem com 0%, 30%, 50%, 70% e 100% de agregado sintético em relação aos agregados graúdos usuais como seixo rolado e pedra britada.

1.2.2. Objetivos específicos

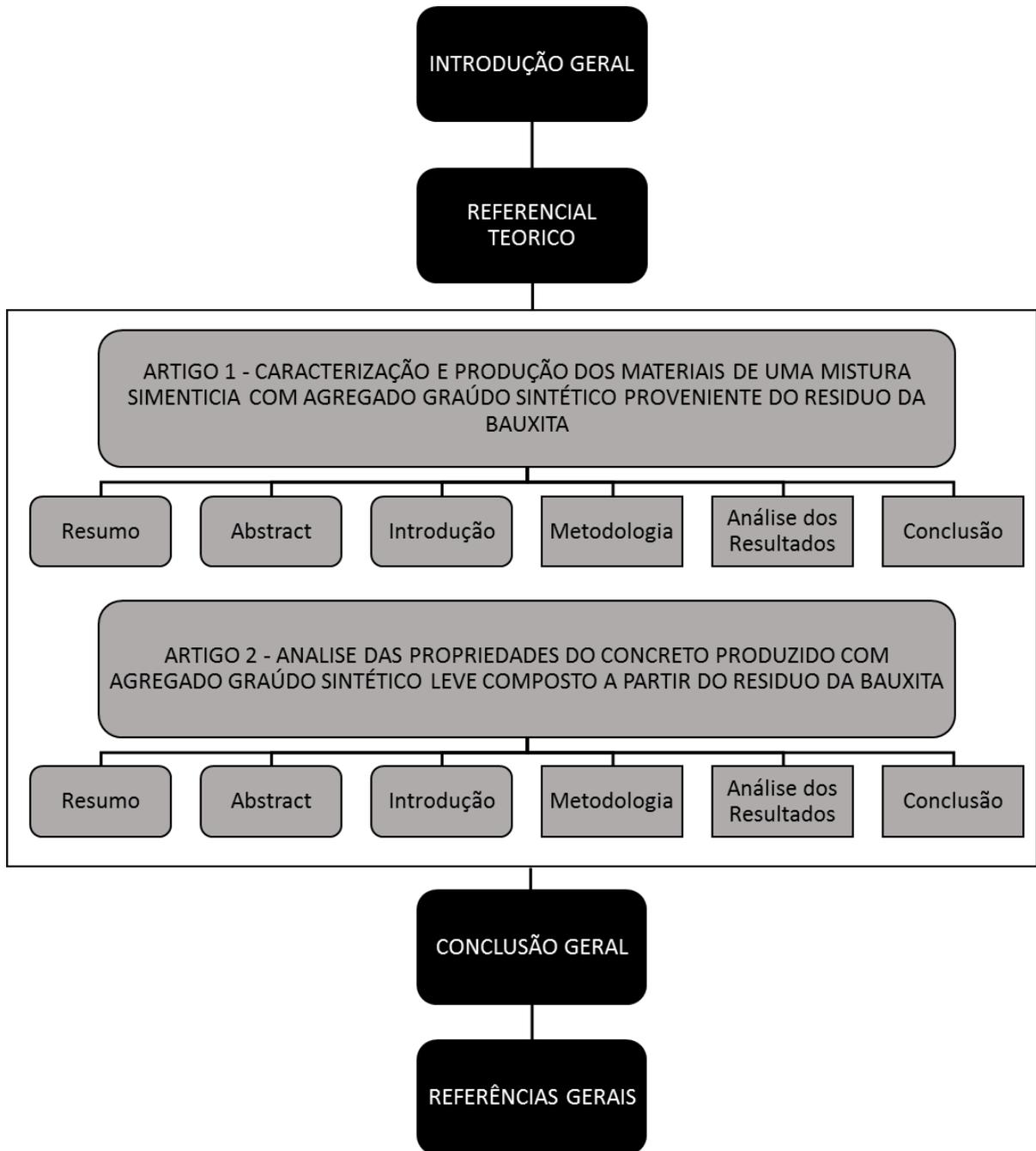
- Caracterizar quimicamente com (Fluorescência de Raio-X e Difração de Raio-X) o resíduo da bauxita (RB) *in natura*.
- Produzir os agregados graúdos cerâmicos sintéticos calcinados a 1000°C com 85% de resíduo da bauxita, 10% areia e 5% de argila.

- Analisar as propriedades físicas dos agregados (absorção de água, massa específica, massa unitária, granulometria, abrasão Los Angeles, índice de atividade pozolânica e reação álcali agregado). E propriedades químicas (Difração de Raio-X).
- Dosar o concreto nas combinações com agregados graúdos, seixo rolado, pedra britada e agregado sintético em 0%, 30%, 50%, 70% e 100%, com amostras de dimensões cilíndricas de 100 mm x 200 mm e amostras prismáticas com 100 mm x 100 mm x 400 mm.
- Avaliar as propriedades das amostras de concretos produzidos, massa específica no estado fresco e endurecido, índice de consistência, resistência à tração por compressão diametral, tração na flexão, absorção de água, resistência à compressão axial e módulo de elasticidade.
- Analisar microestruturalmente as amostras de concretos produzidos, através da Microscopia eletrônica de varredura (MEV).

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A estrutura da pesquisa está fracionada em 5 (cinco) fases. O fluxograma das etapas sequenciais da dissertação está apresentado na Figura 2.

Figura 2 Estrutura da dissertação



FONTE: AUTOR, 2023.

2- REFERENCIAL TEÓRICO

No presente capítulo foram efetuadas referências à matéria prima base bauxita, à alumina e ao processo Bayer, o resíduo da bauxita um rejeito produzido durante esse processo de beneficiamento, apresentadas posteriormente algumas pesquisas executadas, em que se empregou o agregado graúdo sintético de RB e o concreto gerado.

2.1. BAUXITA

A Bauxita teve sua evidenciação primaria na França em 1821, da qual seu nome prove da aldeia Les Baux de Provence. De acordo com a Hydro (2023) a bauxita é formada como um produto residual ao longo de milhões de anos por intemperismo químico de rochas contendo silicatos de alumínio.

Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2017), grande parte das reservas mundiais de bauxita se encontra localizada em regiões tropicais e subtropicais, ocorrendo em três principais tipos de climas, sendo que 57% (tropical), 33% (mediterrâneo) e 10% (subtropical). A tabela 1 mostra a produção mundial de bauxita.

Tabela 1 Produção de Bauxita no ano de 2018 e 2019

Países	Produção (t)	
	2018	2019
Austrália	86400	100000
China	79000	75000
Guiné	57000	82000
Brasil	29000	29000
Índia	23000	26000
Indonésia	11000	16000
Jamaica	10100	8900
Rússia	5650	5400
Vietnam	4100	4500
Arábia Saudita	3890	4100
Malásia	500	900
Estados Unidos	0	0
Canadá	0	0
Outros Países	17000	15000
Total Mundial	326640	366800

FONTES: USGS, 2020

De acordo com Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2017) o ano de 2016, as substâncias da classe dos metálicos responderam por cerca de 77% do valor total da produção mineral comercializada brasileira. Desse valor cerca de 4,8% são de alumínio no Brasil, onde podemos ver na tabela 2 a produção bruta no Pará segundo (DNPM, 2017).

Tabela 2 Produção bruta de alumínio no Pará

Substancia	Quantidade (t)	Contido (t)	Teor Médio Al ₂ O ₃ (%)
Alumínio (Bauxita)	46.767.625	22.312.212	47,71

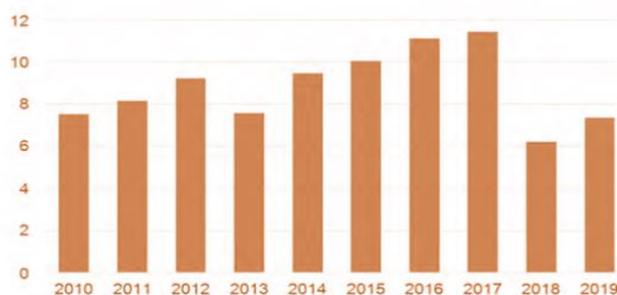
FONTES: DNPM, 2017

De acordo com a Hydro (2020) a bauxita de Paragominas é extraída em poços abertos e classificada e triturada para transporte como lama através de um oleoduto a aproximadamente 240 quilômetros até a Alunorte para refino em alumina. Hydro (2023) a bauxita é uma mistura de minerais que contém concentrações variadas de óxidos de alumínio hidratados, bem como impurezas. Os principais minerais do minério são gibbsita (tri-hidrato de alumina), boemita e diásporo (mono-hidratos de

alumina). A Hydro (2023) cita que a bauxita ocorre em uma camada fina (tipicamente, de 2 a 5 metros) na superfície ou próxima dela.

Segundo a Hydro (2020) no seu relatório anual a produção de bauxita em Paragominas atingiu 7,4 milhões de toneladas no ano de 2019, como pode ser visto na figura 3, que vinha de uma decrescente em 2018 de produção com pouco mais de 6 milhões de tonelada ano.

Figura 3 Produção de Bauxita Milhões Tonelada ao ano



FONTE: HYDRO, 2020.

2.2. ALUMINA

O processamento da alumina de acordo com relatório anual da Hydro (2020) se inicia retirando água da bauxita e misturando a bauxita com soda cáustica a altas temperaturas e pressão. A mistura é bombeada para o digestor, e a reação química dissolve a alumina. A Hydro (2020) ainda diz que esse processo produz uma solução de aluminato de sódio, que é transferida para os tanques para separar as impurezas por meio de sedimentação e filtração. O aluminato de sódio resfriado é bombeado para precipitadores produzindo cristais de alumina, transferidos para tanques espessantes e para calcinadores de leito fluidizado para remover a água, produzindo alumina pura (HYDRO, 2020).

Segundo a USGS (2020) a produção de alumina (equivalente calcinado) diminuiu 40% e 69% em comparação com as de 2016 e 2015, respectivamente. A USGS (2020) ainda estima que 81% das remessas domésticas foram usadas para a produção de metal. A produção mundial de alumina (equivalente calcinado) foi estimada em 129 Mt. Onde principais países produtores foram, em ordem decrescente de produção, China, Austrália, Brasil e Índia como pode ser visto na tabela 3.

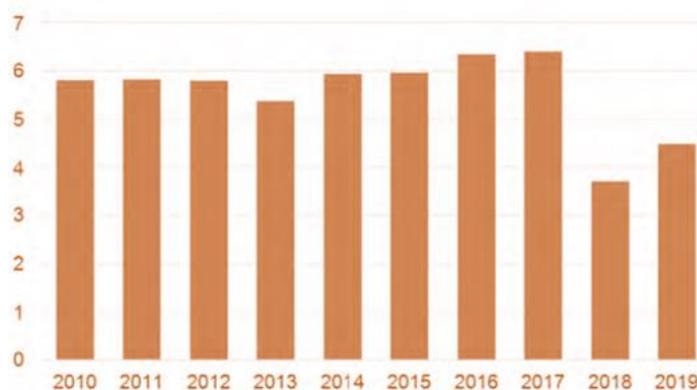
Tabela 3 Produção de Alumina no ano de 2018 e 2019

Países	Produção (t)	
	2018	2019
China	72500	73000
Austrália	20400	20000
Brasil	8100	8900
Índia	6430	6700
Jamaica	2480	2100
Rússia	2760	2700
Arábia Saudita	1770	1800
Estados Unidos	1570	1600
Canada	1570	1500
Vietnam	1310	1300
Indonésia	1000	1000
Guiné	180	300
Malásia	0	0
Outros Países	11400	12000
Total Mundial	131470	132900

FONTES: USGS, 2020

Segundo a Hydro (2020) no seu relatório anual a produção de alumina da Alunorte foi de 4,5 milhões de toneladas como pode ser visto na figura 4. A fabricação de alumínio primário foi de aproximadamente 2,0 milhões de toneladas e fornecemos 2,6 milhões de toneladas de insumos de fundição e metais líquidos para clientes internos e externos.

Figura 4 Produção de Alumina Milhões Tonelada ao ano



FONTE: HYDRO, 2020.

2.3. PROCESSO BAYER

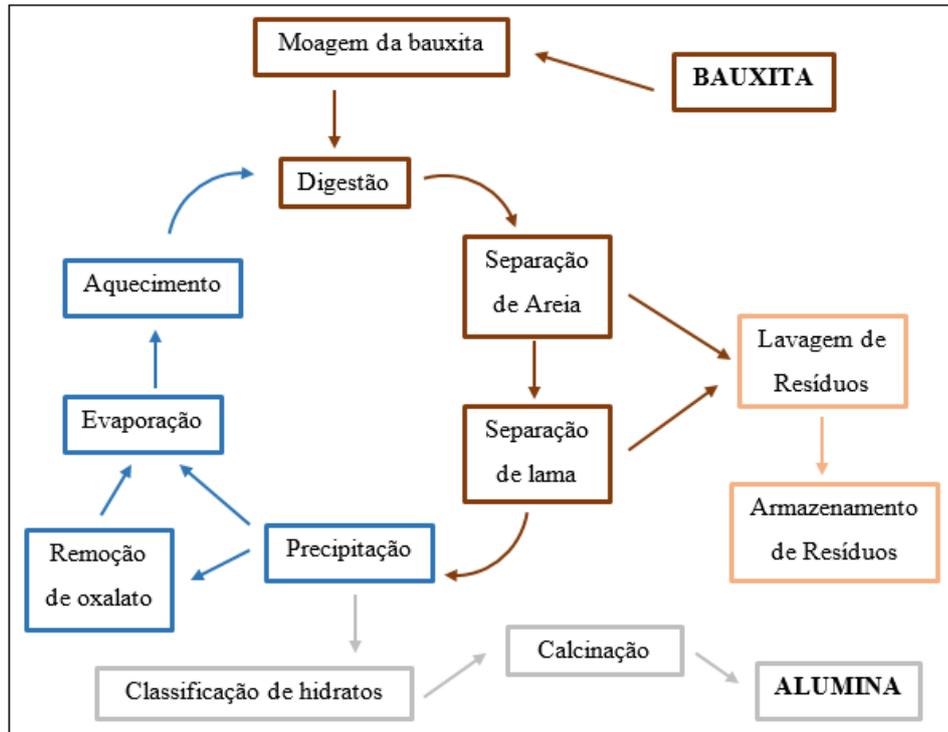
O processo Bayer foi patenteado pela primeira vez nos Estados Unidos da América pela Bayer 1894. Na atualidade é amplamente utilizado para a produção de alumina a partir de minérios de bauxita contendo minerais como gibbsita e boemita, (JAMIESON, 2013).

O processo Bayer inicia-se com a preparação das matérias-primas, e posteriormente prossegue com as etapas de digestão, clarificação/filtração e precipitação do hidrato, calcinação e conversão em alumina como e mostrado na figura 4, (ALCOA, 2021).

Segundo Jamieson (2013) o processo mostrado na Figura 5 envolve a mineração do minério de bauxita e trituração até um tamanho de partícula típico inferior a 2 mm de diâmetro, isso permite a extração eficiente de gibbsita ou boemita de minerais de fundo indesejados, como óxidos de ferro e quartzo. A pasta de bauxita é misturada com uma solução altamente alcalina (hidróxido de sódio, Na + OH-) e então aquecida em um processo de digestão. Durante este processo de digestão, a cáustica quente libera o alumínio na forma de hidróxido de alumínio, para produzir um “licor” de aluminato de sódio (JAMIESON, 2013).

O material precipitado (hidrato) é separado do licor de aluminato cáustico, sendo uma parte do hidrato fino reciclado para ser usado como semente, em seguida é seco e calcinado para produzir alumina, (JAMIESON, 2013).

Figura 5 O Processo Bayer



FONTE: AUTOR, 2023 adaptado de JAMIESON, 2013

Segundo o autor Jamieson (2013) alguns depósitos de bauxita contêm uma quantidade significativa de material orgânico, alguns dos quais se dissolvem no licor, aumentando a carga de impurezas. O autor cita que essas espécies orgânicas são conhecidas como 'Carbono Orgânico Total' (TOC).

2.4. RESÍDUO DA BAUXITA (RB)

O rejeito oriundo do processo de beneficiamento da bauxita para a fabricação de alumina, por intermédio do processo Bayer. É o principal resíduo do processo de extração e um trabalho considerável foi centrado em suas melhores práticas de processamento e armazenamento. O óxido de cálcio residual está potencialmente presente a variedades de minerais e produtos amorfos, como carbonato de alumínio e sódio e hidróxido de alumínio, (JAMIESON, 2013).

Segundo a Hydro (2020) o resíduo de bauxita é um produto do processo de refino de alumina, seu descarte é desafiador devido aos grandes volumes como pode ser visto na figura 6 e à natureza alcalina do componente líquido do resíduo. De acordo

com a Hydro Alunorte (2023) o resíduo é lavado com água para diminuir a alcalinidade e recuperar a soda cáustica para reaproveitamento. Usa uma tecnologia aprimorada de empilhamento a seco para descartar resíduos de bauxita, o que permite o armazenamento de resíduos em encostas mais íngremes, reduzindo as necessidades de área de disposição como pode ser visto na figura 7. Segundo Jamieson (2013) o resíduo de bauxita é classificado como resíduo perigoso devido ao alto pH da solução cáustica residual. Portanto deve ser armazenado com segurança. Uma vez neutralizada, o rejeito perde sua natureza perigosa, torna-se mais fácil de manusear e pode ser processada em outros produtos potenciais.

Hydro Alunorte (2023) isso reduz a pegada ambiental relativa. A nova área de depósito de resíduos de bauxita da Alunorte inclui 9 filtros de prensa mais avançados que geram um resíduo seco com 78% de teor de sólidos. São capazes de reduzir o teor de umidade residual para 22%, abaixo dos 36% obtidos com a tecnologia de filtro de tambor anterior (HYDRO, 2020).

Figura 6 Resíduo de bauxita da produção de alumina



FONTE: HYDRO, 2020.

Segundo a Hydro Alunorte (2023) o depósito de sólido DRS 1 com 67 Mm³ está em reabilitação e o DRS 2 com 25,2 Mm³ que contem a tecnologia de empilhamento a seco como pode ser visto na figura 7.

Figura 7 Depósito de resíduo sólido (DRS 1) e (DRS 2) da Alunorte Barcarena – PA ano de 2022



FONTE: AUTOR, via Google Earth (julho, 2023)

De acordo com Rosário (2013) este resíduo, normalmente retém todo o ferro, titânio e sílica presentes na bauxita, bem como o alumínio que não foi extraído durante o processo. Segundo Evans (2016) os primeiros passos importantes na discussão de usos são uma consideração de os compostos químicos presentes no resíduo de bauxita, os níveis presentes e as características físicas do material. É altamente profuso a composição química da bauxita como mostrado na tabela 4 feita pela World Aluminium and the European Aluminium Association (2015), esses dados representam valores para bauxitas comumente usadas e o alcance pode ser ainda mais amplo para algumas bauxitas.

Tabela 4 Composição química, expressa em óxidos, comumente encontrado em resíduo de bauxita

Componentes	Gama típica (wt%)
Fe ₂ O ₃	5-60
Al ₂ O ₃	5-30
TiO ₂	0,3-15
CaO	2-14
SiO ₂	3-50
Na ₂ O	1-10
LOM	5-20

FONTE: WORLD ALUMINIUM AND THE EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION, 2015

Outros constituintes juntamente podem estar vigentes em níveis baixos como cita Evans (2016) estes serão invariavelmente óxidos metálicos como arsênico, berílio, cádmio, cromo, cobre, gálio, chumbo, manganês, mercúrio, níquel, potássio, escândio, tório, urânio, vanádio, zinco, zircônio e terras raras elementos (REEs). O autor cita elementos não metálicos que podem ocorrer em o resíduo de bauxita é fósforo, carbono e enxofre.

De acordo com Evans (2016) os minerais presentes são complexos e compreendem alguns que estão presentes na bauxita e outras que são produzidas durante os processos de autoclavagem e dessilicação.

Outra grande diversidade de compostos orgânicos pode estar vigente, são derivados de matéria vegetal e orgânica na bauxita, sobrecarga ou o uso de modificadores de crescimento de cristais ou floculantes, assim como carboidratos, álcoois, fenóis, e os sais de sódio de polibásicos e hidroxíácidos, como ácidos húmicos, fúlvicos, succínicos, acéticos ou oxálicos, (EVANS, 2016).

Evans (2016) os outros fatores que são importantes ao considerar uso são as características físicas, como tamanho de partícula distribuição e alguns parâmetros variáveis, como umidade conteúdo. O tamanho médio das partículas está normalmente na faixa de 5–10 μm , De acordo com Evans (2016) algumas refinarias de alumina separam as diferentes frações de tamanho durante o processamento, enquanto outros não. A World aluminium and the european aluminium association (2015) diz que essas frações grosseiras recebem nomes como 'areia de óxido vermelho' ou 'resíduo de areia', e as frações finas são denominadas 'resíduo da bauxita'. Estas frações grosseiras e as frações finas são tratadas de maneira muito diferente na planta. Onde as areias fracionárias grossas são frequentemente utilizadas para construção de estradas nas áreas de resíduos, para fornecer uma camada de drenagem sob a lama, (WORLD ALUMINIUM AND THE EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION, 2015).

2.5. PESQUISAS REALIZADAS COM A UTILIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO DE RESÍDUOS DA BAUXITA

Diferentes âmbitos têm apostado em mecanismos para aprimorar a condição do material reciclado e resultar em um método de confecção mais produtivo. Em vista disso, há uma elevada demanda de estudos em diversas áreas, não apenas na

engenharia civil, para acessar os resíduos de bauxita que são armazenados em depósitos sem destino definido.

O rejeito da bauxita tende a ser uma matéria prima consideravelmente relevante para diversas aplicações. Segundo Rosário (2013) existem grandes pesquisas que focam o uso desse resíduo na indústria cerâmica, possivelmente devido ao fato desta ser quimicamente inerte ($\text{Ph} > 12$). Tem uma necessidade de transformação química visando estabilizar os compostos, principalmente de sódio, que se apresentam na forma de hidróxido (ROSÁRIO, 2013).

Na tabela 5 mostra pesquisadores que buscaram realizar pesquisas oportunas ao agregado sintético de RB em grandes quantidades, a fim de encontrar uma localização ambientalmente correta, técnica e economicamente viável para esses subprodutos onde alcançaram resultados promissores.

Tabela 5 Pesquisas sobre o agregado graúdo com utilização do resíduo da bauxita

Autor	Data	Título da Pesquisa
SOUZA	2010	Estudo e avaliação do uso de resíduos do processo Bayer como matéria prima na produção de agregados sintéticos para a construção civil.
OLIVEIRA e ROSSI	2012	Concretos com agregados grossos de lama vermelha.
ROSÁRIO	2013	Concreto com utilização de agregado graúdo sintético produzido a partir da lama vermelha: estudos de dosagem, propriedades e microestrutura.
REIS	2014	Caracterização mineralógica do agregado obtido a partir da lama vermelha no processo bayer
PEREIRA	2019	Bauxita brasileira refratária: uma nova alternativa para fabricantes e usuários e refratários
MAGALHÃES	2022	Utilização de resíduo do processo Bayer e biomassa da Amazônia para a produção de agregado sintético

FONTE: AUTOR, 2023

Souza (2010) em sua tese de doutorado estuda e avalia o uso do resíduo do processo Bayer como matéria prima na produção de agregados sintéticos para a construção civil. Segundo Souza (2010) foram produzidos agregados graúdos a partir do resíduo da bauxita e analisados por meio dos ensaios de porosidade aparente, absorção de água e massa específica aparente, posteriormente utilizados na produção de concretos.

Oliveira e Rossi (2012) neste trabalho, as misturas de materiais utilizadas para produzir agregados grosseiros apresentaram até 80% de RB, 30% de metacaulim e 30% de sílica ativa como resíduos reciclados. Segundo os autores vários testes foram realizados para determinar as propriedades físicas dos agregados e avaliar o desempenho mecânico dos concretos com os novos agregados, incluindo resistência à abrasão hidráulica, e os resultados foram comparados aos de referência, ou seja, concretos de seixos rolados.

Rosário (2013) em sua dissertação de mestrado apresenta um estudo sobre a produção de agregados sintéticos a partir do resíduo de beneficiamento da bauxita e o uso destes na produção de concretos. De acordo com sua dissertação, os concretos produzidos foram, concreto referência com seixo, concreto com RB em 0%, 50% e 100% encontram aplicação no setor da construção civil, na medida em que apresentaram resultados bastante satisfatórios, principalmente no que se refere à resistência.

Reis (2014) analisou em sua pesquisa as características físico-químicas e mineralógicas dos agregados sintetizados a partir da mistura do resíduo da bauxita, argila, areia e carvão vegetal em 4 composições, variando as quantidades de lama vermelha e argila. 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.

Pereira et al. (2019) apresenta um trabalho com novo RGB de alto teor de alumina (~85%) de origem brasileira cujo processo viabilizou uma tecnologia com alta refratariedade e realizar a comparação com amostra chinesa. Onde o autor utilizou um processo de fabricação diferenciado que foi promover a secagem dessa matéria-prima, homogeneização em uma mistura correta para ajustar o teor de sílica e alumina. Os grânulos foram secos, calcinados e sinterizados em forno rotativo, com temperaturas de processamento em torno de 1650 °C. O produto do forno foi resfriado por meio de um resfriador rotativo, triturado usando trituradores de rolo e peneirado em peneiras vibratórias para produzir a fração de tamanho desejada.

Magalhães (2022) em sua pesquisa mostra que os agregados podem ser produzidos com uma vasta gama de materiais como a biomassa, utilizou-se o carvão de caroço de açaí além de outros materiais, como sílica e a argila. Na pesquisa em questão foi produzido quatro composições diferentes, nas quais variou-se os teores

de RB e carvão, fixando os outros teores nas duas temperaturas de calcinação e analisou-se os resultados através de métodos para determinar a porosidade, absorção de água e massa específica aparente das amostras, além da caracterização por MEV. Os resultados obtidos nessa pesquisa mostraram uma maior porosidade e, conseqüentemente, menor massa específica para os agregados em menor temperatura e maior teor de carvão vegetal

2.6. AGREGADOS GRAÚDOS CONVENCIONAIS E LEVES PARA CONCRETO

Agregados graúdos para Construção Civil são materiais granulares, onde segundo Rosário (2013) não tem forma ou volume definidos, de dimensões e propriedades adequadas às obras de engenharia, sendo comumente utilizados na produção de concretos e argamassas de cimento Portland.

Segundo Rosário (2013) são exemplos de agregados graúdo, a pedra britada, o cascalho, além das argilas e dos substitutivos como resíduos inertes reciclados, escórias de aciaria, produtos industriais, entre outros. Pode se destacar o grande uso desses agregados convencionais nas principais capitais amazônicas como Manaus e Belém, consomem cada cerca de 600.000 m³ de agregado graúdo anualmente, sendo 90% de seixo rolado, (BACELLAR, 2001 apud. SANTOS, 2019).

De acordo com Rosário (2013) o fato de se conseguir agregados em abundância e baratos, acreditava-se que estes desempenhavam um papel secundário na fabricação de concretos. Mas com a utilização do concreto em larga escala, logo foi possível perceber o seu verdadeiro papel. A partir de então deu-se real importância técnica, econômica e social a este insumo (ROSÁRIO, 2013).

A retirada destes materiais além de prejudicar a natureza, também prejudica a produção e comercialização devido serem processos com custos cada vez mais elevados, pois as jazidas estão cada vez mais distantes. No sentido de evitar o esgotamento de jazidas naturais, tem-se buscado diversas alternativas, principalmente aquelas ambientalmente corretas visando atender à crescente demanda de insumos para a indústria da construção civil. (SANTOS, 2019 e ROSÁRIO, 2013).

Quanto à origem dos agregados graúdos podemos classifica como, naturais, britados, artificiais e reciclados como pode ser visto na tabela 6.

Tabela 6 Classificação dos agregados graúdos referente a origem

Agregados	Descrição	Exemplos
Naturais	São aqueles que se encontram de forma particulada na natureza, nas condições de uso imediato sem necessidade de beneficiamento	Seixo obtidos nos leitos dos rios
Britados	São aqueles que são submetidos a processo de cominuição (diminuição do diâmetro das partículas), de modo geral feito por meio do processo de britagem, de modo que seja possível sua utilização como agregado na produção de concreto	Pedra britada, pedrisco, pedregulho britado, etc
Artificiais	São aqueles obtidos por meio de processos industriais, ou seja, são aqueles em que ocorrem alterações da maneira como se encontram depositados.	Argila expandida e peletizada, folhelho expandido por tratamento térmico, vermiculita expandida, etc.
Reciclados	Podem ser resíduos industriais granulares, que possuem propriedades que os tornem adequados ao uso como agregado. Este tipo de agregado também pode ser proveniente do beneficiamento de resíduos de construção e demolição, os chamados RCD's	Agregados reciclados a escória de alto forno, entulhos de construção/demolição, resíduos cerâmicos provenientes de olarias, etc

FONTE: AUTOR, 2023 adaptado de ROSÁRIO 2013

Os agregados com massas específicas menores que 2 g/cm^3 , portanto menores que os agregados convencionais, são chamados de agregados leves (CABRAL et. al., 2008).

Agregados sintéticos fabricados pela queima de argila a partir de 800°C oferecem possibilidades bastante interessantes, pois ensaios experimentais mostram que a argila queimada nesta temperatura se desidroxila, podendo fornecer agregados

estáveis e aptos, para serem utilizados na fabricação de concretos leves, com o objetivo de reduzir o peso próprio das estruturas. (SANTOS, 2019).

Quanto a propriedades dos concretos com agregados leves, a resistência à compressão é função do agregado empregado, uma vez que este é normalmente mais fraco que a pasta de cimento. Geralmente a resistência vem associada à densidade do concreto, a qual é definida pelo teor de agregado leve presente na mistura e constitui-se na principal propriedade destes concretos. (SANTOS, 2019).

2.6.1. Caracterização dos agregados.

Os agregados graúdos dispõem diversas atributos relevantes que devem ser minuciosamente classificados com a finalidade de caracterizá-los para a confecção de concreto.

2.6.1.1 Composição granulométrica.

De acordo com Rosário (2013) são caracterizados por meio da composição granulométrica é permitido averiguar a distribuição dos grãos que constitui os agregados. Essa propriedade, de modo geral, é expressa em termos de porcentagens individuais ou acumuladas retidas em cada uma das peneiras da chamada série normal ou intermediária que são estabelecidas na NBR 7211 (ABNT, 2022). Onde os agregados graúdos, são aqueles cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm.

Segundo Rosário (2013) as propriedades como forma e textura das partículas, a dimensão máxima do agregado e o teor de água da mistura, são responsáveis pela trabalhabilidade do concreto. Quanto mais fino for o agregado, maior será a quantidade de água requerida para se atingir uma dada trabalhabilidade.

Não existe uma granulometria ideal, no entanto a NBR 7211 (ABNT, 2022) estabelece limites da distribuição granulométrica para os agregados graúdos, os quais são apresentados na figura 8.

Figura 8 Limites da composição granulométrica do agregado graúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona granulométrica d/D ^a				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-	-	-	-	0 – 5
63 mm	-	-	-	-	5 – 30
50 mm	-	-	-	0 – 5	75 – 100
37,5 mm	-	-	-	5 – 30	90 – 100
31,5 mm	-	-	0 – 5	75 – 100	95 – 100
25 mm	-	0 – 5	5 – 25 ^b	87 – 100	-
19 mm	-	2 – 15 ^b	65 ^b - 95	95 – 100	-
12,5 mm	0 – 5	40 ^b - 65 ^b	92 – 100	-	-
9,5 mm	2 - 15 ^b	80 ^b – 100	95 – 100	-	-
6,3 mm	40 ^b – 65 ^b	92 – 100	-	-	-
4,75 mm	80 ^b – 100	95 – 100	-	-	-
2,36 mm	95 - 100	-	-	-	-

FONTE: NBR 7211 (ABNT, 2022)

2.6.1.2 Forma e textura superficial.

Segundo Rosário (2013) a textura superficial e a forma das partículas do agregado exercem maior influência sobre as propriedades do concreto no estado fresco do que as no estado endurecido. A forma faz referência às características geométricas, tais como arredondada, angulosa, alongada ou achatada.

De acordo com Rosário (2013) compararam-se partículas lisas e arredondadas, com partículas de textura áspera, angulosas e alongadas, as segundas necessitariam mais pasta de cimento para produzir misturas de concreto trabalháveis, que acarretaria aumento no custo de produção.

2.6.1.3 Resistência mecânica.

A resistência à compressão, a resistência à abrasão são propriedades influenciadas pela porosidade, além de serem inter-relacionadas entre si. Os agregados que são utilizados com mais frequência na produção de concreto possuem resistência mecânica muito superior à do concreto (ROSÁRIO 2013).

2.7. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO AGREGADO SINTÉTICO NO CONCRETO

São três propriedades dos agregados exercem influência direta ao desempenho do concreto, responsáveis por propriedades como: aderência entre o

agregado e a pasta de cimento, resistência à abrasão e estabilidade química. Ressaltam que os poros existentes na superfície da partícula exercem influência sobre a aderência entre o agregado e a pasta de cimento, e conseqüentemente sobre a resistência mecânica do concreto. (SOUZA, 2010 e ROSÁRIO, 2013).

A permeabilidade refere-se à continuidade dos poros no interior do concreto, de modo geral mais permeável e, por conseguinte apresenta-se mais vulnerável ao ataque de agentes agressivos. (ROSÁRIO 2013).

Tendo em vista a avaliação de início e final de pega da pasta acimentícia que pode sofrer alterações em seu comportamento Segundo Manfroi, Cheriaf e Rocha (2010), entre os fatores que poderiam modificar as reações de hidratação, destacam-se a finura do cimento/resíduo da bauxita e a presença de Al_2O_3 e Na_2O na composição química do resíduo. Petrucci (1998) destaca que o tempo de início de pega decorre desde o momento da adição de água na mistura até iniciarem-se as reações com os compostos do cimento, e o final de pega sendo o momento em que pequenas cargas não deformam mais a pasta, tornando-se está um bloco rígido.

Determinar se o material possui pozolanicidade ou não e de suma importância para o que está sendo estudado, a pozolana em compósitos cimentícios tende no combate à corrosão de armaduras. Segundo Abrão (2019), a adição de pozolanas em cimento Portland, pode afetar sua eficiência em termos de reatividade e demanda de água, onde a adição de pozolanas altera a reatividade do cimento, gerando as modificações a composição química, mineralógica e área superficial específica. Segundo John e Rocha (2003), a aplicação dos resíduos deve ser baseada nas suas características e em suas fases. A partir de suas caracterizações físicas- químicas dos resíduos é possível definir o seu aproveitamento e determinar suas aplicações.

Estudos das patologias em concreto e de suma importância dentro da construção civil, uma delas é o efeito da carbonatação no concreto. Possan (2010) descreve que a carbonatação é uma reação química entre o dióxido de carbono que penetra e se dissolve nos poros, com os compostos alcalinos que estão presentes na pasta endurecida do cimento hidratado. Helene (1997) expõe que a espessura de carbonatação desenvolve de forma progressiva, de fora para dentro da estrutura, esse avanço é nomeado como frente a carbonatação. Battagin (2019) complementa, que concreto é o material de construção mais utilizado pelo homem e o segundo elemento mais consumido pela humanidade, perdendo apenas para a água. Devido a esses

fatores e importante estudos voltados frente a carbonatação. Medeiros, Andrade e Helene (2011), afirma que é importante estimar a velocidade de penetração de agentes agressivos através do sistema de poros de concreto.

De acordo com Ribeiro et al. (2012), as reações álcalis-agregado (RAA) são reações químicas que se desenvolvem entre constituintes reativos dos agregados e íons alcalinos e hidroxilos presentes na solução intersticial da pasta de cimento. Nogueira (2010) complementa que a RAA ocorre devido ao processo químico que provém da reação de alguns dos compostos mineralógicos do agregado com hidróxidos alcalinos originários do cimento, água de amassamento e agentes externos, os quais estão dissolvidos na solução dos poros do concreto.

2.8. MINERALOGICAS

O ensaio de análise químico por fluorescência de raios-X, Segundo Ribeiro (2006) evidências da primeira aplicação de raios-X para análise elementar foi descrita por BARCKLA, a partir da observação dos espectros característicos de raios-X. A análise química por fluorescência de raios-X é um método não destrutivo. Melo Júnior (2007) diz que A análise por FRX pode ter fins qualitativos ou quantitativos e se baseia na medição das intensidades dos raios-X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra.

A difração de raios-X é fundamental para a caracterização microestrutural de materiais cristalinos. Oréfice et al. (2006) determina que o DRX é uma poderosa técnica utilizada, para identificar as fases cristalinas presentes nos materiais, pois cada sólido cristalino possui padrão único de difração de raios-X que pode ser utilizado como identificação. E assim fornecer compreensão sobre a natureza e os parâmetros do material.

Segundo Rosário (2013) o princípio de funcionamento do MEV consiste em realizar o varrimento da superfície de uma amostra com um feixe eletrônico finamente focado em sincronismo com um varrimento de um monitor de visualização, modulando o brilho em cada ponto, pela intensidade de um sinal emitido pela amostra. Obtém-se, deste modo, uma correspondência ponto a ponto, entre a imagem e a região observada da amostra, que depende do detector utilizado, da natureza da informação e do tipo de sinal registrado.

3- ARTIGO 1 – CARACTERIZAÇÃO E PRODUÇÃO DOS MATERIAIS DE UMA MISTURA CIMENTÍCIA COM AGREGADO GRAÚDO SINTÉTICO PROVENIENTE DO RESÍDUO DA BAUXITA

RESUMO

Nas empresas de beneficiamento de alumina, há uma profusão com concentração de resíduos que acarretam em impactos ambientais, em especial no estado do Pará, é conhecido comumente como resíduo da bauxita (RB), substância indissolúvel que desponta depois da confluência entre a bauxita e as soluções de hidróxido de sódio, na confecção de alumina pelo processo Bayer. A pesquisa em questão tem como objetivo de caracterizar e analisar o comportamento físico e químico do agregado graúdo sintéticos leve de resíduo da bauxita sinterizados a 1000°C com 85% de matéria-prima, 10% de areia fina e 5% de argila, abordando a viabilidade que o torne próprio ao uso como insumo na indústria da construção civil, utilizando a conformações de agregados sintéticos com diâmetro de 9,5 mm a 19 mm assim como os agregados graúdos usuais seixo rolado e pedra britada. A metodologia empregada para a produção dos agregados consistiu da secagem do resíduo, argila e areia, moagem com passante a 100 mesh, mistura, secagem e britagem, posteriormente sinterizadas por 180 min. Em seguida submetidas a análises por DRX, FRX e estudos físicos. Embora as adversidades na etapa de fabricação os resultados são auspiciosos, fundamentando que em todos os preceitos averiguados os agregados sintéticos leves exibiram uma baixa densidade 1,59 g/cm³ com excelentes resultados, para seus atributos físicos, onde a granulometria se manteve nos parâmetros normativo, no ensaio de (IAP) o agregado classificado como inerte com 3,44 MPa, já no (RAA) o material obteve a classificação grau R1 podendo ser aplicado em alguns elementos estruturais de acordo com NBR 15577 - 1 (ABNT, 2018). Entende-se, portanto, que os agregados sintéticos leves fabricados com uso do resíduo da bauxita retêm efetividade técnica para este epílogo.

Palavras-chave: Agregado Sintético. Resíduo da Bauxita. Caracterização.

ABSTRACT

In alumina processing companies, there is a profusion of concentrated waste that leads to environmental impacts, especially in the state of Pará, it is commonly known as bauxite residue (RB), an indissoluble substance that emerges after the confluence between bauxite and sodium hydroxide solutions, in the manufacture of alumina using the Bayer process. The research in question aims to characterize and analyze the physical and chemical behavior of light synthetic coarse aggregate from bauxite residue sintered at 1000°C with 85% raw material, 10% fine sand 5% clay and, addressing the viability that makes it suitable for use as an input in the construction industry, using synthetic aggregates with a diameter of 9.5 mm to 19 mm as well as the usual coarse aggregates, pebbles and crushed stone. The methodology used to produce the aggregates consisted of drying the residue, clay and sand, grinding with a through mill at 100 mesh, mixing, drying and crushing, subsequently sintered for 180 min. They were then subjected to analysis by XRD, XRF and physical studies. Despite the adversities in the manufacturing stage, the results are auspicious, considering that in all the precepts investigated, the lightweight synthetic aggregates exhibited a low density of 1.59 g/cm³ with excellent results, for their physical attributes, where the granulometry remained within the normative parameters. , in the (IAP) test the aggregate was classified as inert with 3.44 MPa, in the (RAA) the material obtained the grade R1 classification and can be applied to some structural elements in accordance with NBR 15577 - 1 (ABNT, 2018). It is understood, therefore, that lightweight synthetic aggregates manufactured using bauxite residue retain technical effectiveness for this epilogue.

Keyword: Synthetic Aggregate. Bauxite Residue. Description.

3.1. INTRODUÇÃO

O concreto é um composto cimentício extensamente empregado na construção civil, pois detém características que o fazem ser mais exequível em comparação a outros materiais. A indústria concreteira, está situada em uma etapa exórdio de sustentabilidade. O estágio de fabricação do concreto demanda um grande consumo de matérias-primas, como pedra, cascalho, seixo, areia e água, estabelecendo expressivo impacto ambiental.

O setor de agregados para construção apresentou em 2014 uma demanda da ordem de 740 milhões de toneladas de brita e areia, praticamente estável em relação ao ano anterior. E novamente uma queda de cerca de 30% em 2015. (ANEPAC, 2017).

Segundo Pereira (2019), devido ao aumento da complexidade das estruturas que têm sido feitas, em nossa contemporaneidade, deparamo-nos com uma exigência cada vez maior da qualidade do agregado para que este atenda todos os requisitos a fim de que o resultado final de um concreto tenha qualidade e, principalmente, segurança.

Dessa forma, podemos afirmar que houve a necessidade de evoluir o concreto comum feito da mistura de cimento Portland para que certos parâmetros fossem satisfeitos. (PEREIRA, 2019).

Os agregados são definidos como materiais granulares, sem volume definido, de dimensões e propriedades adequadas para uso em obras de engenharia civil. Ocupam de 60 a 80% do volume total do concreto, sendo suas características de grande importância para a qualidade final dos produtos. Têm a função de conferir resistência, durabilidade e trabalhabilidade aos concretos, em suas várias utilizações. (CARLETE, QUEIRÓZ e SILVA, 2017).

Para a obtenção do concreto leve a necessidade do uso de agregados leve, como e o caso do agregado sintético composto do resíduo da bauxita. Segundo Ozguven e Gunduz (2012), agregado leve sintético é definido como um conjunto de grãos naturais processados ou manufaturados, que apresentam diferentes tamanhos e que são interligados por material aglomerante.

De acordo com Carlete, Queiróz e Silva (2017) o cenário do crescente consumo de agregados e do aumento de iniciativas sustentáveis na produção dos recursos minerais não renováveis, novas rotas de aproveitamento econômico de

resíduos em substituição aos agregados minerais naturais vêm sendo desenvolvidas por institutos de pesquisas, associações e empresas.

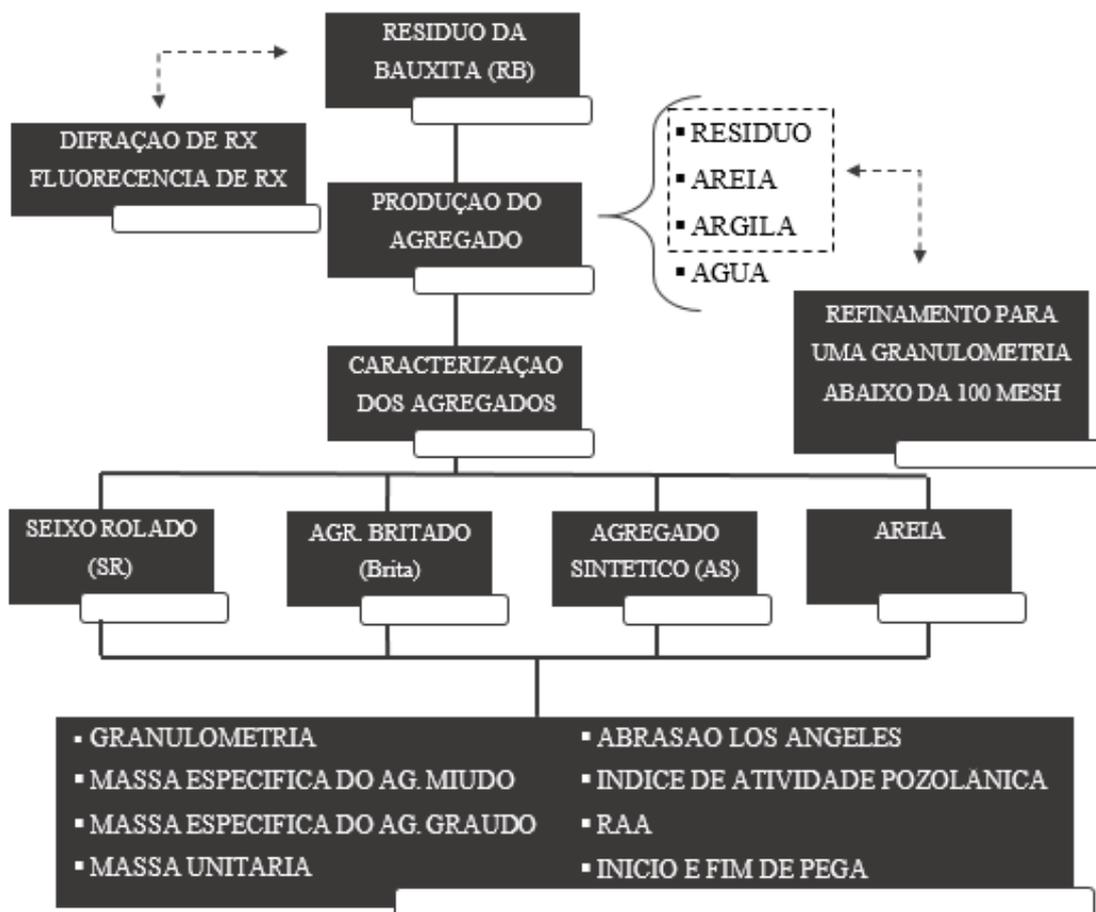
Para o reaproveitamento do resíduo da bauxita, como de qualquer outro tipo de materiais, tem-se a necessidade da determinação de suas propriedades físicas e químicas para avaliação de onde o componente seria melhor aplicado e/ou aproveitado.(COSTA, 2018).

Devido à grande demanda para o discernimento dos elevados volumes de resíduos constituído, a pesquisa em questão propõe a produção e caracterização física e química dos agregados graúdo sintéticos compostos por resíduos da bauxita para incorporação no concreto, com o intuito de substituir os agregados graúdos convencionais, onde a elevada procura continua a ser um problema frequentes para atender a necessidade de altas resistências no concreto.

3.2. METODOLOGIA

A confecção do agregado sintético foi realizada no Laboratório de Materiais de construção civil da Universidade Federal do Pará (Campus Belém - Guamá) para a sequente realização das análises de FRX e DRX, assim como as caracterizações de todos os materiais, que são os agregados graúdos, agregados miúdos e início e fim de pega do cimento, após a preparação instantaneamente, desempenhou os ensaios de granulometria, densidade, massa unitária e abrasão Los Angeles, RAA e Índice de atividade pozolânica como ser visto no fluxograma da figura 9.

Figura 9 Fluxograma da Metodologia.



FONTE: AUTOR, 2023

3.2.1. Materiais para a confecção dos agregados sintéticos.

O Resíduo da Bauxita utilizada na confecção do agregado foi viabilizada por uma indústria produtora de alumínio, localizada no município de Barcarena/PA.

Para a produção do agregado sintético, foram utilizadas as seguintes matérias primas:

- a) Resíduo, obtido por meio do processo de beneficiamento da bauxita, gerada por indústria produtora de alumínio, localizada no município de Barcarena/PA;
- b) A argila, retirada das margens do Rio Guamá;
- c) A areia, extraída da jazida Oriental próxima à Castanhal Km 21;
- d) Água.

A Figura 10 mostra as matérias primas utilizadas no processo de produção do agregado.

Figura 10 Resíduo da bauxita, areia e argila.



FONTE: AUTOR, 2023

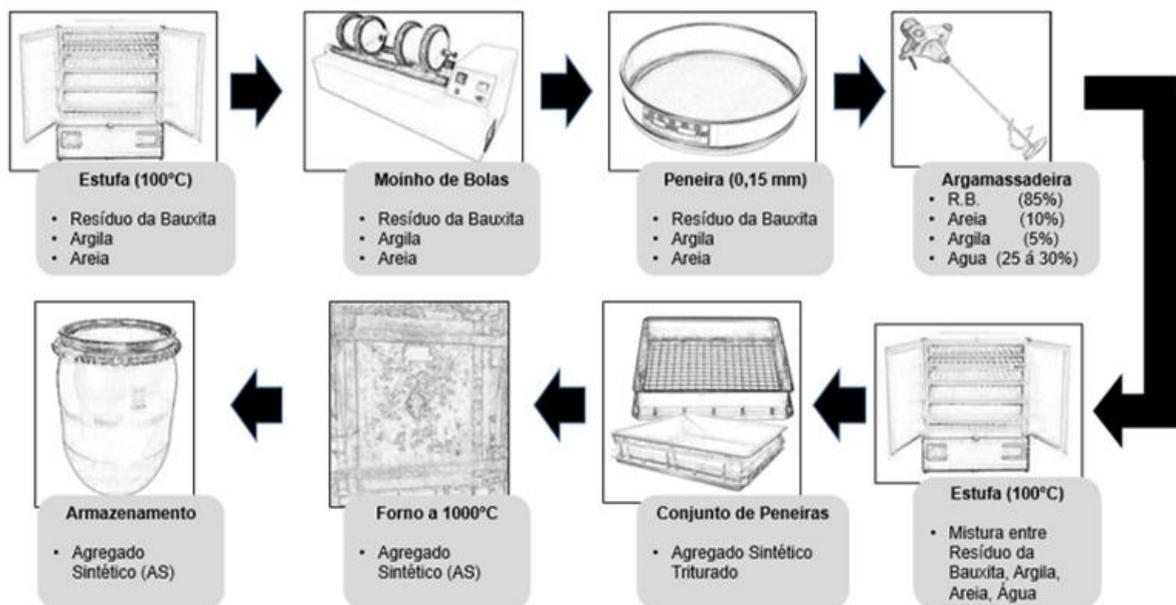
3.2.2. Etapas da Produção do agregado

O processo de fabricação foi baseado em Pereira et al. (2019) e complementada com Rosário (2013) em relação a moagem e tempos de calcinação. A mudança ocorreu somente no processo de trituração onde Pereira et al. (2019) descreve o processo de tritura, posteriormente a calcinação e na pesquisa em questão aconteceu antes da calcinação a 1000°C, onde foi uma adaptação do processo que está em andamento na Universidade Federal do Pará – (Campus Belém - Guamá),

ocorrendo mudanças nos equipamentos utilizados, e no uso da massa cerâmica de formato retangular com peso e diâmetro semelhantes ao antes da secagem em estufa a 100°C.

A produção dos agregados atendeu as etapas demonstradas a seguir no fluxograma da figura 11.

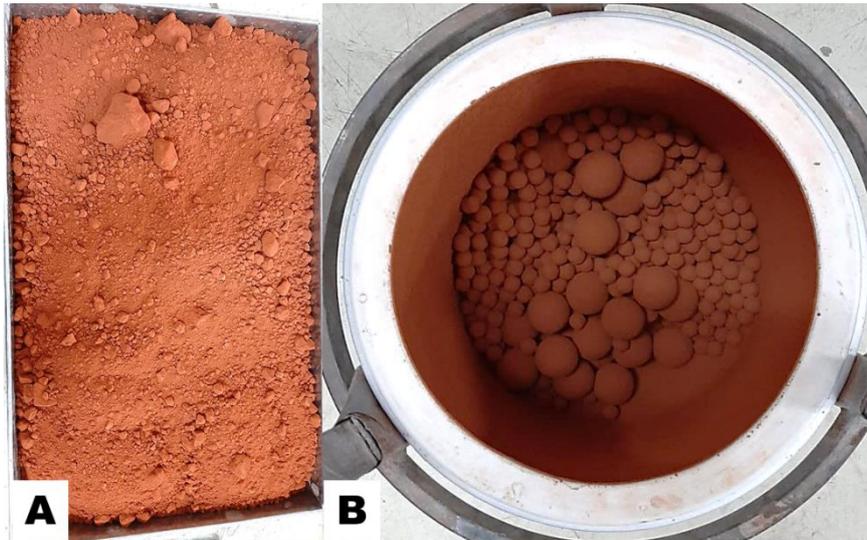
Figura 11 Fluxograma das etapas da produção do agregado sintético (AS).



FONTE: AUTOR, 2023

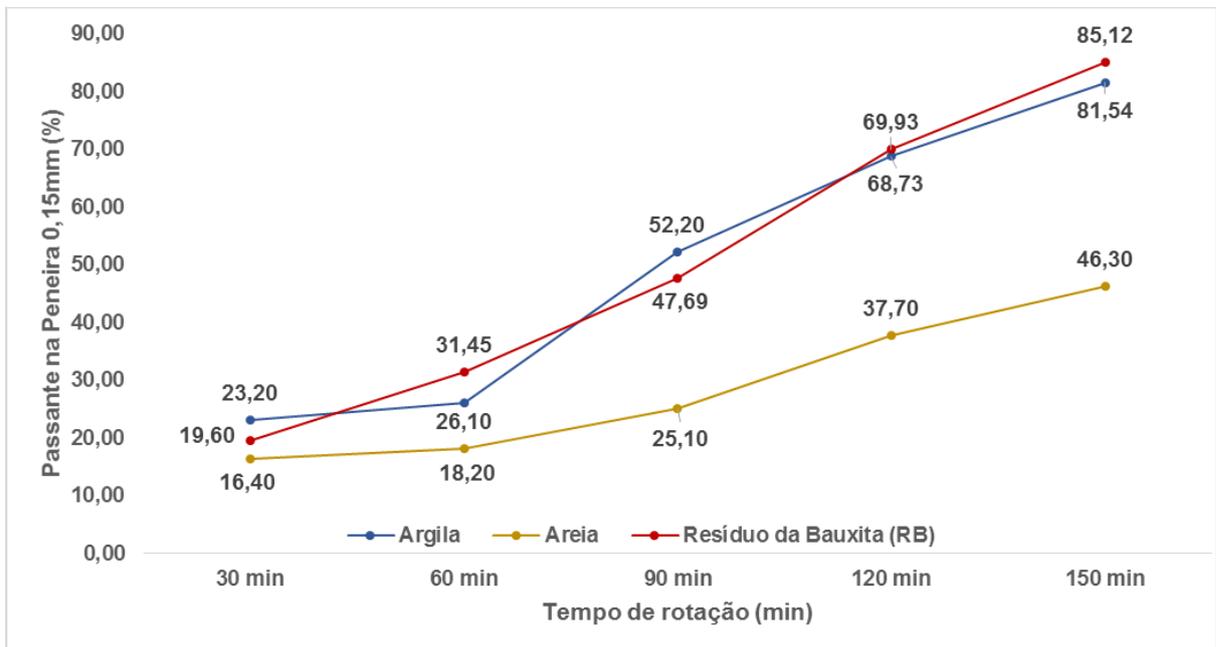
a) O resíduo da bauxita, primeiramente foi destorroado e seco em estufa à 100°C por um período de 24 h e, posteriormente, moída em um moinho de bolas de eixo horizontal, com jarro de porcelana, com diâmetro de 25 cm, movido por um motor de 40 rpm, a carga empregada foi de 5kg de corpos moedores para 1kg de lama vermelha *in natura*, sendo 2/3 de bolas pequenas e 1/3 de bolas grandes, conforme a metodologia aplicada por Pouey (2006) e Mendonça (2018), como material era diferente das autoras citadas anteriormente, foi moído nos tempos de 30, 60, 90, 120, 150 min como pode ser visto na figura 13, para deixar o material com granulometria abaixo da 100 mesh adequada para uso foi utilizado o tempo de 150 min onde obteve 85,12% passante. A Figura 12 mostra imagem (A) o resíduo da bauxita destorroado e à imagem (B), moída em moinho de bolas.

Figura 12 (a) RB destorroada; (b) RB no moinho de bolas.



FONTE: AUTOR, 2023

Figura 13 Porcentagem de material passante na peneira 100 mesh usando o moinho de bolas.



FONTE: AUTOR, 2023

b) A areia utilizada passou por um processo de secagem em estufa a 100°C, por um período de 24 h como pode ser visto na imagem (A) da figura 14 e moída em um moinho de bolas, por aproximadamente 2:30 horas como exibida na figura 13, utilizando-se apenas o material passante em uma peneira com abertura de 100 mesh

observado na imagem (B) da figura 14. Segundo Souza (2010), a areia nesta granulometria, possui morfologia esférica e alta área superficial, estando assim adequada para a conformação dos agregados a serem produzidos. Para Rossi (2009), o uso da areia na produção do agregado é devido às suas várias formas de sílica. O uso amplo da sílica na cerâmica é devido à sua dureza, relativa infusibilidade, baixo custo e capacidade de formar vidros. Para Souza (2010), esta areia propicia melhor desempenho durante o processo de sinterização, minimizando os efeitos da granulometria da sílica nas reações de estado sólido subsequente.

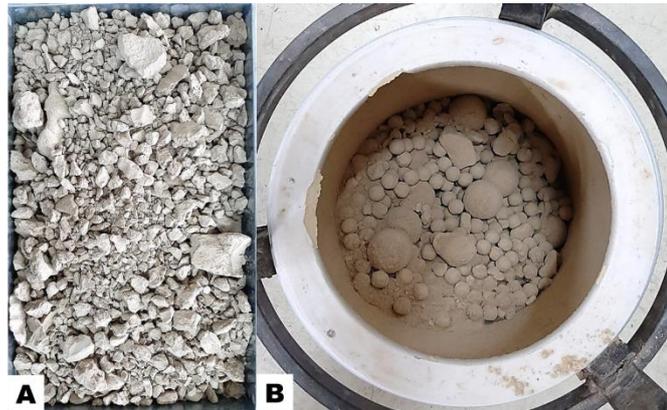
Figura 14 (a) Areia antes do moinho de bola; (b) Areia passante na p. 100 mesh.



FONTE: AUTOR, 2023

c) A argila em questão segundo Racanelli *et al.* (2019) apresentou fases cristalinas predominantes a caulinita, quartzo, mica muscovita e anatásio. Logo a mesma complementa que, a presença de caulinita revelou que as argilas usadas são caulínicas e que podem apresentar boa plasticidade, onde podemos ver a análise química da argila na tabela 7, a argila caulínica foi submetida a um processo de secagem em estufa a 100°C por 24h mostrada na imagem (A) da figura 15 e posteriormente moída em um moinho de bolas ilustrada na imagem (B) na figura 15, por aproximadamente 2:30 horas até sua total pulverização como pode ser visto na figura 13. A argila é utilizada na mistura por aumentar a plasticidade. Segundo Souza (2010) na composição química estão presentes elevados teores de SiO_2 e Al_2O_3 , portanto este material possui características essenciais para ser utilizado neste trabalho.

Figura 15 (a) argila destorroada; (b) argila no moinho de bolas.



FONTE: AUTOR, 2023

Tabela 7 Análise química da argila caulínica

Composições	% em Peso
SiO ₂	66,39
Al ₂ O ₃	18,74
Fe ₂ O ₃	7,75
K ₂ O	4,36
TiO ₂	1,63
CaO	0,97
MnO	0,14
P.F. (Perda ao fogo)	5,38

FONTE: RACANELLI, et al (2019)

d) Após o processo de moagem, secagem e peneiramento, todos os materiais foram pesados com os seguintes percentuais: resíduo da bauxita (85%), areia (10%), argila (5%).

e) A mistura (resíduo da bauxita+areia+argila) foi depositada em uma argamassadeira conforme mostrado no fluxograma da figura 11, e posteriormente foi-se adicionando água paulatinamente na faixa de 25% a 30% em peso. A argamassadeira utilizada neste processo foi responsável pela formação de uma massa cerâmica homogênea como mostrada na figura 16.

Figura 16 Massa cerâmica homogênea



FONTE: AUTOR, 2023

f) A massa cerâmica foi retirada e feita manualmente em um formato retangular com peso 8 kg e diâmetros de 60 x 40 cm aproximados em todas as secagens para ter um controle e submetidos a uma estufa, e lá permaneceram por 24 horas a uma temperatura de 100°C.

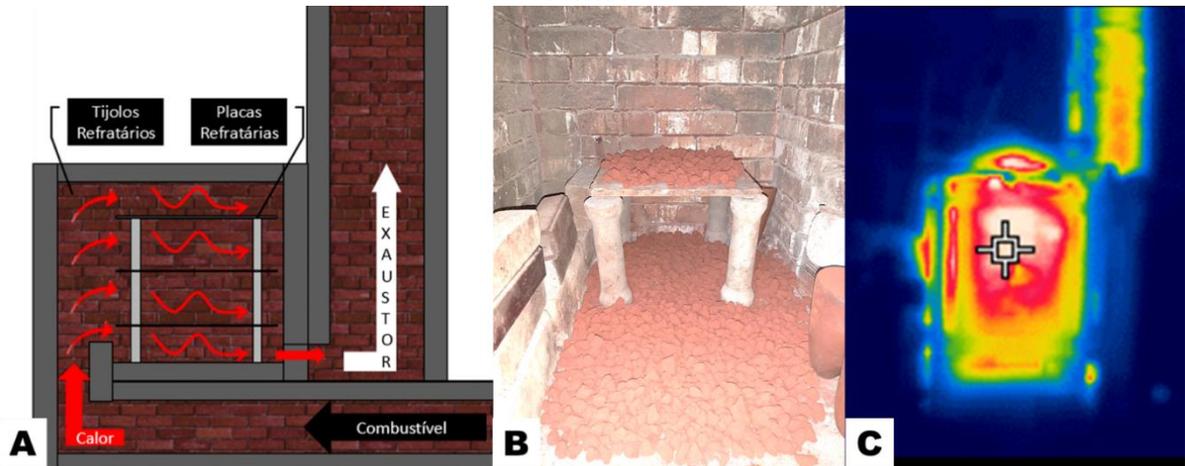
g) A massa cerâmica seca foi retirada da estufa e resfriada, posteriormente triturados manualmente, visando a diminuição do desperdício que um triturador gera, posteriormente foram separados granulometricamente nas sequencias de peneiras 19; 12,5; 9,5; 4,75 mm. Onde o agregado produzido possui uma granulometria bastante heterogênea e possibilita o controle da predominância de diferentes faixas granulométricas.

h) Após o processo de conformação, os agregados foram sinterizados em um forno localizado em Icoaraci, aproximadamente 20 km do Centro de Belém - PA, à temperatura de 1000°C por um período de 180 min. Após este tempo o material foi resfriado lentamente. A Figura 17 mostra o forno utilizado no processo (visão interna) e uma projeção demonstrativa da imagem externa pois a mesma não ter ficado apresentável. Na projeção (A) da figura 17 pode ser visualizado o forno em funcionamento juntamente com isso foi adicionada uma imagem de um Termômetro de Imagem de IV – TG165 visando retratar a baixa fuga de temperatura que chegou a 215,8°C como visto na (C) da figura 17.

Na parte interna do forno utilizado demonstrada na (B) da figura 17, foram adaptados suportes, formados por três placas refratárias apoiadas em pinos refratários, formando espécies de plataformas, aumentando, desse modo, a

capacidade do forno. Onde todos os agregados foram posicionados no modo que todos pudessem receber a temperatura uniforme.

Figura 17 (a) Projeção do forno; (b) Interno do forno; (c) Temperatura externa do forno.



FONTE: AUTOR, 2023

Na Figura18 mostra os agregados secos em estufa a 100°C e após a queima a 1000°C. Onde pode observar que houve uma retração variando de 6,55% a 11,79% em relação ao tamanho dos agregados, onde houve uma coerência se comparado a pesquisa de Souza (2010) que os agregados tiveram uma retração de 4,8 a 15%.

Figura 18 Agregados secos em estufa a 100°C e após a queima a 1000°C



FONTE: AUTOR, 2023

3.2.3. Materiais

- **Agregado Miúdo**

Utilizou-se como agregado miúdo a areia proveniente da jazida Oriental próxima à Castanhal Km 21, a qual passou por ensaios para averiguar sua composição granulométrica, modulo de finura e dimensão máxima de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022), massa específica NBR 16916 (ABNT, 2021), massa unitária NBR 16972 (ABNT, 2021).

- **Agregado natural (Seixo Rolado)**

Foi utilizado como agregado graúdo natural o seixo proveniente da jazida Aurora próxima à Ourem. Foram realizados os ensaios de granulometria, modulo de finura e dimensão máxima de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022), massa específica NBR 16917 (ABNT, 2021), massa unitária NBR 16972 (ABNT, 2021), e Abrasão Los Angeles NBR 16974 (ABNT, 2022).

- **Agregado Britado (brita)**

Foi utilizado como agregado graúdo britado a brita proveniente da jazida Tracuateua próxima à Bragança. Foram realizados os ensaios de granulometria, modulo de finura e dimensão máxima de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022), massa específica NBR 16917 (ABNT, 2021), massa unitária NBR 16972 (ABNT, 2021), e Abrasão Los Angeles NBR 16974 (ABNT, 2022).

- **Agregado sintético (agregado do resíduo da bauxita)**

Foi empregado o agregado fabricado a partir do resíduo de beneficiamento da bauxita, alcançado por meio do processo Bayer, utilizado na forma de substituição do agregado graúdo convencional, fornecida por uma indústria produtora de alumínio, localizada no município de Barcarena/PA. Os agregados foram produzidos no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará.

Foram realizados os ensaios de granulometria, modulo de finura e dimensão máxima de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022), massa específica e absorção de água NBR 16917 (ABNT, 2021), Teor de Pulverulento NBR 16973 (ABNT, 2021), Teor de Umidade Total NBR 9939 (ABNT, 2011), massa unitária NBR 16972 (ABNT, 2021), e Abrasão Los Angeles NBR 16974 (ABNT, 2022).

- **Água**

A água utilizada foram conforme os requisitos da NBR 15900-1: (ABNT 2009), a água de abastecimento público é considerada conveniente para o uso em misturas de concreto, não ocorrendo a necessidade de se fazer nenhum ensaio, a água fornecida será pela rede de abastecimento local (Companhia de Saneamento do Pará – COSANPA).

- **Cimento Portland**

Utilizou-se o cimento Portland CP II-F-32 (Cimento Portland composto com material Carbonático Classe 32), de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018). Optou-se pelo uso deste cimento, pelo fato das características químicas, físicas e mecânicas como pode ser vista na tabela 8 além de já existirem trabalhos semelhantes utilizando esse material mostrando que ele pode ser empregado em estruturas de concreto armado, solocimento, e pavimentos de concreto. Segundo Pereira (2019), este tipo de cimento é constituído de 90% a 94% de clínquer e gesso e de 6% a 10% de material Carbonático ou fíler, caracterizando-o como um composto.

Tabela 8 Características físicas, químicas e mecânicas do cimento CP II F 32.

Características	Determinações	Valores Obtidos	Métodos de Ensaio
Físicas	Blaine (cm ² /g)	≥2000/≤8000	ABNT NBR 16372:2015
	Tempo de início de pega (h:min)	≥60	ABNT NBR 16697:2018
	Tempo de fim de pega (h:min)	≤600	
	Finura na peneira # 200 (%)	≤12,0	
	Expansibilidade a frio (mm)	≤5,0	
	Expansibilidade a quente (mm)	≤5,0	
	Consistência normal (%)	-	ABNT NBR 16606:2018
Mecânicas	Resistência à compressão 1 dia (MPa)	-	ABNT NBR 16697:2018
	Resistência à compressão 3 dias (MPa)	≥10,0	
	Resistência à compressão 7 dias (MPa)	≥20,0	
	Resistência à compressão 28 dias (MPa)	≥32,0	
Químicas	Perda ao fogo (%)	≤12,5	ABNT NBR 16697:2018
	Resíduo insolúvel (%)	≤7,5	
	Trióxido de enxofre – SO ₃ (%)	≤4,5	
	Óxido de cálcio livre – CaO Livre (%)	≤0,75	ABNT NBR NM 13:2012
	Óxido de magnésio – MgO (%)	≤0,9	ABNT NBR NM 11-2:2012
	Óxido de alumínio – Al ₂ O ₃ (%)	≤0,77	
	Óxido de silício – SiO ₂ (%)	≤0,77	
	Óxido de ferro – Fe ₂ O ₃ (%)	≤0,42	
Óxido de cálcio – CaO (%)	≤1,5		

FONTE: AUTOR, 2023

- **Aditivo**

O aditivo líquido usado foi o retardador de pega normal e redutor de água, usado como plastificante para concreto. Onde se encaixa como redutor de água tipo 2/retardador RA2-R mostrado no tópico 3.29 da NBR 11768-1 (ABNT, 2019), ainda é explicado na norma que a redução de água é o fator principal do aditivo tendo como função secundária a redução de pega.

O aditivo em questão foi utilizado de acordo com as orientações do fabricante quanto a forma e momento de adição na mistura; teores utilizados e tempo de mistura,

onde as propriedades características determinada pelo fabricante condizem com a norma como mostra na tabela 9. A NBR 11768-1 (ABNT, 2019) ainda define o aditivo para concreto como produto adicionado e misturado no concreto, em quantidade geralmente não superior a 5% da massa de ligante total contida no concreto, com o objetivo de modificar suas propriedades no estado fresco e/ou no estado endurecido.

Tabela 9 Propriedade e característica do aditivo

Propriedades	Fabricante	Método de ensaio	Requisitos
Homogeneidade	Sem Sedimentação	Exame visual	Homogêneo no momento de sua utilização, não apresentando separação ou sedimentação
Cor	Marrom Escuro	Exame visual	Uniforme e similar à descrição informada pelo fabricante
Massa específica (somente para líquidos)	1,06 ± 0,02 kg/ L	ABNT NBR 11768-3:2019	Valor declarado pelo fabricante com tolerância de ± 0.02 g/cm ³
Teor de sólidos	-		Valor declarado pelo fabricante com tolerância de ± 2%
pH	6,0 ± 1,0		Valor declarado pelo fabricante com tolerância de ± 1
Cloretos solúveis em água (Cl)	-		Menor ou igual ao valor declarado pelo fabricante

FONTE: SIKA, (2020) adaptada da NBR 11768-1 (ABNT, 2019)

3.2.4. Métodos

Os processos de análise das particularidades dos agregados miúdos e graúdos, como a granulometria, massa específica, massa unitária e abrasão de Los Angeles de acordo com as recomendações das normas, estão resumidamente demonstradas na Tabela 10.

Tabela 10 Procedimentos experimentais para análise dos agregados.

Item	Norma
Granulometria	NBR 17054: ABNT, 2022. Agregados — Determinação da composição granulométrica — Método de ensaio
Massa esp. do ag. Miúdo	NBR 16916: ABNT, 2021. Agregados Miúdos — Determinação da densidade e da absorção de água
Massa esp. do ag. Graúdo	NBR 16917: ABNT, 2021. Agregados Miúdos — Determinação da densidade e da absorção de água
Massa Unitária	NBR 16972: ABNT, 2021. Agregados — Determinação da massa unitária e do índice de vazios
Início e Fim de pega	NBR 16607: ABNT, 2018. Cimento Portland determinação dos tempos de pega.
Abrasão Los Angeles	NBR 16974: ABNT, 2022. Agregados — Ensaio de resistência ao impacto e à abrasão Los Angeles
Índice de atividade Pozolânica	NBR 5751: ABNT, 2015. Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias.
RAA	NBR 15577-4: ABNT, 2018. Agregados – Reatividade álcali-agregado Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.

FONTE: AUTOR, 2023

- **Espectrometria por fluorescência de raios-X (FRX)**

Para a execução deste trabalho, a análise de Fluorescência de Raios-X foi realizada no Instituto SENAI, polo Belém-Pa. Foram realizadas análises químicas por Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (EDXRF), em equipamento de bancada, modelo Epsilon 3XLE, tubo de Raios-X cerâmico de Ródio e nível de potência máxima de 15 W, da marca PANalytical. Os dados foram adquiridos através do software Epsilon 3 e a interpretação foi realizada com a aplicação Omnian, ambos da PANalytical.

- **Difração de raios-X (DRX)**

As análises de difração de raios X foram realizadas no Laboratório de Difração de raios X do Programa de Pós - Graduação em Física (PPGF) da UFPA. Para a análise de DRX utilizou-se o difratômetro com geometria Bragg-Brentano e detector LynxEye, modelo D8 ADVANCE da BRUKER, tubo de raios X de Cu. Foram utilizadas as seguintes condições: faixa angular de varredura entre 5 e 90° ($^{\circ}2\theta$), voltagem do tubo 40 kV e corrente do tubo 40 mA; tamanho do passo angular de 0,02 ° ($^{\circ}2\theta$), e tempo por passo de 0,1 s, fenda divergente de 0,6mm.

- **Início e Final de Pega**

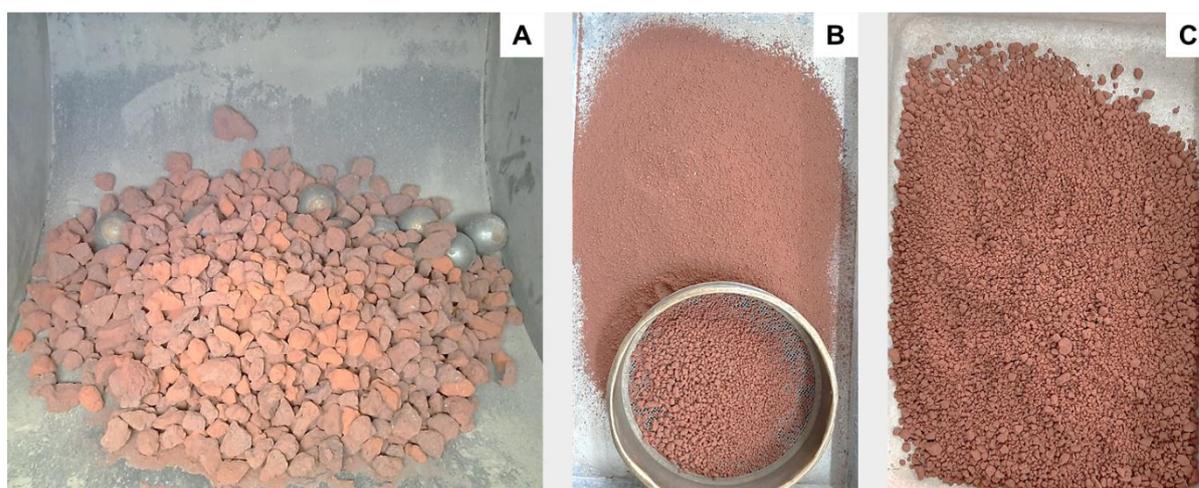
A análise do início e final de pega foi averiguada na pasta cimentícia, teve como parâmetro as normas brasileiras NBR 16607 (ABNT, 2018) e NBR 16606 (ABNT, 2018) para o cimento Portland CP II-F-32, tendo como objeto verificar o intervalo de tempo decorrido desde a adição de água + aditivo ao cimento até o momento em que a agulha de Vicat correspondente penetra 0,5 mm na pasta dando o fim de pega.

- **Abrasão “Los Angeles”**

O ensaio de Abrasão “Los Angeles” foi desempenhado a fim de quantificar a resistência do agregado sintético ao impacto e ao desgaste seguindo os parâmetros

da NBR 16974 (ABNT, 2022). Nesse ensaio uma amostra de agregado de cerca de 5.000g é levada a 500 ou 1.000 rotações no interior do tambor da máquina. Um número diversificado de esferas de aço, conforme a granulometria da amostra, é acrescentado no tambor como pode ser vista na imagem (A) da figura 19, induzindo impactos nas partículas ao longo das suas rotações. Os efeitos são analisados pela redução de massa dos agregados retidos na peneira com abertura de malha 1,7mm em relação à massa inicial da amostra indicada, assim como pode observar na imagem (B e C) da figura 19, conforme a NBR 16974 (ABNT, 2022).

Figura 19 (a) Agregado sintético mais as esferas dentro do tambor; (b) Material passante da peneira 1,7mm; (c) Material retido na peneira 1,7mm.



FONTE: AUTOR, 2023

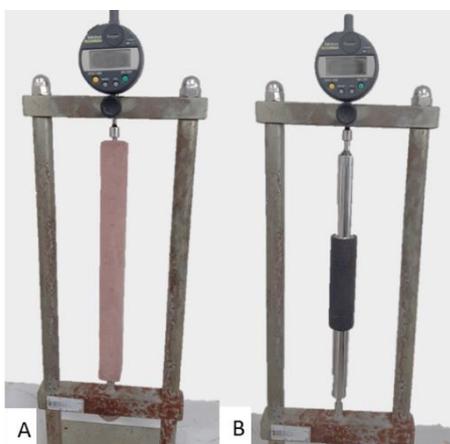
- **Reação Álcali Agregado (RAA)**

Segundo a NBR 15577 - 1 (ABNT, 2018) álcali-agregado (RAA) a reação química que ocorre em argamassas ou concretos envolvendo os íons hidroxila (OH^-) associados com os componentes alcalinos sódio e potássio, provenientes do cimento Portland ou outras fontes, com certas fases minerais que podem estar presentes em agregados graúdos ou miúdos, que, sob certas condições, pode causar expansão deletéria do concreto ou argamassa.

A NBR 15577-4 (ABNT, 2018) baseia-se na medida das expansões de barras de argamassas, onde após 24h a moldagem estes corpos de prova foram desmoldados e aferidos, a seguir, colocou-se os prismas em recipiente com água destilada em estufa a 80 ± 2 °C, a qual permaneceram por mais 24 h até nova

verificação da medida do comprimento, sequentemente foi adicionada a um recipiente com banho termo regulador em solução de NaOH 1 N à 80 ± 2 °C e realizou-se medidas do comprimento a cada 1, 3, 7, 16, 23, 27 e 30 dias, a norma estabelece leituras do comprimento em 1, 16 e 30 dias, com 3 amostras obtendo a leitura inicial de 7,623 mm 4,916 mm e 6,351 mm, como pode ser visto na imagem (A) da figura 20, o comparador de comprimento, amostra e a barra padrão imagem (B) da figura 20 como determina a NBR 15577 - 4 (ABNT, 2018).

Figura 20 (a) Comparador de comprimento mais a amostra;
(b) Comparador de comprimento mais a barra padrão



FONTE: AUTOR, 2023

De acordo com Ribeiro et al. (2012), que considera as reações álcalis-agregado (RAA) são reações químicas que se desenvolvem entre constituintes reativos dos agregados e íons alcalinos e hidroxilos presentes na solução intersticial da pasta de cimento, podendo ter um efeito altamente prejudicial. Existem três tipos distintos de RAA: reações álcalis-sílica (RAS), reações álcalis-silicato e reações álcalis-carbonato, sendo que este trabalho se classificou como RAS.

Para ocorrer a RAA, o agregado deve conter formas de sílica capazes de reagir quimicamente com os íons hidroxila e os álcalis presentes na solução dos poros, tais como: vidro vulcânico, sílica amorfa, sílica microcristalina, tridimita, cristobalita, calcedônia, opala, quartzo e feldspato deformados (RIBEIRO et al., 2012).

Utilizou-se areia graduada de baixa reatividade, com objetivo de tornar a análise mais efetiva, empregou cimento comercial Portland CII-F 32, o resíduo da bauxita foi calcinada e posteriormente desaglomerada para que se tivesse à disposição um material segundo a NBR 15577-2 (ABNT, 2018) e argila caulinita, onde

Oliveira (2017) descreve, normalmente com baixa plasticidade e apresenta acessório goethita que fornece os óxidos de ferro, além de a relação entre valores clássicos para a caulinita de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3:1,18$, onde Boussen (2016) indica que quanto maior este coeficiente, maior é a porcentagem de quartzo livre e minerais presentes nas argila, Celik (2010), apresenta ainda o acessório feldspato na forma de muscovita, que fornecem os óxidos Na_2O e K_2O , além do quartzo, que juntamente com os demais óxidos, formam fase vítrea que preencherá os poros, conferindo a densificação da massa após queima. Andriolo (1997) e Munhoz (2008), classificam, os fatores condicionantes da reação álcalis-agregado associados à velocidade da reação como temperatura, sendo maior a expansão quanto maior a calcinação; umidade elevada e granulometria, sendo maior a força de expansão à medida que diminui a superfície específica do material, Degen et al. (2019) contribui descrevendo que, o tipo e as condições do tratamento aplicado ao resíduo exercem forte influência nas fases minerais, sendo a influência da calcinação o principal tema de pesquisa uma vez que não existe consenso na literatura acerca da temperatura ótima para calcinação nem sobre os potenciais benefícios desse tratamento nas propriedades mecânicas de materiais cimentício.

O resíduo da bauxita apresentou Na_2O (10,38%) K_2O (0,09%), Mehta e Monteiro (1994) diz, uma concentração de Na_2O superior a 0,6% ou entre 3 e 5 kg/m³ é suficiente para uma RAA acentuada, segundo Rivard et al. (2007), Ribeiro et al. (2012) acrescenta que os álcalis presentes no cimento Portland são expressos na forma de óxido de potássio (K_2O) e óxido de sódio (Na_2O), os autores Munhoz (2008) e Mehta e Monteiro (1994) complementa, a quantidade de álcalis disponíveis no cimento Portland é expressa em equivalente alcalino em Na_2O ($\% \text{Na}_2\text{O} + 0,658\% \text{K}_2\text{O}$) por apresentar melhor correlação com a expansão devida à reação álcali agregado, a uma reação química entre certas formas de sílica reativa, possuindo estrutura mais ou menos desordenada e, por isso, instável num meio de elevado pH, e os íons alcalinos (Na^+ e K^+) e hidroxilos (OH^-) presentes na solução intersticial da pasta de cimento, Reis e Silva (1997) acrescenta, assim sendo, devido à elevada concentração de íons Na^+ e OH^- no resíduo de bauxita, provenientes do uso da soda caustica no processo Bayer, as reações álcalis-agregado são foco de preocupação quanto à utilização deste material de elevado pH em concretos e argamassas.

- **Índice de Atividade Pozolânica (IAP) – Hidróxido de Cálcio**

Segundo Souza (2010), pelo fato do resíduo da bauxita não ser quimicamente inerte ($\text{pH} > 12$), onde necessita de uma transformação química para estabilizar os compostos. Após a fabricação dos agregados sinterizados a 1000°C , houve a necessidade da realização do ensaio de Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal da NBR 5751 (ABNT, 2015).

3.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.3.1. Agregado Miúdo

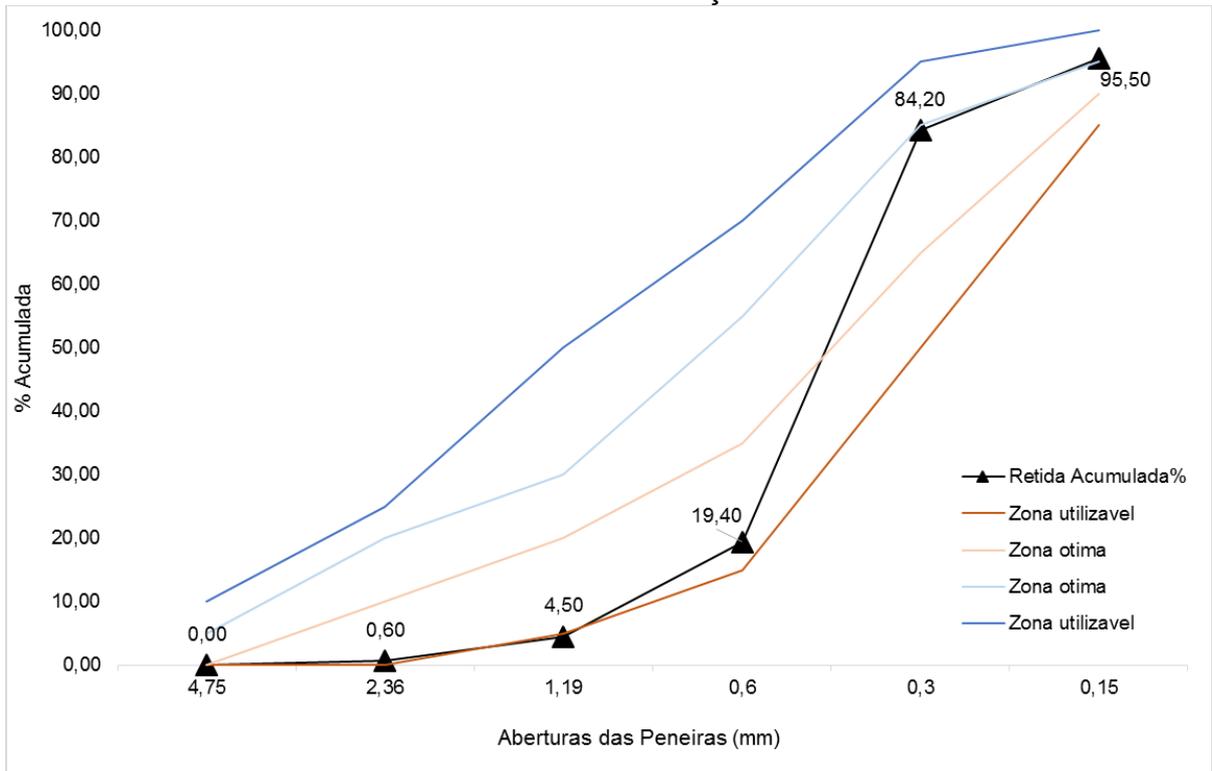
De acordo com os resultados obtidos, verifica-se que o agregado miúdo em questão possui módulo de finura igual a 2,04 já a dimensão máxima característica foi de 1,18 mm como consta na tabela 11. No gráfico da figura 21 podemos ver que o agregado miúdo (Fino) segundo a NBR 17054 (ABNT, 2022) se manteve entre a zona ótima e a zona utilizável, de acordo com os parâmetros exigidos na tabela 2 da NBR 7211 (ABNT, 2022), indicando que é um agregado miúdo adequado na utilização da produção de concreto.

Tabela 11 Características do Agregado Miúdo (Areia) obtido em Laboratório

Peneira	Massa Retida (g)	Retida na Peneira%	Retida Acumulada%	Método de Ensaio
4,75	0	0,00	0,00	ABNT NBR 17054:2022
2,36	6	0,60	0,60	
1,19	39	3,90	4,50	
0,6	149	14,90	19,40	
0,3	648	64,80	84,20	
0,15	113	11,30	95,50	
Fundo	45	4,50	100,00	
Total	1000	100	100,00	
Massa Específica	2,61 g/cm ³			ABNT NBR 16916:2021
Massa Unitária	1,69 g/cm ³			ABNT NBR 16972:2021
Módulo de Finura	2,04			ABNT NBR 17054:2022
Dimensão Máxima	1,18mm			

FONTE: AUTOR, 2023

Figura 21 Curva Granulométrica do Retido Acumulado% do Agregado Miúdo com os limites da distribuição.



FONTE: AUTOR, 2023 adaptada NBR 7211 (ABNT, 2022)

3.3.2. Agregado Graúdo

a) Agregado natural (Seixo Rolado).

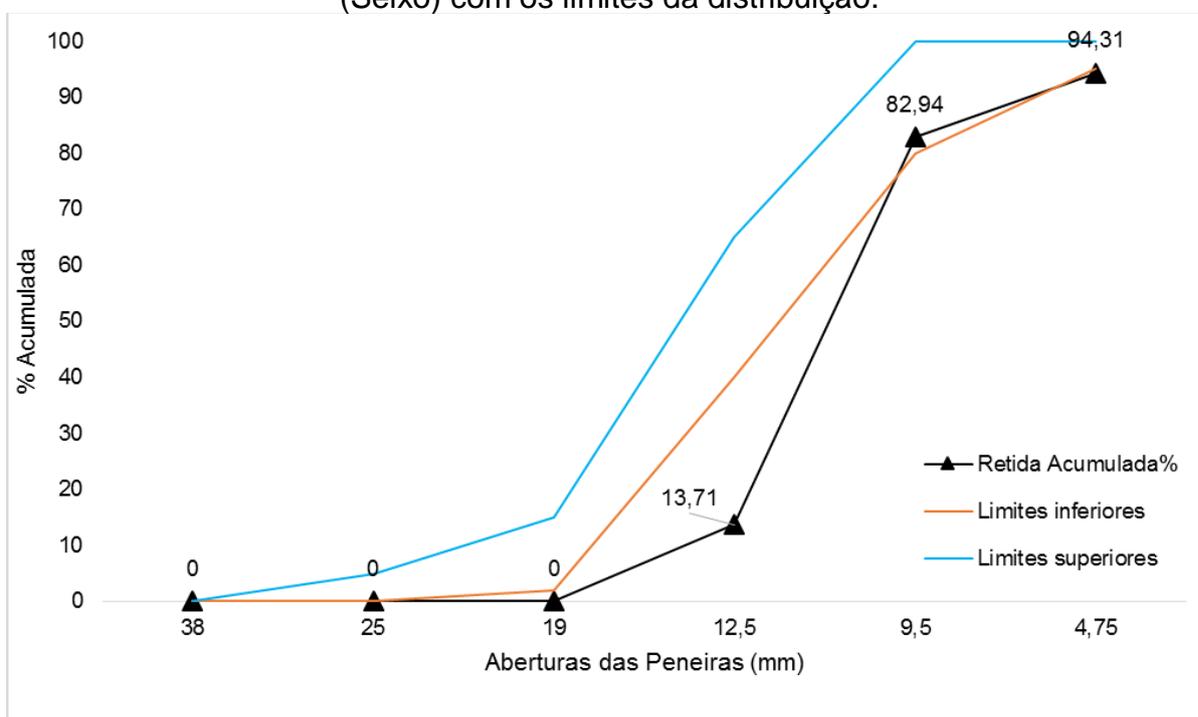
Como pode ser observado na tabela 12 o módulo de finura do seixo rolado é igual a 1,91 e a dimensão máxima característica desse agregado é igual a 12,5 mm. No gráfico da figura 22 podemos ver que o agregado graúdo se manteve em sua maioria entre a zona ótima e a zona utilizável, de acordo com os parâmetros exigidos na tabela 6 da NBR 7211 (ABNT, 2022).

Tabela 12 Características do Agregado Graúdo (Seixo Rolado) obtido em Laboratório

Peneira	Massa Retida (kg)	Retida na Peneira%	Retida Acumulada%	Método de Ensaio
38	0	0	0	ABNT NBR 17054:2022
25	0	0	0	
19	0	0	0	
12,5	0,41	13,71	13,71	
9,5	2,07	69,23	82,94	
4,75	0,34	11,37	94,31	
Fundo	0,17	5,69	99,99	
Total	2,99	100	100,00	
Massa Específica	2,64 g/cm ³			ABNT NBR 16917:2021
Massa Unitária	1,74 g/cm ³			ABNT NBR 16972:2021
Módulo de Finura	1,91			ABNT NBR 17054:2022
Dimensão Máxima	12,5 mm			
Abrasão Los Angeles	48,40%			ABNT NBR 16974:2022

FONTE: AUTOR, 2023

Figura 22 Curva Granulométrica do Retido Acumulado% do Agregado Graúdo (Seixo) com os limites da distribuição.



FONTE: AUTOR, 2023 adaptada NBR 7211 (ABNT, 2022)

b) Agregado Britado (brita).

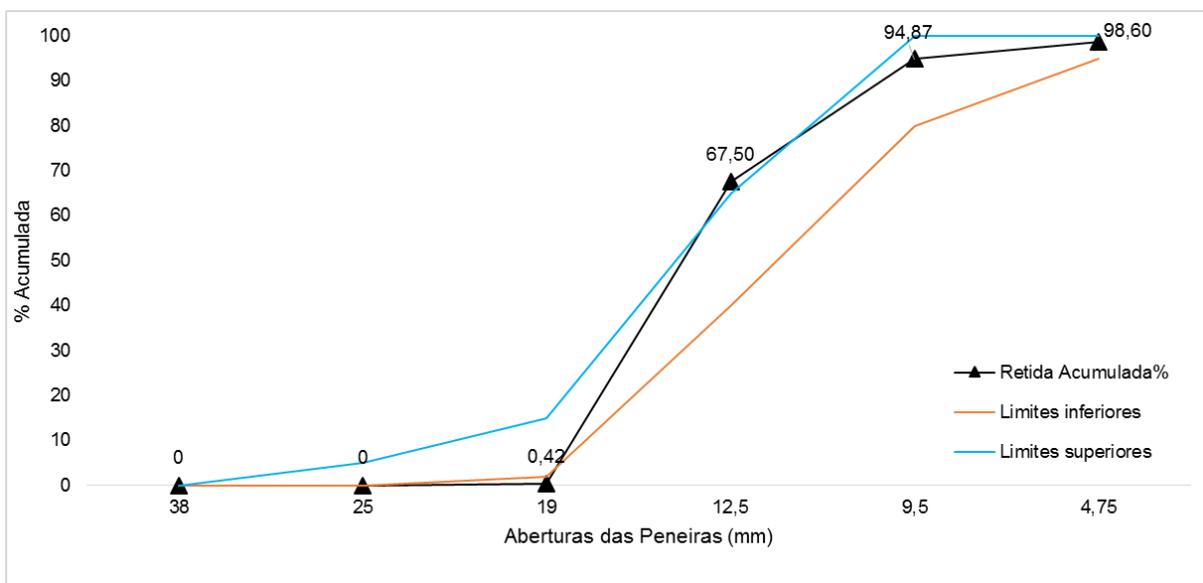
De acordo com a tabela 13 é possível observar que o módulo de finura da brita é igual a 2,61 e a dimensão máxima característica desse agregado é igual a 19 mm. No gráfico da figura 23 podemos ver que o agregado graúdo segundo a NBR 17054 (ABNT, 2022) se manteve entre a zona ótima e a zona utilizável, de acordo com os parâmetros exigidos na tabela 6 da NBR 7211 (ABNT, 2022).

Tabela 13 Características do Agregado Graúdo (Brita) obtido em Laboratório

Peneira	Massa Retida (Kg)	Retida na Peneira%	Retida Acumulada%	Método de Ensaio
38	0	0	0	ABNT NBR 17054:2022
25	0	0	0	
19	0,022	0,42	0,42	
12,5	3,56	67,09	67,50	
9,5	1,45	27,36	94,87	
4,75	0,20	3,74	98,60	
Fundo	0,074	1,40	99,99	
Total	5,299	100	100,00	
Massa Específica		2,68 g/cm ³		ABNT NBR 16917:2021
Massa Unitária		1,39 g/cm ³		ABNT NBR 16972:2021
Módulo de Finura		2,61		ABNT NBR 17054:2022
Dimensão Máxima		19 mm		
Abrasão Los Angeles		34,00%		ABNT NBR 16974:2022

FONTES: AUTOR, 2023

Figura 23 Curva Granulométrica do Retido Acumulado% do Agregado Graúdo (Brita) com os limites da distribuição.



FONTE: AUTOR, 2023 adaptada NBR 7211 (ABNT, 2022)

c) Agregado sintético (agregado do resíduo da bauxita).

Na tabela 14 o módulo de finura do agregado sintético é igual a 2,52 e a dimensão máxima característica desse agregado é igual a 19 mm. No gráfico da figura 24 podemos ver que o agregado graúdo segundo a NBR 17054 (ABNT, 2022), se manteve entre a zona ótima e a zona utilizável, de acordo com os parâmetros exigidos na tabela 6 da NBR 7211 (ABNT, 2022).

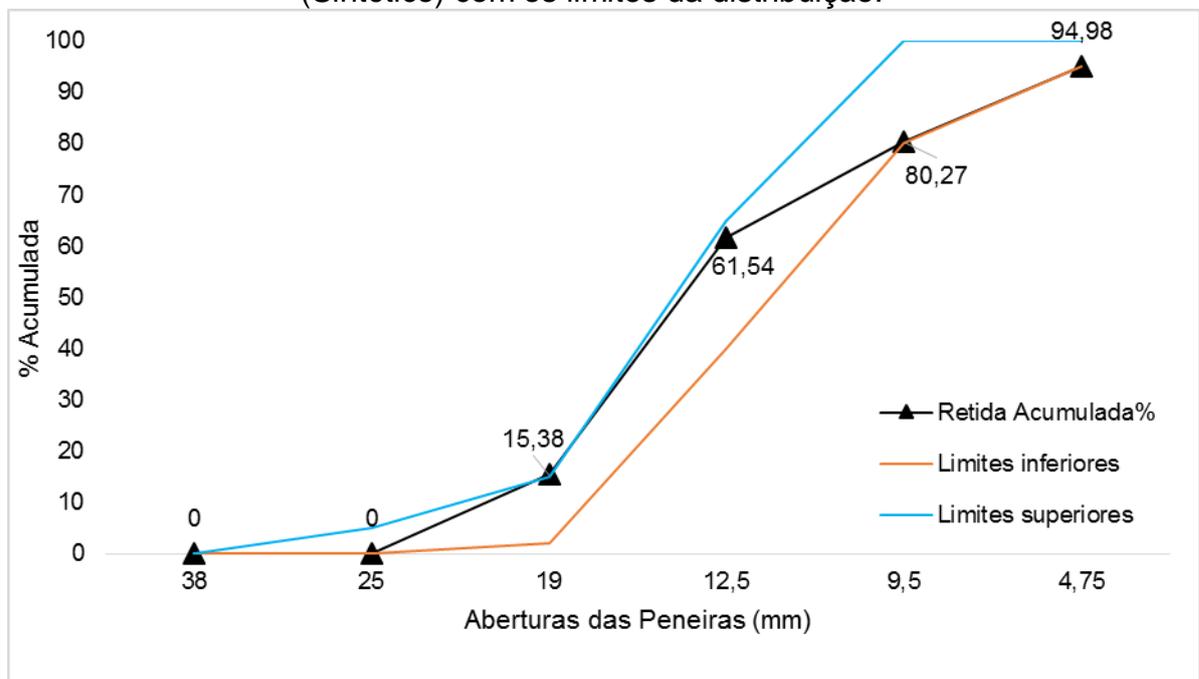
Para o ensaio de teor de umidade total a NBR 9939 (ABNT, 2011) descreve como o quociente percentual entre a massa total de água do agregado e a sua massa seca. Na massa total de água estão incluídas: as massas da água da superfície, a dos poros permeáveis e a dos demais vazios do agregado. A norma define a massa mínima da amostra para ensaio, para os agregados sintéticos de $D_{máx}$ de 19mm e 3000g, onde o ensaio consiste em inserir na estufa a 105°C até se obter a massa constante, que no caso da amostra em questão se obteve o teor de umidade total de 0,55% como é descrito na tabela 14.

Tabela 14 Características do Agregado Graúdo (Sintético) obtido em Laboratório

Peneira	Massa Retida (kg)	Retida na Peneira%	Retida Acumulada%	Método de Ensaio
38	0	0	0	ABNT NBR 17054:2022
25	0	0	0	
19	0,46	15,38	15,38	
12,5	1,38	46,15	61,54	
9,5	0,56	18,73	80,27	
4,75	0,44	14,72	94,98	
Fundo	0,15	5,02	99,99	
Total	2,99	100,00	100,00	
Massa Especifica	1,59 g/cm ³			ABNT NBR 16917:2021
Absorção de Água	21%			
Teor de Pulverulento	0,8%			ABNT NBR 16973:2021
Teor de Umidade Total	0,55%			ABNT NBR 9939:2011
Massa Unitária	0,99 g/cm ³			ABNT NBR 16972:2021
Módulo de Finura	2,52			ABNT NBR 17054:2022
Dimensão Máxima	19 mm			
Abrasão Los Angeles	64,60%			ABNT NBR 16974:2022

FONTE: AUTOR, 2023

Figura 24 Curva Granulométrica do Retido Acumulado% do Agregado Graúdo (Sintético) com os limites da distribuição.



FONTE: AUTOR, 2023 adaptada NBR 7211 (ABNT, 2022)

Na figura 25 podemos ver a distribuição dos grãos obtido através da series normal de peneiramento segundo a tabela 1 da NBR 7211 (ABNT, 2022).

Figura 25 Distribuição dos grãos do Agregado Graúdo (Sintético).



FONTE: AUTOR, 2023

Conforme Arndit, Souza e Bianchini (2007), a forma dos grãos do agregado graúdo influencia algumas características no concreto no estado fresco, principalmente no que se refere à plasticidade, trabalhabilidade, absorção de água e resistência ao cisalhamento.

O processo de fabricação dos agregados artificiais, influencia significativamente na forma e textura das partículas dos mesmos. Onde Rosário (2013) complementa que processo de sinterização, por exemplo, produz agregados que possuem alta rugosidade, formas angulares e superfície porosa.

3.3.3. Início e Fim de Pega

Segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018), o tempo de início de pega de ≥ 60 minutos pode ser definido como o interstício entre o instante em que há a interação do cimento com a água e o momento em que a mistura começa a perder a moldabilidade, enquanto o final de pega está estipulado em 600 minutos.

Os dados verificados no gráfico da figura 26 demonstram que o processo de hidratação da argamassa deu início aos 2:33hr e finalizando aos 4:23, permanecendo dentro dos parâmetros da NBR 16697 (ABNT, 2018) e o consumo de água se manteve inalterada.

Figura 26 Início e Fim de pega do cimento Portland CP II-F-32

Cimento	Tempo de Início de Pega (h:min)	Tempo de Fim de Pega (h:min)
CPII-F-32	2:33	4:23

FONTE: AUTOR, 2023

3.3.4. Espectrometria por fluorescência de raios-X (FRX)

A estruturação química do resíduo “*in natura*” presente na Tabela 15 mostra um alto proporção de Fe_2O_3 , Al_2O_3 e SiO_2 , e como visto em literatura exibe uma elevada porcentagem de Na_2O , que segundo Laureano (2014) prejudica a argamassa. De acordo com Da Silva (2018) a presença de Na_2O deve-se a adição do hidróxido de sódio durante a etapa de digestão do processo Bayer. A composição exibida é comumente referida por diversos autores como (SOUZA, 2010; ROSARIO, 2013; LAUREANO, 2014 e DA SILVA, 2018).

Tabela 15 Fluorescência de Raios-X da RB *in natura*.

Composições	Concentração (%)
Fe_2O_3	34,47
Al_2O_3	21,95
SiO_2	17,82
Na_2O	10,38
TiO_2	6,76
CaO	1,91
MnO	0,11
K_2O	0,09

FONTE: AUTOR, 2023

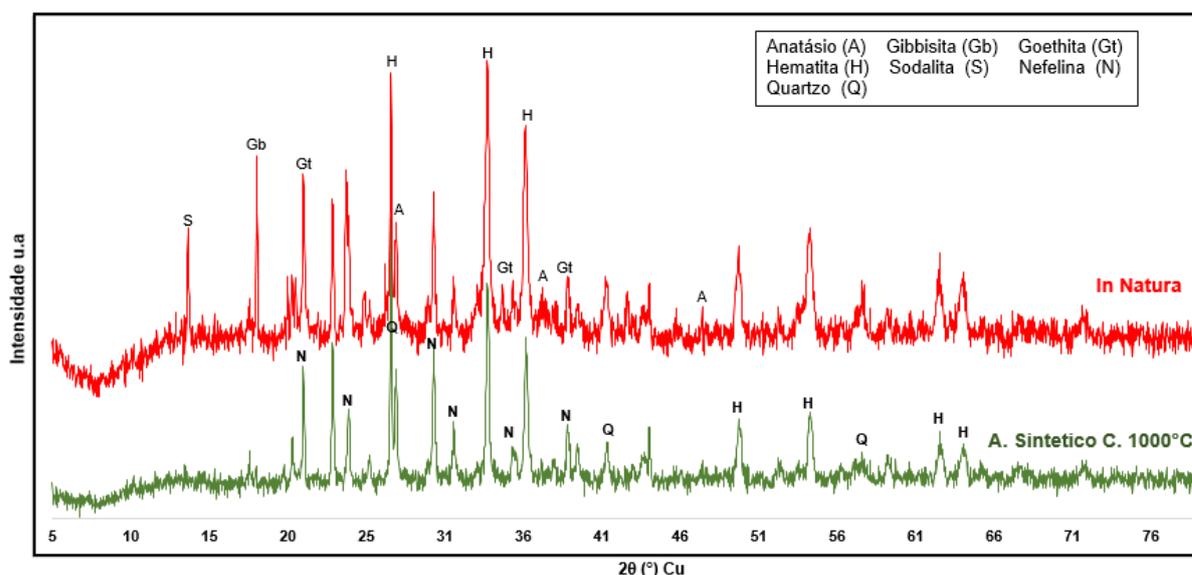
3.3.5. Difração de raios-X (DRX)

O difratograma de Raios-X, é mostrado na Figura 27. De acordo com a investigação mineralógica alcançada, o resíduo *in natura* compõe-se de picos pertencente à gibbisita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), anatásio (TiO_2), hematita (Fe_2O_3), quartzo (SiO_2) e sodalita ($\text{Na}_4\text{Al}_3(\text{SiO}_4)_3\text{Cl}$). A classificação dos minerais

segundo Souza (2010) ocorre em 2 categorias, primeiro aqueles provenientes da própria bauxita, tais como a gibbisita, hematita, quartzo, goethita, anatásio, e numa segunda categoria aqueles formados durante o processo Bayer, como a sodalita.

No momento em que o resíduo da bauxita é calcinado à 1000°C nota-se a dissolução da sodalita, do anatásio e da goethita, e o aparecimento da nefelina (NaAlSiO₄), ademais a hematita se manteve sem alguma alteração.

Figura 27 Difratomogramas do resíduo da bauxita in natura e agregado sintético calcinado a 1000°C



FONTE: AUTOR, 2023

3.3.6. Abrasão “Los Angeles”

Destaca-se que a perda por abrasão para o material sintético em análise foi de 64,60%, onde mostrou que não está de acordo com as premissas da NBR 7211 (ABNT, 2022), a qual declara que o índice de desgaste por abrasão “Los Angeles” precisará ser abaixo de 50% em massa do material como pode ser visto na tabela 16.

Segundo Marques (2001) agregados de algumas regiões do país, como por exemplo a região do município do Rio de Janeiro, apresentam o valor da abrasão Los Angeles muito acima de 55%, em alguns casos, chegando a 65%. Na tabela 16 podemos ver os resultados do agregado sintético, seixo rolado e brita, onde o seixo rolado e a brita atenderam os requisitos da norma NBR 7211 (ABNT, 2022).

Tabela 16 Resultado do ensaio de Abrasão “Los Angeles”.

Características	Nº de Esferas	Abrasão “Los Angeles” (%)
Agregado sintético	12	64,60
Seixo rolado	12	48,40
Pedra Britada	12	34,00

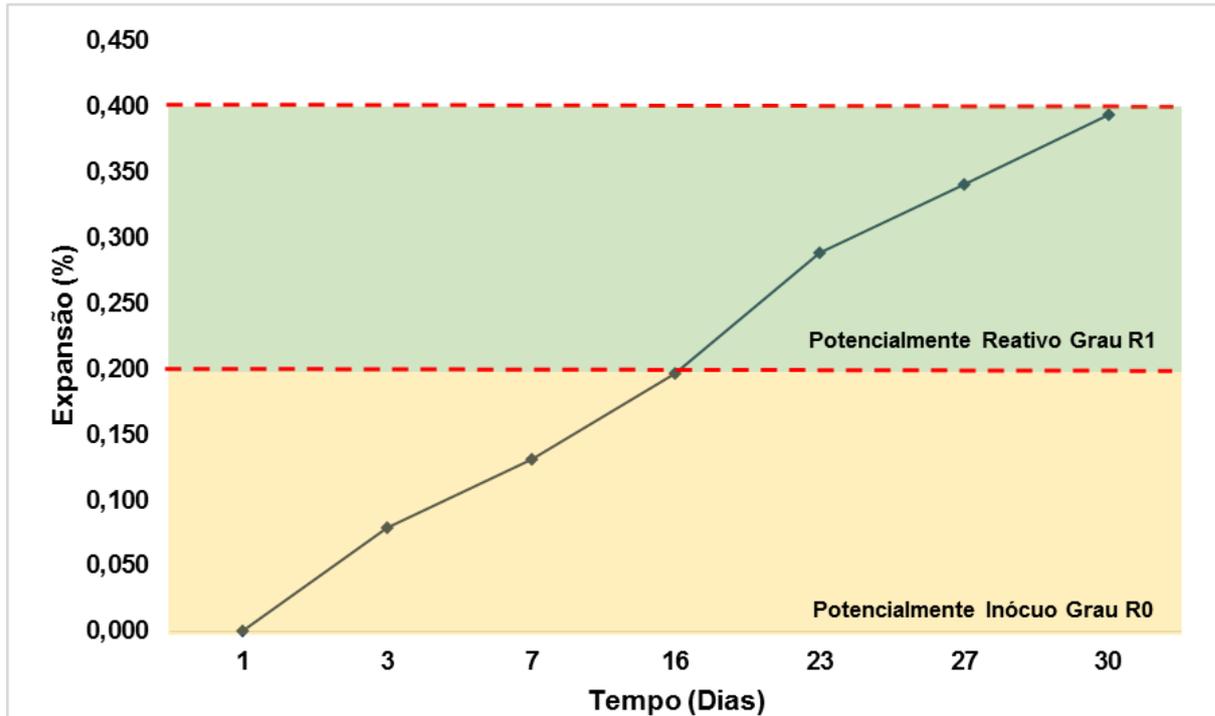
FONTE: AUTOR, 2023

3.3.7. Análise da Reação Álcali Agregado (RAA) para o agregado sintético

O ensaio em questão para o agregado sintético obteve a expansão média chegando aos 30 dias com 0,025%, seguindo os parâmetros da NBR 15577 - 4 (ABNT, 2018), foi feita a realização do desvio relativo máximo (DRM) para valores de expansão acima de 0,10 %, aos 30 dias, o desvio relativo máximo deve ser de até 20% da média das três barras do ensaio, onde se obteve o (DRM) de 15,32% estando dentro do que a norma exige, o gráfico da figura 28 mostra a reatividade potencial do agregado sintético que ficou em 0,19% aos 16 dias e 0,394% aos 30 dias. De acordo com Ribeiro et al. (2012) esta expansão da amostra já é bastante acima do valor considerado “seguro” (0,10%) ou “duvidoso” (0,20%). O autor ainda explica o motivo da amostra ter mais de 10% aos 16 dias, que seria a quantidade de álcalis do material pode ser mobilizada para o ataque de sílica reativa nas primeiras 48 h antes da argamassa ser imersa na soda. Ribeiro et al. (2012) completa que possivelmente, o fato do resíduo da bauxita ser rica em sódio é pouco relevante neste ensaio, já que a solução de contato (NaOH 1 N) fornece sódio em quantidade mais que suficiente para a RAS.

O trabalho de Ribeiro et al. (2012) que usou agregado miúdo altamente reativo como referência e foi substituindo paliativamente com resíduo da bauxita e obteve um decréscimo, chegou a uma reatividade grau R2 próximos de 0,45%. Em comparação com 0,394% aos 30 dias da pesquisa em questão, segundo o Ribeiro et al. (2012) a reatividade do resíduo com o cimento pode ter sido mais relevante positivamente do que a elevada presença de álcalis.

Figura 28 Reatividade potencial do agregado sintético



FONTE: AUTOR, 2023

Segundo a NBR 15577 - 1 (ABNT, 2018) o grau reativo é determinada na tabela 2 da norma de classificação do grau de reatividade do agregado, onde a expansão das barras de argamassa aos 30 dias ficou entre 0,19 e 0,40% tendo as características de potencialmente reativo Grau R1 como pode ser visto no gráfico da figura 28. A NBR 15577 - 1 (ABNT, 2018) ainda determina na tabela 3 da norma em que tipo de elementos estruturais pode ser empregado o concreto confeccionado com agregado sintético em questão, como mostrado na tabela 17 de grau de risco devido a ocorrência de RAS.

Podemos ver na tabela 17 que o grau R1 se torna desprezível em ambientes secos e não maciços cuja menor dimensão da seção transversal é menor que 1 m e reatividade mínima para elementos maciços cuja menor dimensão da seção transversal é igual ou superior que 1 m.

Tabela 17 Grau de risco de ocorrência de RAS

Classe de reatividade do agregado	Dimensões e condições de exposição dos elementos estruturais de concreto
R1	
Desprezível	Não maciço em ambiente seco corresponde ao ambiente com umidade relativa do ar menor que 60 %, geralmente encontrado nos interiores das edificações.
Mínimo	Maciço é aquele cuja menor dimensão da seção transversal é maior ou igual a 1 m, em ambiente seco.
Moderado	Todas as estruturas geralmente externas, expostas à umidade do ar enterradas e imersas.
Alto	Todas as estruturas em contato com álcalis em condições de serviço, incluem estruturas em contato com a água do mar solos contaminados, lençóis freáticos contendo sais alcalinos entre outros.

FONTE: AUTOR, 2023 adaptada da NBR 15577 - 1 (ABNT, 2018)

3.3.8. Índice de Atividade Pozolânica (IAP) – Hidróxido de Cálcio

Foram moldados 3 corpos de prova dosados em proporções de cal, areia e o agregado sintético ilustrado na figura 29.

Figura 29 Agregado Sintético e Hidróxido de Cálcio P.A.



FONTE: AUTOR. 2023

Tabela 18 - Índice de atividade pozolânica (IAP) com hidróxido de cálcio do Agregado Sintético

Amostra	Resistencia Mínima	IAP Com Cal
Agregado sintético	6,0 MPa	3,44 MPa

FONTE: AUTOR, 2023

Todas as argamassas com adições, não atingiram o percentual mínimo, considerado adições minerais inertes, a incorporação do resíduo da bauxita proveio abaixo do requisito físico da NBR 12653 (ABNT, 2015), de valores maiores ou iguais a 6,0 MPa. A avaliação do material cerâmico resultou em resistência à compressão média de 3,44 MPa como mostrado na tabela 18, valor muito próximo do mínimo estabelecido pela norma, o resultado do ensaio tem a ver com o acréscimo de argila a composição do agregado sintético pois em sua pesquisa Laureano (2014) cita que os resultados indicam certa tendência de redução do valor de índice de atividade pozolânica com a presença de argila em composição com resíduo da bauxita, onde Costa (2017), explica que uma pequena variação nos resultados experimentais poderia propiciar acréscimo no valor médio de resistência à compressão, possibilitando a sua classificação como pozolana. Onde os resultados ficam semelhantes a pesquisa da autora Paumgarten *et al.* (2021) que tiveram uma média de 4,8 MPa, sem considerando a variante de temperatura diferentes que no caso da mesma foi de 900°C.

3.4. CONCLUSÃO

A presente pesquisa propôs uma análise física e química dos materiais, no que concerne a fabricação de agregados graúdos sintéticos calcinados a 1000°C, com a reutilização do resíduo da bauxita em 85%, com uma ínfima proporção em peso de areia 10% e argila 5% com finalidade de aplicação destes na confecção de concretos.

O agregado sintético com dimensão máxima de 19 mm em análise atendeu as condições impostas por normas vigentes como a densidade de 1,59 g/cm³ determinado pela NBR 16917 (ABNT, 2021), retratando resultados satisfatórios e aproximados aos de agregados comumente confeccionados em diversas pesquisas.

No ensaio de fluorescência de raios X mostrou um alto proporção de Fe_2O_3 , Al_2O_3 e SiO_2 , e como visto em literatura exibe uma elevada porcentagem de Na_2O . A difratometria de raios X demonstrou que a investigação mineralógica alcançada, o resíduo *in natura* compõe-se de picos pertencente à gibbissita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), anatásio (TiO_2), hematita (Fe_2O_3), quartzo (SiO_2) e sodalita ($\text{Na}_4\text{Al}_3(\text{SiO}_4)_3\text{Cl}$). No momento em que o agregado sintético é calcinado à 1000°C nota-se a dissolução da sodalita, do anatásio e da goethita, e o aparecimento da nefelina (NaAlSiO_4), ademais a hematita se manteve sem alguma alteração.

O resíduo da bauxita não é quimicamente inerte, onde é inevitável uma modificação química para consolidar os compostos, para confirmação foi realizado o ensaio de índice de atividade pozolânica (IAP), com a incorporação da argila proveio abaixo do requisito físico com resistência à compressão média de 3,44 MPa, considerado adições minerais inertes.

O agregado sintético foi submetido ao ensaio de álcali-agregado (RAA) a reação química que ocorre em argamassas ou concretos envolvendo cimento Portland e agregados graúdos ou miúdos, que, sob certas condições, pode causar expansão deletéria. Onde a expansão das barras de argamassa aos 30 dias ficou entre 0,19 e 0,40% tendo as características de potencialmente reativo Grau R1. Se torna desprezível em ambientes secos e não maciços cuja menor dimensão da seção transversal é menor que 1 m e reatividade mínima para elementos maciços cuja menor dimensão da seção transversal é igual ou superior que 1 m.

A temperatura empregada de 1000°C se demonstrou como aceitável para as reações em estado sólido, na qual a fase mulita não é gerada segundo os autores referenciados nesta pesquisa. Quanto mais geração de mulita, a resistência dos agregados sintéticos será maior. Tendo essa afirmação como base, pode-se analisar que o agregado sintético não atingiu os parâmetros recomendados pela norma NBR 16974 (ABNT, 2022) de Abrasão “Los Angeles” alcançando 64,60%, mas em comparação a outros agregados sintético com mesmas características se mostrou admissível.

Com análises realizadas, conclui-se que o resíduo da bauxita detém disponibilidade técnica para moldagem de agregados sintéticos, e se assemelham a agregados graúdos usualmente utilizados concretos com finalidades estruturais.

3.5. REFERÊNCIAS

ANDRIOLO, F. R. **Observação de estruturas de concreto: Validade quanto à ocorrência da reação alkali-agregado**, Anais do Simpósio sobre Reatividade Alkali-Agregado em Estruturas de Concreto, Goiânia, GO, p. 14, 1997.

ARNDT, J. A.; SOUZA, J.; BIANCHINI, M. **Influência do índice de forma do agregado graúdo na resistência a compressão do concreto**. In: 49º CBC 2007 – Congresso Brasileiro do Concreto. Setembro 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5751: **Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: **Agregados para concreto — Especificação**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9939: **Agregado graúdo – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768-1: **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: **Concreto - Materiais pozolânicos — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577 - 1: **Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577 - 2: **Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 2: Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577 - 4: **Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15900-1: **Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16372: **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16606: **Cimento Portland — Determinação da pasta de consistência normal**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16607: **Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: **Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16916: **Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16917: **Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16972: **Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16973: **Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16974: **Agregados - Ensaio de resistência ao impacto e à abrasão Los Angeles**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17054: **Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 11 -2: **Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxidos principais por complexometria Parte 2**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 13: **Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO – ANEPAC. **Mercado: Perspectivas para o Setor de Agregados**. Disponível em: Acesso: 13 de abril 2017.

BOUSSEN, S. BENNOUR, A. **Characteristics and industrial application of the lower cretaceous clay deposits (Buhedma formation), southeast Tunisia: Potential use for the manufacturing of ceramic tiles and bricks**, Applied Clay Science, v. 123, pp. 210-221, 2016.

CARLETE, B. A.; QUEIRÓZ, F. C.; SILVA, H; V. **Caracterização de concreto constituído de agregados minerais provenientes de resíduos grosseiros de rochas ornamentais**. In: aNAIS DA JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 25. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 5p, 2017.

CELIK, H. **Technological characterization and industrial application of two Turkish clays for the ceramic industry**, Applied Clay Science, 50, pp. 245-254, 2010.

COSTA, D. S. da, [et. al.]. **Valoração de resíduos industrial de lama vermelha em material compósito**. Fórum internacional de resíduos sólidos, 9º, 2018, Porto Alegre-RS, 5p, 2018.

COSTA, L. F. **Estudo do bagaço da cana de açúcar como material para construção civil no estado de Pernambuco – sistema ternário com metacaulim e cal hidratada**. 2017. Dissertação. (Mestre em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2017.

DA SILVA, T. C. G.; PIMENTEL, M. G., MACÊDO, A. N., PICANÇO, M. S., MARTINS, W. S., JUNIOR, A. O., SILVA, A. L. M. F., BRITO, W. S. **Avaliação dos efeitos da temperatura na lama vermelha da região amazônica**. Congresso Brasileiro de engenharia e ciência dos materiais, Nova Iguaçu, PR, 2018.

DEGEN, M. K. CARDOSO, T. C. COSTA, R. P. MASUERO, A. B. MOLIN D. C. C. D. **Estudo da lama vermelha como filer em matrizes cimentícias**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Rio Grande do Sul, 2019.

LAUREANO, J. L. **Redução da alcalinidade disponível da lama vermelha mediante composição com argilas para uso como aditivo suplementar ao cimento portland**. 2014. Dissertação. (Mestre em Ciências e Engenharia de Materiais), Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2014.

MARQUES, G. L. O. **Procedimentos de avaliação e caracterização de agregados minerais usados na pavimentação asfáltica**. Seminário de qualificação ao doutorado – Coordenação 156 Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2001.

MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**, Ed. PINI, S. Paulo, Brasil, p. 249, 1994.

MENDONÇA, M. F. **Substituição parcial do cimento Portland por cinzas de bambu (*Bambusa Vulgaris*)**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil PPGEC, Belém, 2018.

MUNHOZ, F. A. C. **Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-sílica e álcali-silicato**, Dissertação de Mestrado em Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de S. Paulo, S. Paulo, 166 p, 2008.

OLIVEIRA, H. A. **Avaliação de argilas industriais formuladas com resíduo de vidro na produção de agregado sintético**, São Cristóvão – SE, out. 2017.

OZGUVEN, A., GUNDUZ, L., **Examination of effective parameters for the production of expanded clay aggregate**, Cement and Concrete composites, v.34,pp. 781-787, 2012.

PAUMGARTTEN, M. D. V.; REIS, F. J. L., PICANÇO, M. S., MACEDO, A. N., COSTA, D. S. R., SANTOS, A. C. M. **Caracterização e avaliação do índice de atividade Pozolânica de lama vermelha e resíduo de manganês para produção de misturas ternárias cimentícias**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v.7, n.8, p. 85965-85979, ago. 2021.

PEREIRA, A. L.; REIS, M. A., FERREIRA, L. L. H. C., NAKACHIMA, P. M. **Brazilian refractory grade bauxite: a new alternative to refractories makers and users**. Cerâmica 65, São Paulo, 40-46, 2019.

PEREIRA, C. **Tipos de cimento: Características e especificações**. Escola engenharia, 14 de jan. de 2019. Disponível em: <<https://www.escolaengenharia.com.br/tipos-de-cimento/>>. Acesso em: 27 de abr. de 2023.

PEREIRA, C. **Tipos de concretos utilizados na construção civil**. Escola engenharia. jul. 2016. Disponível em: < <https://www.escolaengenharia.com.br/tipos-de-concreto/.pdf>> Acesso: 20 de nov. de 2023.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

RACANELLI, L. A.; BRITO, W. S., CARDOSO, D. N. P., VIVEIROS, D. C. S., SOUZA, J. A. S. **Caracterização de dois tipos de argilas do município de São Miguel do Guamá utilizados para fabricação de telhas e blocos de vedação**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 5, n. 4, p. 3803-3812, apr. 2019.

REIS, M. O. B. SILVA, A. M. S. **Reações álcalis-sílica: recomendações gerais para prevenir a deterioração do betão**, Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Boletim Técnico. ITCM 23), 27 p, 1997.

RIBEIRO, D. V. SILVA, A. M. S. LABRINCHA, J. A. MORELLI, M. R. **Estudo das reações alcalis-sílica associadas ao uso da lama vermelha em argamassas colantes e de revestimento**. Cerâmica. [S.l.], vol.58, n.345, p. 90-98, 2012.

RIVARD, P. BÉRUBÉ, M. A. OLLIVIER, J. P. BALLIVY, G. **Mater. Structures 40**, [S.l.], 9- 909, 2007.

ROSÁRIO, K. A. **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.

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.

SIKA, Brasil. **Sika Concreto Forte**. Ficha técnica de produto, São Paulo, 2020. Disponível em:< https://bra.sika.com/content/dam/dms/br01/o/sika_concreto_forte.pdf >. Acesso em: 28 de jun.de 2023

SOUZA, J. **Estudo e avaliação do uso de resíduos do processo Bayer como matéria prima na produção de agregados sintéticos para a construção civil**. 2010. Tese. (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia), Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

4- ARTIGO 2 – ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO PRODUZIDO COM AGREGADO GRAÚDO SINTÉTICO LEVE COMPOSTO A PARTIR DO RESÍDUO DA BAUXITA

RESUMO

No Brasil um dos essenciais minerais é a bauxita, em referência o estado do Pará, a qual é profusamente empregue pela indústria de alumínio, colaborando de modo considerável para fomentar a economia do país. Onde a alta concentração de rejeito que é oriundo do beneficiamento da bauxita, corriqueiro como processo Bayer, em virtude das particularidades químicas deste resíduo que tem afligindo o meio ambiente, os órgãos ambientais vêm demandando com mais frequência que as fontes produtoras viabilizem maneiras de reaproveitamento deste material. A pesquisa em questão tem como objetivo analisar o comportamento do agregado graúdo sintéticos leve de resíduo da bauxita sinterizados a 1000°C com 85% de matéria-prima, 10% de areia fina e 5% de argila, abordando a viabilidade para produção de um concreto, que apresente características que o torne próprio ao uso como insumo na indústria da construção civil, utilizando agregados sintéticos com diâmetro de 9,5 mm a 19 mm e combinações de dosagem com 0%, 30%, 50%, 70% e 100% de agregado sintético em relação aos agregados graúdos usuais como seixo rolado e pedra britada. A metodologia empregada para a produção do concreto seguiu as normas pré-estabelecidas, e análises em seu estado fresco e endurecido, juntamente com MEV. Embora as adversidades na etapa de produção os resultados são auspiciosos, em seus atributos mecânicos, onde os resultados do concreto fabricado com 100% de agregado sintético (CAS100) foram de resistência à compressão axial (20,18 MPa), tração por compressão diametral (1,85 MPa) e tração na flexão (4,59 MPa) sem o uso de superplastificantes, obtendo dinamismo análogo aos com inclusão de agregados convencionais. Entende-se, portanto, que os concretos fabricados com uso dos agregados sintéticos leves retêm efetividade técnica para este epílogo.

Palavras-chave: Agregado Sintético. Resíduo da Bauxita. Concreto.

ABSTRACT

In Brazil, one of the essential minerals is bauxite, in reference to the state of Pará, which is widely used by the aluminum industry, contributing considerably to boosting the country's economy. Where the high concentration of waste that comes from the processing of bauxite, commonplace as the Bayer process, due to the chemical particularities of this residue that has been plaguing the environment, environmental agencies have been demanding more frequently that the producing sources enable ways of reusing this material. The research in question aims to analyze the behavior of light synthetic coarse aggregate from bauxite residue sintered at 1000°C with 85% raw material, 10% fine sand 5% clay and, addressing the feasibility for producing a concrete, which presents characteristics that make it suitable for use as an input in the construction industry, using synthetic aggregates with a diameter of 9.5 mm to 19 mm and dosage combinations with 0%, 30%, 50%, 70% and 100 % of synthetic aggregate in relation to the usual coarse aggregates such as pebbles and crushed stone. The methodology used to produce the concrete followed pre-established standards, and analyzes in its fresh and hardened state, together with SEM. Despite the adversities in the production stage, the results are auspicious, in terms of their mechanical attributes, where the results of the concrete manufactured with 100% synthetic aggregate (CAS100) were resistance to axial compression (20.18 MPa), traction due to diametral compression (1.85 MPa) and flexural traction (4.59 MPa) without the use of superplasticizers, obtaining dynamism similar to that with the inclusion of conventional aggregates. It is understood, therefore, that concrete manufactured using lightweight synthetic aggregates retains technical effectiveness for this epilogue.

Keyword: Synthetic Aggregate. Bauxite Residue. Concrete.

4.1. INTRODUÇÃO

Com o âmbito da construção civil sob a compreensão de um mercado sucessivamente desafiador, visando o crescimento e desenvolvimento, buscam materiais que dê custo e benefício satisfatório constantemente condicionando os atributos e durabilidade do concreto.

Em grande parte das obras no Brasil, costuma-se utilizar o “concreto convencional”, composto por uma mistura homogênea de cimento, agregados miúdos e graúdos, com ou sem a incorporação de componentes minoritários (aditivos químicos e adições), que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento (BATTAGIN, 2009).

Segundo Costa e Gomes (2020), com o uso do concreto leve na construção civil, as estruturas perderam um pouco do seu peso específico e com isso reduziram a necessidade de área de aço em determinadas estruturas, também reduz o volume de concreto armado. Para a obtenção do concreto leve a necessidade do uso de agregados leve, como é o caso do agregado sintético composto do resíduo da bauxita. Segundo Ozguven e Gunduz (2012), agregado leve sintético é definido como um conjunto de grãos naturais processados ou manufaturados, que apresentam diferentes tamanhos e que são interligados por material aglomerante.

Os agregados sintéticos são produzidos através de argilas ou subproduto de resíduos, que normalmente geram um produto com peso específico inferior ao da pedra britada e com elevada absorção de água. Os agregados leves podem ser obtidos pelo processo de queima em forno rotativo e apresentam granulometria variada. (OZGUVEN, GUNDUZ, 2012).

Segundo Chandra (2002), a resistência mecânica depende das características das matérias-primas, bem como do processo de produção utilizado. Agregados produzidos com uma distribuição uniforme de pequenos poros apresentam maiores resistências que agregados com poucos poros de grandes diâmetros. Os agregados sintéticos leves possuem elevada absorção de água e baixa densidade aparente, comparados com a pedra britada, o que facilita a aderência à pasta cimentícia e ao processo de cura interna quando se produz concreto DOMAGATA, 2016 e ROSSIGNOLO 2007. Segundo Bogas (2013), a argila expandida pode reduzir em 30 a 50% o peso de uma estrutura, e a resistência mecânica a compressão pode ainda

alcançar até 45 MPa, obtendo peso específico de 1700 kg/m³, comparados com a brita que oscila de 2600 a 2700 kg/m³.

As utilizações de novas técnicas para reaproveitamento de resíduos com uso na construção civil, têm se tornado cada vez mais importante para a sociedade no cenário atual de desenvolvimento sustentável, fato que se observa em virtude da produção industrial de matérias primas com consequente produção de rejeitos industriais que causam ou tem o potencial para causar danos ao meio ambiente. (SOUZA 2019).

Para o reaproveitamento do resíduo da bauxita, como de qualquer outro tipo de materiais, tem-se a necessidade da determinação de suas propriedades para avaliação de onde o componente seria melhor aplicado e/ou aproveitado. O conhecimento das características físicas, químicas e mecânicas são de vital importância para a determinação da eficiência, visando utilizações de materiais alternativos (COSTA, 2018).

Devido à grande demanda para o discernimento dos elevados volumes de resíduos constituído, a pesquisa em questão propõe o uso de agregados graúdo sintéticos compostos por resíduos da bauxita e sua incorporação no concreto nas combinações com agregados graúdos de seixo e brita, pois apesar do avanço tecnológico da construção civil e dos novos materiais que são implantados diariamente para atender a necessidade de altas resistências no concreto, onde este continua a ser um problema frequentes quando agregados convencionais são utilizados.

4.2. METODOLOGIA.

4.2.1. Materiais

Para fabricação do concreto foram utilizados os seguintes materiais: **Agregado Sintético, Seixo rolado, Pedra Britada, Areia, Cimento, Aditivo e Água.**

Agregado Sintético (AS), composto pelo Resíduo da Bauxita viabilizada por uma indústria produtora de alumínio, localizada no município de Barcarena/PA, juntamente com argila retirada das margens do Rio Guamá e areia extraída da jazida Oriental próxima à Castanhal Km 21. Esses materiais após a coleta passaram pelo beneficiamento, ao qual os materiais *in natura* foram moídos com moinho de bolas de eixo horizontal, com jarro de porcelana, com diâmetro de 25 cm, movido por um motor de 40 rpm, compostas por esferas cerâmicas, para obtenção dos materiais com granulometria abaixo da 100 mesh adequada para uso foi utilizado o tempo de 150 min. Após isso foi feita uma massa cerâmica homogênea com Resíduo - 85%, Areia - 10%, Argila - 5% e Água variando de 10 a 20%. Em seguida a secagem em estufa de 100°C foram triturados e separados granulometricamente nas sequencias de peneiras 19; 12,5; 9,5 e 4,75 mm, posteriormente os agregados foram sintetizados em um forno localizado em Icoaraci, aproximadamente 20 km do Centro de Belém - PA, à temperatura de 1000°C.

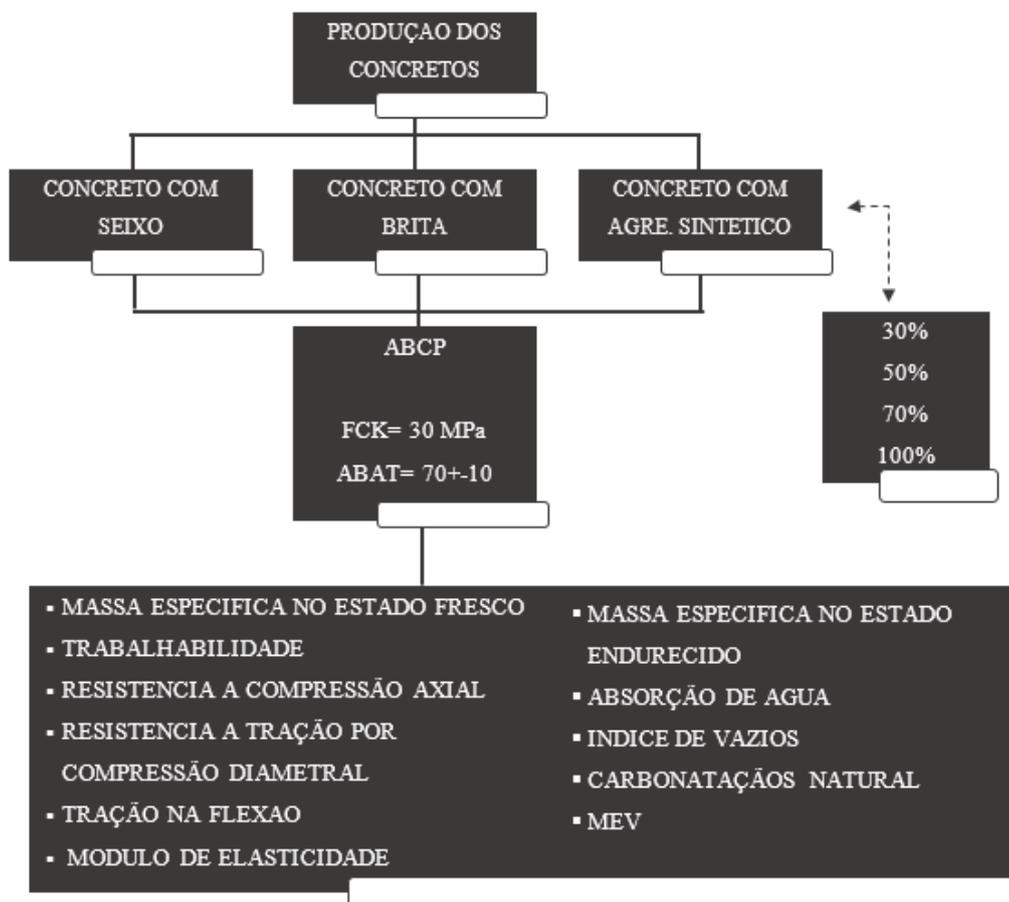
Os outros agregados foram os grãos como o Seixo Rolado (SR), proveniente da jazida Aurora próxima à Ourem e a Pedra Britada (PB), proveniente da jazida Tracuateua próxima à Bragança. Assim como o agregado miúdo que foi a areia, extraída da jazida Oriental próxima à Castanhal Km 21.

Juntamente foi utilizado o Cimento Portland CP II-F-32 (Cimento Portland composto com material Carbonático Classe 32), de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018) e o aditivo líquido retardador de pega normal e redutor de água, usado como plastificante para concreto. Onde se encaixa como redutor de água tipo 2/retardador RA2-R mostrado no tópico 3.29 da NBR 11768-1 (ABNT, 2019).

4.2.2. Métodos

A produção do concreto foi realizada no Laboratório de Materiais de construção civil da Universidade Federal do Pará (Campus Belém - Guamá), como os agregados graúdos utilizados possuíam massa específica diferentes, foi executado a equivalência de massa para cada traço, para a produção utilizou uma betoneira de eixo inclinado, após a preparação instantaneamente, desempenhou os ensaios de consistência (abatimento do tronco de cone) e moldagem dos CP's para a sequente realização dos ensaios no estado endurecido como pode ser visto no fluxograma da figura 30.

Figura 30 Fluxograma da confecção do concreto.



FONTE: AUTOR, 2023

Foram produzidos concretos com percentuais de substituição do seixo e brita por agregados sintéticos (0%, 30%, 50%, 70% e 100%). A tabela 19 mostra o grupo de concretos que serão produzidos com suas respectivas siglas.

Tabela 19 Grupos de concretos produzidos

Grupo de Concreto	Siglas
Concreto de referência produzido com 100% pedra britada	CPB100
Concreto produzido com 30% de Pedra Britada e 70% de Agregado Sintético	CPB30AS
Concreto produzido com 50% de Pedra Britada e 50% de Agregado Sintético	CPB50AS
Concreto produzido com 70% de Pedra Britada e 30% de Agregado Sintético	CPB70AS
Concreto de referência produzido com 100% seixo rolado	CSR100
Concreto produzido com 30% de Seixo Rolado e 70% de Agregado Sintético	CSR30AS
Concreto produzido com 50% de Seixo Rolado e 50% de Agregado Sintético	CSR50AS
Concreto produzido com 70% de Seixo Rolado e 30% de Agregado Sintético	CSR70AS
Concreto produzido com 100% de Agregado Sintético	CAS100

FONTE: AUTOR, 2023

- **Método de dosagem**

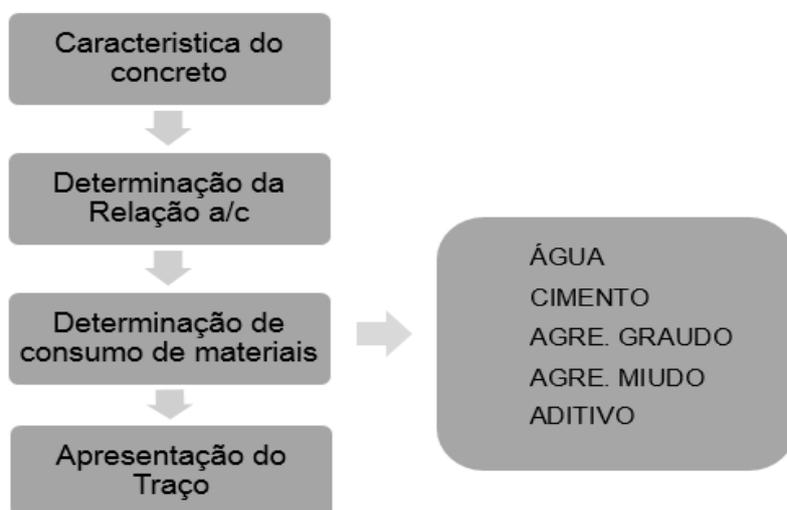
O método de dosagem utilizado para a pesquisa experimental foi o método da ABCP/ACI (Associação Brasileira de Cimento Portland / American Concrete Institute) que é um método adaptado a partir do método ACI 211.1-91 (2002). Estes procedimentos fazem uso de tabelas e gráficos executados a partir de valores médios de seguimentos experimentais, sendo, portanto, uma ferramenta convencional de dosagem de concreto. Segundo Tutikian e Helene (2011) o método da ABCP/ACI é empregado em concretos cujas resistências ficam entre 10 a 40 MPa que requerem uma boa trabalhabilidade para a moldagem in loco, com uma consistência de semi-plástica à fluída.

Para Rosário (2013) o método ABCP/ACI é expressado em uma sequência de etapas bem definidas, que compõem um conjunto de tabelas, que facilitam a definição dos parâmetros necessários para obtenção de um traço de partida. Segundo Santos (2015) o método fornece ainda um baixo teor de areia para misturas plásticas, facilitando identificação da proporção da argamassa na mistura.

A utilização de outros métodos de dosagem exigiria grande profusão de materiais, onde Rosário (2013) complementa que com o ABCP será possível obter uma redução muito significativa no número de corpos-de-prova a serem moldados, além do que é considerado um método de fácil execução. Para usar este método, você precisa definir alguns parâmetros.

Seguidamente a definição das propriedades (massa específica, massa unitária, módulo de finura e diâmetro máximo) dos materiais utilizados na fabricação do concreto, procedemos às seguintes etapas para a obtenção dos traços. As fases descritas abaixo no fluxograma da figura 31 são executadas para os nove grupos específicos (CPB100, CPB30AS, CPB50AS, CPB70AS, CSR100, CSR30AS, CSR50AS, CSR70AS e CAS100).

Figura 31 Fluxograma das etapas de execução do método ABCP



FONTE: AUTOR, 2023

A Tabela 20 apresenta o Fck para os nove grupos de concreto produzidos e seus respectivos traços onde o cimento (C), areia (A), agregado graúdo (P), agregado sintético (AS) e fator A/C, para cada grupo de concreto.

Tabela 20 Fator a/c, Fck e Traço

Grupo de Concreto	Fck (MPa)	Traço	Aditivo
		C : A : P : AS : A/C	
CPB100	30	1 : 1,814 : 2,658 : 0,510	1% em relação a massa do cimento
CPB30AS		1 : 1,711 : 0,797 : 1,325 : 0,510	
CPB50AS		1 : 1,934 : 1,329 : 0,946 : 0,510	
CPB70AS		1 : 1,775 : 1,861 : 0,568 : 0,510	
CSR100		1 : 1,073 : 2,465 : 0,510	
CSR30AS		1 : 0,887 : 0,739 : 1,325 : 0,510	
CSR50AS		1 : 1,113 : 1,232 : 0,946 : 0,510	
CSR70AS		1 : 0,935 : 1,726 : 0,568 : 0,510	
CAS100		1 : 1,374 : 1,893 : 0,510	

FONTE: AUTOR, 2023

- **Planejamento dos ensaios**

Foram elaboradas as análises das propriedades do concreto fresco e endurecido, tal como a microestrutura da zona de transição entre o agregado e a matriz cimentícia.

Para obtenção do objetivo desta atividade, foi necessário realizar vários testes seguidos das respectivas análises, o que implica na necessidade de definir as variáveis, sejam as controláveis ou variáveis de controle e as de resposta.

As variáveis controláveis analisadas neste estudo são:

a) Teores de substituição: Os teores de substituição do seixo e da brita por agregado sintético variam de 0%, 30%, 50%, 70% e 100%;

b) Idade de análise: Os corpos de prova foram ensaiados nas idades de 07 e 28 dias.

Enquanto que as variáveis de resposta, ou seja, as propriedades analisadas neste estudo são mostradas na tabela 21.

Tabela 21 Procedimentos experimentais para análise dos concretos.

Item	Norma
Massa específica no estado fresco	NBR 9833: ABNT, 2009. Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico.
Massa específica, índice de vazios e absorção de água por imersão	NBR 9778: ABNT, 2009. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica
Trabalhabilidade	NBR 5738: ABNT, 2016. Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.
Resistência à compressão	NBR 5739: ABNT, 2018. Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.
Resistência à tração	NBR 7222: ABNT, 2011. Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.
Resistência à tração na flexão	NBR 12142: ABNT, 2010. Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.
Módulo de elasticidade	NBR 8522-1: ABNT, 2021. Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação Parte 1: Módulos estáticos à compressão.
Carbonatação Natural	DIN EN 14630:2007. Products And Systems For The Protection And Repair Of Concrete Structures - Test Methods - Determination Of Carbonation Depth In Hardened Concrete By The Phenolphthalein Method.

FONTE: AUTOR, 2023

Para os ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, massa específica, índice de vazios, absorção de água e carbonatação natural, foram moldados 135 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10cm x 20cm. Enquanto que para o ensaio de resistência à tração na flexão foram moldados 27 corpos de prova prismáticos com dimensões de 10cm x 10cm x 40cm, como pode ser visto na tabela 22.

Tabela 22 Número de corpos de prova moldados.

Ensaio	Idade (dias)	Nº de corpos de provas								
		CPB 100	CPB 30AS	CPB 50AS	CPB 70AS	CSR 100	CSR 30AS	CSR 50AS	CSR 70AS	CAS 100
Resistência à Compressão	7	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	28	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Resistência à Tração por Compressão Diametral	28	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Absorção por Imersão	7	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Carbonatação Natural	90	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Módulo de Elasticidade	28	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Resistência à Tração na Flexão	28	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Total		18	18	18	18	18	18	18	18	18
Total Geral		162								

FONTE: AUTOR, 2023

- **Moldagem e cura dos corpos de prova**

Para a confecção das misturas dos concretos utilizados no experimento como é mostrado no fluxograma da figura 32, foram utilizados os equipamentos disponíveis no Laboratório de Materiais da Universidade Federal do Pará – UFPA (Campus Belém Guamá). Utilizou-se uma betoneira com capacidade do tambor igual a 400 litros e velocidade próxima a 28 rotações por minuto. Antes da confecção dos corpos-de-

prova os moldes receberam uma fina camada de óleo vegetal para facilitar a desmoldagem assim como recomenda a NBR 5738 (ABNT, 2016).

Figura 32 Fluxograma da execução do concreto



FONTE: AUTOR, 2023

Feito a medida das proporções dos componentes os mesmos foram adicionados ao tambor da betoneira na seguinte ordem: 1/3 da água de amassamento requerido no traço juntamente com aditivo, em seguida o agregado graúdo, o aglomerante (cimento), o agregado miúdo, 1/3 da água e o restante foi adicionado conforme a necessidade, em virtude da consistência, do abatimento do tronco de cone, e de possíveis correções em função do método de dosagem escolhido. A figura 33 mostra a realização do ensaio de abatimento de tronco de cone (Slump Test).

Figura 33 Abatimento de tronco de cone (Slump Test)



FONTE: AUTOR, 2023

No processo de confecção dos corpos-de-prova o adensamento utilizado foi através de vibração, a NBR 5738 (ABNT, 2016) no subitem 7.4.1 estabelece a escolha do tipo de adensamento conforme o abatimento de tronco de cone, que no caso do experimento pode se tanto com haste (adensamento manual) ou por vibração devido o abatimento está no intervalo entre 50 mm a 100 mm, onde todos os concretos produzidos atenderam esses parâmetros como pode ser visto na figura 33.

Os corpos-de-prova foram curados de acordo com os procedimentos descritos na NBR 5738 (ABNT, 2016). Após o processo de moldagem, os CP's foram acondicionados na câmara umida do laboratório de engenharia civil da UFPA, em local protegido da ação das intempéries e mantendo-os desse modo por 24 horas até a execução do processo de desforma. Após a desforma, os mesmos foram depositados em tanque de cura com temperatura de $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ e lá permaneceram até as datas de realização dos ensaios.

- **Índice de consistência**

Os resultados do índice de consistência para os nove concretos foram estabelecidos por meio do abatimento do tronco de cone, de acordo com os parâmetros da NBR 5738 (ABNT, 2016), respeitando ao espaço de 70 ± 10 mm.

- **Massa específica do concreto fresco**

A massa específica do concreto fresco segundo Oliveira (2018) é um parâmetro importante para avaliar indiretamente o teor de ar incorporado (aprisionado) no material. Esse teor, se elevado, pode levar a reduções significativas na resistência do concreto. Os resultados de massa específica dos concretos no estado fresco foram de acordo com os parâmetros da NBR 9833 (ABNT, 2009).

- **Massa específica, Absorção de água por imersão e índice de vazios**

A disposição dos valores de absorção de água por imersão e índice de vazios foi realizada de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2009) para os concretos com idade de 7 dias, utilizando corpos-de-prova cilíndricos de 10 x 20 cm. Para cada grupo de concreto foram moldados 02 CP's o mínimo que a norma estabelece.

Optou-se por realizar os ensaios com 7 dias pois tomando como base a pesquisa de Aires e Paiva (2014), onde foram feitos os ensaios de índice de vazios e a absorção de água em 7, 14 e 28 dias, mostrou que ocorreu uma diminuição baixa de 4,84% e 8,18% respectivamente.

- **Resistência à compressão axial**

Nos concretos, segundo Almeida (2012) a resistência à compressão simples é definida como a tensão aplicada ao corpo-de-prova que provoca a desagregação do material que o compõe, que se dá pela ruptura da matriz da pasta de cimento, ou quando o concreto é de alta resistência, pela ruptura do agregado graúdo.

A resistência à compressão foi determinada de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018). Os corpos-de-prova cilíndricos de (10 x 20) cm foram ensaiados nas idades de 07 e 28 dias. Para cada grupo de concreto (CPB100, CPB30AS, CPB50AS, CPB70AS, CSR100, CSR30AS, CSR50AS, CSR70AS e CAS100) e idade foram moldados 03 CP's.

De acordo com a NBR 8953 (ABNT, 2015), os concretos são categorizados em grupos de resistência, grupo I e grupo II, conforme a resistência característica à compressão (f_{ck}), estabelecida a partir do ensaio de corpos-de-prova arranjados

conforme a NBR 5738 (ABNT, 2016) e rompidos de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018). Internamente dos grupos, os concretos normais com massa específica seca, conforme com a NBR 9778 (ABNT, 2009), estabelecida entre 2000 kg/m³ e 2800 kg/m³, são nomeados pela letra C, e os concretos leves com massa específica inferior a 2000 kg/m³, atribuídos as letras CL sucedida do valor da resistência característica à compressão (f_{ck}), indicada em MPa, posteriormente são classificados pela consistência determinada pelo abatimento em (mm).

A classe de resistência de concretos aplicado é à do Grupo I, normalizados pela NBR 8953 (ABNT, 2015). A NBR 6118 (ABNT, 2014) cita que a classe C20 ou superior, se aplica em concretos com armadura passiva, e a classe C15 pode ser usada apenas em fundações, conforme a NBR 6122 (ABNT, 2022) e em obras provisórias. Nesse contexto, Rodrigues (2022) a aplicação do concreto de 20 MPa serve para fundações, vigas, lajes e outros elementos estruturais. Ao adicionar a armadura no concreto temos a combinação perfeita, que resulta no concreto armado. A NBR 6118 (ABNT, 2014) se aplica aos concretos com massa específica normal, que são aqueles que têm massa específica compreendida entre 2000 kg/m³ e 2800 kg/m³.

Para os agregados leves com massa específica inferior a 2000 kg/m³ preestabelecidos pela ASTM C330 (2017) de especificação padrão para agregados leves para concreto estrutural e a ACI 318 (2019) de requisitos do código de construção para concreto estrutural exigem que o concreto leve estrutural apresente resistência à compressão mínima de 17 MPa aos 28 dias.

- **Resistência à tração por compressão diametral**

A resistência à tração obtida através de compressão diametral é basicamente um dos três métodos de determinação da resistência à tração do concreto de acordo com NBR 7222 (ABNT, 2011). Segundo Magalhães (2009) este método consiste em comprimir um corpo de prova cilíndrico, ao longo de duas linhas axiais diametralmente opostas. Este ensaio é amplamente utilizado, visto que não necessita de grandes adaptações na prensa, e por utilizar as mesmas formas de corpos de prova de ensaios à compressão.

Para a execução do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, foram usados 27 corpos-de-prova cilíndricos de (10 x 20) cm, ensaiados aos 28 dias.

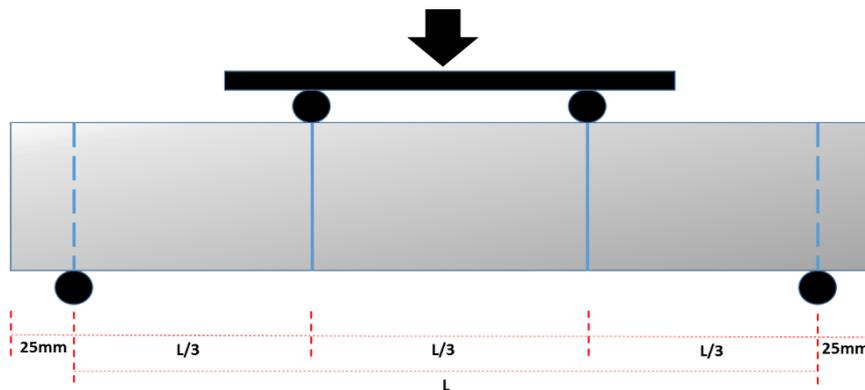
Para os agregados leves com massa específica inferior a 2000 kg/m^3 preestabelecidos pela ASTM C330 (2017) de especificação padrão para agregados leves para concreto estrutural e a ACI 318 (2019) de requisitos do código de construção para concreto estrutural exigem que o concreto leve estrutural apresente resistência à tração mínima de 02 MPa aos 28 dias.

- **Resistência à tração na flexão.**

O ensaio da resistência à tração do concreto é a chamada determinação da resistência à tração na flexão. Este mecanismo constitui-se em romper corpos de prova prismáticos conformados de acordo com a norma NBR 5738 (ABNT, 2016). A norma NBR 12142 (ABNT, 2010) estabelece o método de ensaio de tração na flexão. De acordo com Magalhães (2009) consiste basicamente em aplicar duas cargas linearmente distribuídas nos terços médios de um prisma, de modo a provocar tração na face inferior do CP como mostrado na figura 34. Esta face será tracionada até a ruptura do concreto. O autor complementa que devido à forma de aplicação da carga de ruptura do elemento de concreto, o terço central da peça fica sob ação de flexão pura, não havendo efeitos de esforços cortantes como pode ser observado através de diagrama de esforços solicitantes.

Os resultados de resistência à tração na flexão aos 28 dias foram definidos usando corpos de prova prismáticos com (10 x 10 x 40) cm de acordo com NBR 5738 (ABNT, 2016). Foram conformados 03 corpos de prova para cada grupo de concreto totalizando 27 CP's.

Figura 34 Esquema de aplicação de carga em prismas



FONTE: AUTOR, 2023

- **Módulo de elasticidade estático**

O módulo elástico descrito usualmente como Módulo de Young, teorizado pela Lei de Hook, o Módulo de Elasticidade determina o desempenho elástico de um material sólido e pode ser visto como a conformidade entre a tensão e a deformação de um determinado material. Callister e Rethwisch (2018) definem a deformação elástica dos materiais como uma manifestação de pequenas alterações no espaçamento e na extensão das ligações interatômicas.

O módulo de elasticidade estático à compressão, foi realizado com extensômetros de fixação externa da EMIC, foram determinadas em uma prensa hidráulica da EMIC e realizadas segundo a norma NBR 5739 (ABNT, 2018) e NBR 8522 -1 (ABNT, 2021), respectivamente. Para o ensaio de módulo de elasticidade estático foram utilizadas amostragens de três corpos de prova 10 x 20 cm de cada traço, totalizando 27 CP's. O carregamento aplicado foi constante de $(0,5 \pm 0,05)$ MPa/s como recomenda a NBR 8522 -1 (ABNT, 2021).

Goularte (2014) explica que o ensaio compressão são considerados ensaios quase-estáticos pela característica da carga imposta ao corpo de prova. O mesmo completa que para estes casos a variação de carga ocorre de modo gradual e muito lento, permitindo a troca de calor entre o corpo de prova e o meio, processo chamado de isotérmico. O autor ainda cita que durante todo o processo a deformação provocada no material é mensurada com a utilização de um extensômetro.

- **Carbonatação Natural**

A carbonatação ocorre entre o dióxido de carbono (CO_2) e o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) liberado durante a hidratação do silicato tricálcico (C_3S) e do silicato bicálcico (C_2S), componentes do clínquer, matéria prima do cimento (RECENA, 2017). Entre alguns dos fatores principais para penetração do CO_2 , segundo Ferreira (2013) seria a relação água/aglomerante, o processo e o tempo de cura, a dosagem, a porosidade, e as condições ambientais (temperatura, umidade relativa, concentração de CO_2 e tempo de exposição).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) define que a agressividade do ambiente está atrelada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, independente das ações relacionadas aos esforços mecânicos. Na figura 35 podem ser observadas as classes de agressividade ambiental (CAA).

Figura 35 Classes de agressividade ambiental (CAA)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

FONTE: NBR 6118 (ABNT, 2014)

A área de estudo delimitada foi selecionada de forma que, a classe de agressividade ambiental II, Agressividade Moderada, Classificação geral do tipo de

ambiente para efeito de projeto seria urbana, Risco de deterioração da estrutura pequeno.

A realização do ensaio de carbonatação em laboratório busca-se a fratura em sentido longitudinal a maior dimensão da amostra de acordo com a DIN EN 14630 (2007) define que se deve evitar cortar os corpos de provas que serão submetidas ao ensaio por aspersão de fenolftaleína, pois acarreta resultados pouco precisos. Após à ruptura da amostra solução deve ser imediatamente aplicada.

Para avaliação qualitativa dos corpos de prova, foi preparada uma solução de fenolftaleína indicadora de pH preparada conforme especificado na norma ISO 1920-12 (2015), utilizando-se 2 g de fenolftaleína dissolvida em 140 ml de álcool etílico e 60 ml de água deionizada onde pode ser visto na figura 36, foi disponibilizada pelo departamento químico da Geociência na UFPA e um paquímetro digital, com resolução de 0,01 mm, para realizar as leituras.

Figura 36 Fenolftaleína, Álcool etílico, Água deionizada



FONTE: AUTOR, 2023

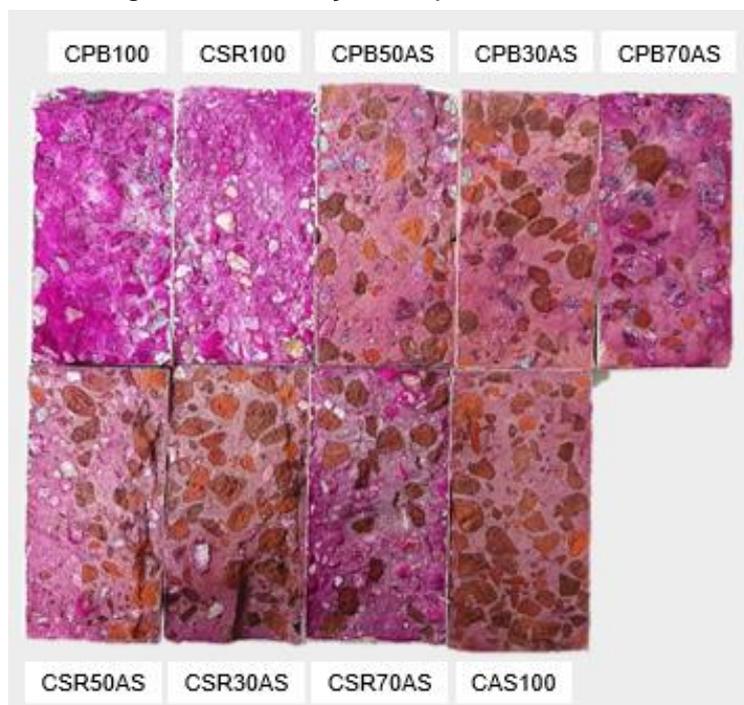
Foi preparado para o ensaio de carbonatação 1 CP para cada mistura, onde se totalizam 9 CPs para aplicação do reagente. E a idade de todos foi de 90 dias, sendo um ensaio para complementar a pesquisa, não houveram outras idades testadas.

Após a cura (1 dias) até o Nonagésimo dia (90 dias), todos os CPs cilíndricos permaneceram nas mesmas condições naturais de temperatura, pressão e umidade.

Após a realização do procedimento descrito de carbonatação natural, os CPs foram rompidos à compressão diametral, com a finalidade apenas da visualização da

secção. Após o tingimento da secção pelo reagente indicativo de pH, o resultado encontrado está visível na figuras 37.

Figura 37 Indicação de pH nas amostras



FONTE: AUTOR, 2023

- **Análise Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi efetuada para os 09 grupos de concretos confeccionados, como apresentaram as mesmas características foram selecionadas das amostras (CPB50AS, CSR70AS e CAS100), com 127 dias de idade, em conjunto com as formas de análise quantitativa e semiquantitativa que se alcançam, quase sempre, acessíveis nos sistemas de espectrografia de Raios- X por dispersão de energia (EDS) e são geralmente aproveitados, pois consistem, de maneira acelerada, o reconhecimento e a definição da composição dos elementos existentes nos fragmentos das amostras. As análises foram desempenhadas pelo laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal do Pará (LABMEV-PPFG-UFGPA).

4.3- ANÁLISE DE RESULTADOS

No capítulo em questão foram dissertados os resultados alcançados com as análises dos concretos confeccionados. O tópico foi dividido em três fases: propriedades no estado fresco como Índice de consistência e Massa específica, propriedades no estado endurecido utilizando a prensa hidráulica da EMIC disponível no laboratório de engenharia civil da Universidade Federal do Pará – UFPA (Campus Belém - Guamá), entre tantas destaca-se as propriedades mecânicas, como a resistência à compressão simples, resistência a tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão, carbonatação natural, módulo de elasticidade e análise microestrutural, visto que estas propriedades são de suma importância para esse trabalho.

Posteriormente a execução do concreto, de acordo com Oliveira (2018) é possível avaliar algumas de suas propriedades, sendo que as principais características do concreto nesta fase são: massa específica, coesão, plasticidade, exsudação, segregação, temperatura, entre outras.

Os concretos confeccionados mostraram coesão, temperatura, plasticidade e consistência adequadas, viabilizando a execução dos corpos-de-prova. Destaca-se que nos concretos presenciou a inexistência dos fenômenos de segregação dos agregados e da exsudação.

4.3.1. Índice de consistência

Os resultados do índice de consistência para os nove concretos foram estabelecidos por meio do abatimento do tronco de cone, de acordo com os parâmetros da NBR 5738 (ABNT, 2016), respeitando ao espaço de 70 ± 10 mm. A Tabela 23 mostra as propriedades do concreto no estado fresco.

O concreto confeccionado mostrou um aspecto coeso e consistente, onde os agregados graúdos estão completamente envolvidos pela pasta cimentícia. Este desempenho foi presenciado em todos os traços com modificação parcial ou total do agregado graúdo seixo e brita pelo agregado sintético. Como pode ser visto na tabela 23.

Tabela 23 Propriedades dos concretos no estado fresco.

Concretos	Massa Especifica E. Fresco Kg/m ³	Abatimento (mm)
CPB100	2324,84	70 ± 10
CPB30AS	2140,13	
CPB50AS	2222,93	
CPB70AS	2229,30	
CSR100	2299,36	
CSR30AS	2127,39	
CSR50AS	2178,34	
CSR70AS	2229,30	
CAS100	2049,04	

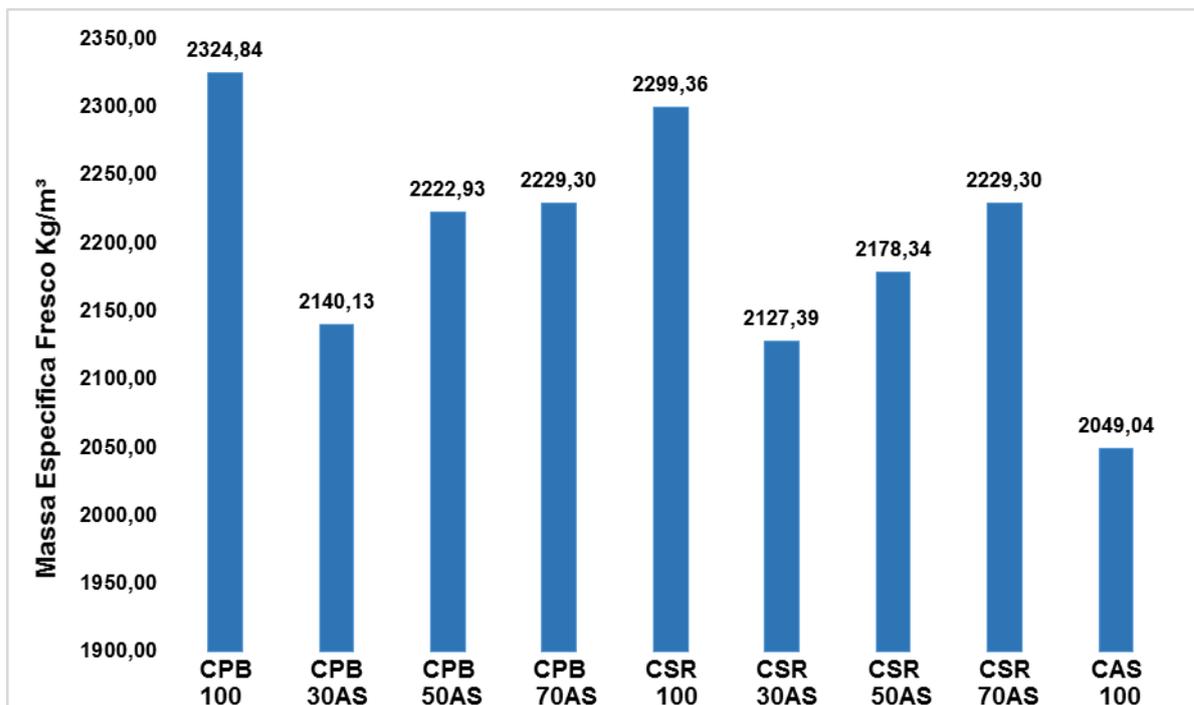
FONTE: AUTOR, 2023

4.3.2. Massa especifica do concreto fresco

As massas específicas do concreto fresco divergiram entre 2049,04 kg/m³ e 2324,84 kg/m³ como pode ser visto na Tabela 23. Observou-se que de acordo em que a porcentagem de modificação do seixo rolado e da pedra britada pelo agregado sintético é elevado, acontece o decréscimo no resultado da massa específica, onde segundo a Rosário (2013) e a evidencia da leveza do material produzido a partir do resíduo do beneficiamento da bauxita.

Os concretos confeccionados com 30% de agregado sintético (CPB30AS e CSR30AS) mostraram uma redução dos resultados de massa específica de 7,95% e 7,48% em comparação aos concretos de referência (CPB100 e CSR100) respectivamente. O concreto com 100% de agregado sintético (CAS100) mostrou uma redução de 11,86% e 10,89% em comparação aos concretos de referência (CPB100 e CSR100) respectivamente. Segundo Mehta e Monteiro (2008) a massa específica do agregado, sua porosidade, textura, forma e tamanho são fatores que influenciam a massa específica do concreto no estado fresco. Na Figura 38 e demonstrado os resultados de massa específica adquiridos para cada concreto. Na pesquisa de Rosário (2013) os resultados de massa especifica no estado fresco variaram entre 2000 kg/m³ e 2300 kg/m³, ficando muito semelhante aos resultados da figura 38.

Figura 38 Massa específica no estado fresco

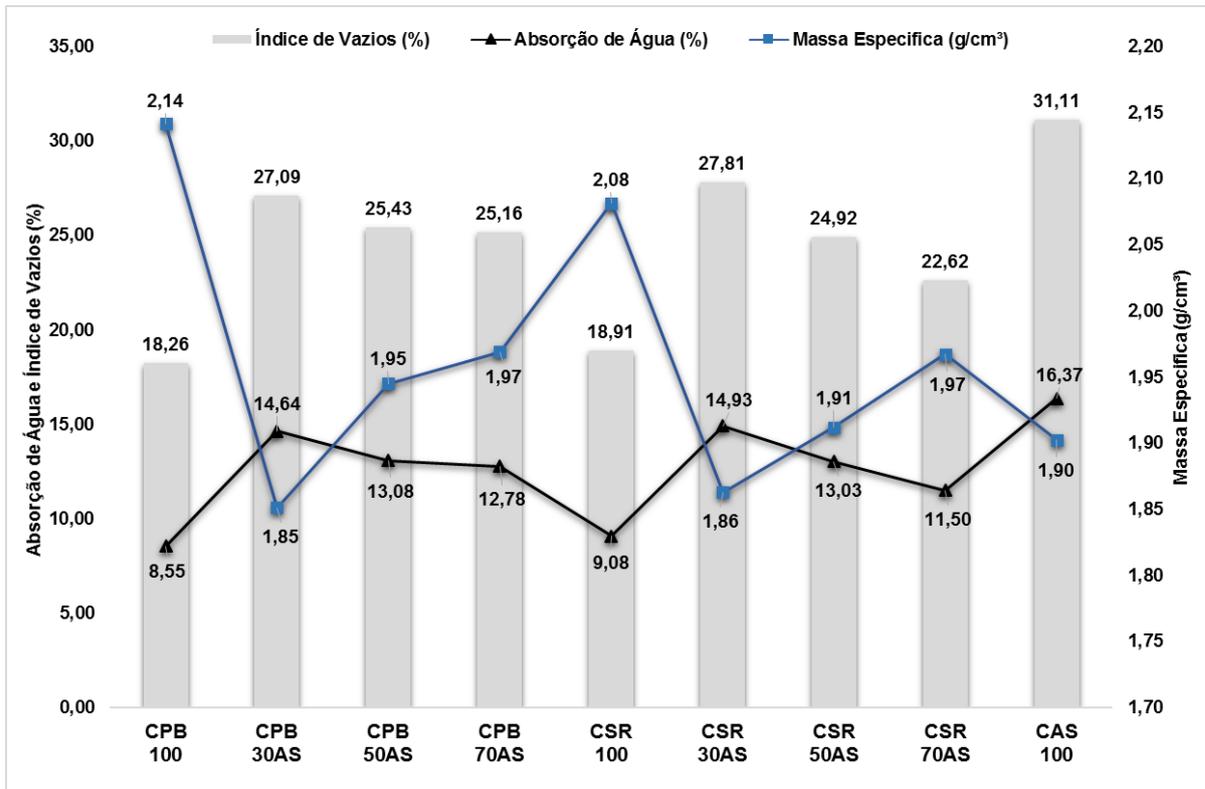


FONTE: AUTOR, 2023

4.3.3. Massa específica, Absorção de água por imersão e índice de vazios

Ao analisar os resultados dos experimentos ilustrados na Figura 39, verifica-se que os valores da absorção de água por imersão tiveram variações de 8,55% (CPB100) a 16,37% (CAS100), enquanto que o índice de vazios variou de 18,26% (CPB100) a 31,11% (CAS100).

Figura 39 Relação entre a massa específica estado endurecido, absorção de água e índice de vazios dos concretos com agregados naturais e agregados sintéticos.



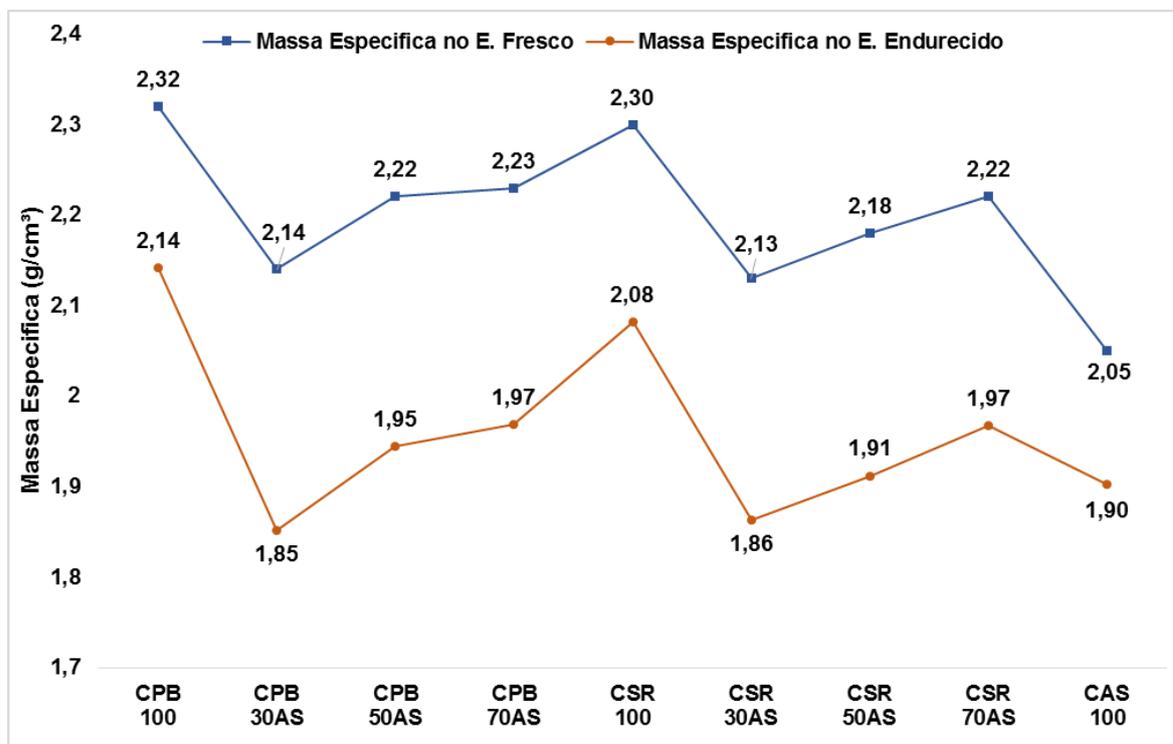
FONTE: AUTOR, 2023

Com os resultados obtidos, nota-se que a massa específica, índice de vazios e a absorção de água entre o CPB100 e o CSR100 tiveram variação de 2,88%; 3,45% e 5,93%, respectivamente, tendo em vista que são os concretos com 100% brita e seixo, onde foram os menores valores, desconsiderando a massa específica como visto no gráfico da figura 39. Os concretos leves produzidos com teores de substituição de agregado sintético apresentaram variações no índice de vazios quanto na absorção de água, onde CPB30AS, CSR30AS e CAS100 tiveram as porcentagens mais elevadas comparadas as outras, ou seja, concretos mais porosos, podemos acrescentar que são as amostras com maior substituição sendo 70% a 100% de agregado sintético, esse resultado se mostrou semelhante a pesquisa de Aires e Paiva (2014), os concretos produzidos com agregados sintéticos apresentaram valores superiores, tanto do índice de vazios, quanto da absorção de água em relação aos blocos de concretos com agregados naturais. Segundo Assunção (2016), a porosidade do concreto está diretamente ligada à quantidade de água absorvida pelo agregado. O autor ainda completa que isso é especialmente importante para o caso

dos agregados leves à medida que estas características afetam as propriedades dos concretos confeccionados com este tipo de agregado. As características de superfície e a porosidade dos agregados e o uso de adições são alguns dos fatores determinam a maior ou menor absorção de água dos concretos (KARAHAN et al., 2012).

Ao comparar a massa específica no estado endurecido que variou de 1,85 g/cm³ a 2,14 g/cm³ com a massa específica no estado fresco podemos ver uma tendência de redução da massa específica no estado endurecido como pode ser visto na figura 40. Segundo Medeiros (2016) e Oliveira (2018) a massa específica no estado endurecida é um pouco menor do que o valor no estado fresco, devido à saída de parte da água no processo de endurecimento do concreto.

Figura 40 Massa específica do concreto no estado endurecido e estado fresco



FONTE: AUTOR, 2023

4.3.4. Resistência à compressão axial

A atenuação dos resultados de resistência à compressão dos concretos CPB30AS, CPB50AS, CPB70AS, CSR30AS, CSR50AS, CSR70AS e CAS100 não alcançando o previsto, em relação aos concretos referência CPB100 e CSR100 como pode ser visto no gráfico da figura 41, a ocorrência de que os agregados sintéticos

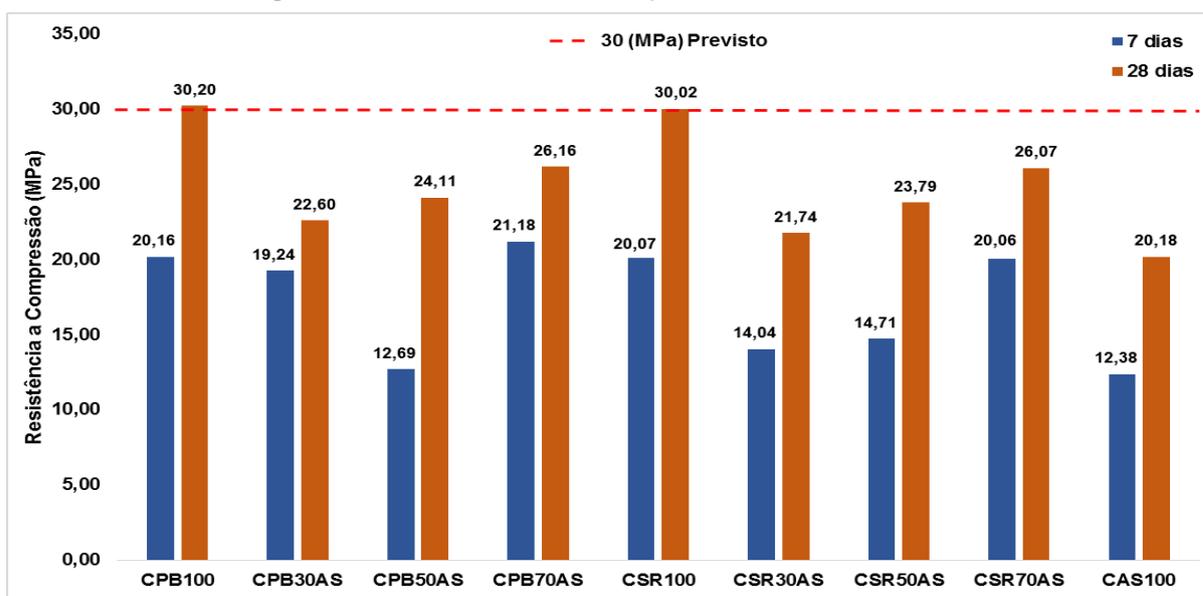
dispostos nesta pesquisa possui valores de massa específica 1,59g/cm³ inferior aos dos agregados como o seixo rolado de 2,41g/cm³ e a brita de 2,60g/cm³ como pode ser visto na Tabela 24. Segundo Rosário (2013) a massa específica e resistência são grandezas diretamente proporcionais, ou seja, quanto maior o valor da massa específica dos agregados, maior resistência estes terão, e conseqüentemente essas características são transmitidas aos concretos produzidos.

Tabela 24 Resistência à compressão simples aos 7 e 28 dias, abatimento, massa específica no estado endurecido aos 7 dias e classificação segundo a NBR 8953 (ABNT, 2015).

Concretos	Médias		Massa Específica (g/cm ³)	Abatimento (mm)	Classificação segundo a NBR 8953 (ABNT, 2015)
	7 dias	28 dias			
CPB100	20,16	30,20	2,14	70 ± 10	C30 S50
CPB30AS	19,24	22,60	1,85		CL20 S50
CPB50AS	12,69	24,11	1,95		CL25 S50
CPB70AS	21,18	26,16	1,97		CL25 S50
CSR100	20,07	30,02	2,08		C30 S50
CSR30AS	14,04	21,74	1,86		CL20 S50
CSR50AS	14,71	23,79	1,91		CL20 S50
CSR70AS	20,06	26,07	1,97		CL25 S50
CAS100	12,38	20,18	1,90		CL20 S50

FONTE: AUTOR, 2023

Figura 41 Resistência a compressão aos 7 e 28 dias



FONTE: AUTOR, 2023

Outros fatores para os valores de resistência a compressão não terem alcançado o previsto segundo Almeida (2012) a resistência mecânica do concreto é influenciada por vários fatores, tais como: granulometria, resistência dos agregados, tipo de cimento, relação água/cimento, tipo de solitação, velocidade do carregamento, idade do concreto, formas e dimensões do corpo-de-prova, dentre outras.

Constata-se ainda na figura 41, que quase não ocorreu acréscimo nos resultados de resistência à compressão dos concretos CPB30AS, CPB70AS, CSR30AS, CSR50AS, CSR70AS e CAS100 da idade de 07 para 28 dias, mostrando assim que estes exibem consolidação dos resultados dessa singularidade, previsto para os concretos leves.

A consolidação dos resultados de resistência à compressão à idade de 07 dias de acordo com Rosário (2013) assemelha-se a uma característica dos concretos produzidos com agregados leves, que de modo geral, aos 07 dias de idade os valores de resistência à compressão da matriz de cimento são superiores aos valores da resistência à compressão do agregado. A autora ainda complementa que, a resistência final do concreto não se beneficia na mesma proporção com o aumento da resistência à compressão da matriz de cimento. A figura 41 exemplifica a consolidação dos resultados de resistência à compressão dos concretos feitos com o agregado sintéticos.

Ao fazer uma comparação com Santos (2019), Rosário (2013) e Souza (2010) os resultados do ensaio de resistência a compressão, tiveram um aumento, em comparação ao concreto de Santos (2019), obteve valores entre 9,85 MPa e 12,38 MPa. No caso de Rosário (2013) variou entre 20,17 MPa e 23,19 MPa. Já para Souza (2010) foi entre 11,98 MPa a 40,34 MPa. E na pesquisa em questão sem o uso de superplastificante variou entre 20,18 MPa e 26,16 MPa.

A análise dos tipos de rupturas de corpos de provas de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018), é opcional. Onde a norma em questão salienta que convém investigar o tipo de ruptura quando a dispersão entre resultados de um mesmo exemplar for significativa, na pesquisa em questão não houve dispersão de resultados como mostrado na tabela 24. A fim de analisar todos os dados obtidos laboratório, a norma traz no (anexo A) um tópico muito interessante, que está ligado a habilidade de desempenho do ensaio, do que em relação as características do concreto em si. A

NBR 5739 (ABNT, 2018), cita que geralmente, quando ocorre uma dispersão significativa, a ruptura enquadra-se nos tipos F e G, ou seja, os tipos A, B, C, D e E são os desejáveis.

Figura 42 Tipos de ruptura do corpo de prova



FONTE: AUTOR, 2023

Segundo Neville e Brooks (2013) estrutura da pasta de cimento é complexa e existem diversas fontes de fissuras e descontinuidades, mesmo antes da aplicação do carregamento externo, cerca de 50% do volume da pasta de cimento pode ser constituída por poros, onde o forma exemplar seria quando as microfissuras que antecederam o ensaio, se encadeiam conforme a carga aplicada, formando uma fissura no molde de uma ampulheta como mostrado no corpo de prova CPB70AS, sinal de que a carga estava bem compartilhada, de acordo com Neville e Brooks (2013) os vazios podem ser considerados como causas de diminuição da resistência e de falhas ou fissuras nas estrutura, além de ser causador de microfissuração na interface com a pasta de cimento. O autor ainda completa que a fissura se alonga e ocorre a liberação da energia elástica armazenada no material. Caso essa energia seja suficiente para continuar a propagação da fissura, existe então a condição para a ruptura iminente de todo o material. Na tabela 25 está o resumo de todos os tipos de rupturas encontradas nos CPs da figura 42, onde os corpos de prova CPB100,

CAS100 e CAS100 que possuíam apenas um tipo de agregado graúdo em suas confecções, obtiveram o tipo C de ruptura, denominada de coluna com formação de cones, os concretos CPB30AS, CPB50AS e CSR70AS tiveram a ruptura do tipo D cônica e cisalhada, os CPs CPB70AS, CSR30AS e CSR50AS obtiveram rupturas do tipo B cônica com mais de uma partição e tipo E cisalhada respectivamente. Neville e Brooks (2013) explicam que as rupturas paralelas são causadas por uma tensão de tração localizada, normal à carga de compressão. As fissuras inclinadas ocorrem devido ao colapso causado pelo desenvolvimento de planos de cisalhamento. Os autores completam que deve ser destacado que as rupturas são formadas em dois planos paralelos ao carregamento, de modo que o corpo de prova se desintegra em fragmentos semelhantes a um pilar.

Tabela 25 Tipos de ruptura de corpos de prova conforme o (Anexo A) da NBR 5739 (ABNT, 2018)

Concretos	CPB 100	CPB 30AS	CPB 50AS	CPB 70AS	CSR 100	CSR 30AS	CSR 50AS	CSR 70AS	CAS 100
Tipo de Ruptura	Tipo C	Tipo D	Tipo D	Tipo B	Tipo C	Tipo B	Tipo E	Tipo D	Tipo C

FONTE: AUTOR, 2023

4.3.5. Resistência à tração por compressão diametral.

Ao contrapor os nove grupos de concretos na figura 43 avista-se que os de referência CPB100 e CSR100, fabricados com 100% de brita e seixo rolado respectivamente mostrou resultados de resistência à tração por compressão diametral maior aos confeccionados com o agregado sintéticos. Na tabela 26 são expressados os resultados individuais de cada CP's, assim como seu desvio padrão.

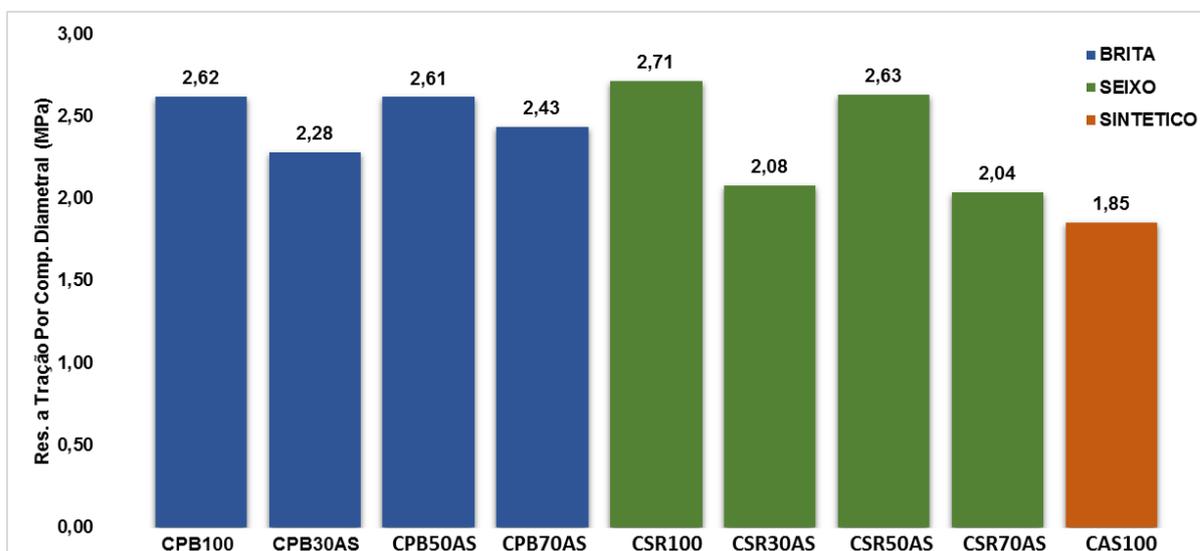
Tabela 26 Resistência à tração por compressão diametral.

Concretos	28 dias				DP
	CP1	CP2	CP3	Média	
CPB100	2,78	2,45	2,62	2,62	0,13
CPB30AS	2,27	2,30	2,28	2,28	0,01
CPB50AS	2,83	2,26	2,76	2,62	0,25
CPB70AS	2,53	2,35	2,42	2,43	0,07
CSR100	2,54	2,94	2,66	2,71	0,17
CSR30AS	2,02	2,12	2,09	2,08	0,04
CSR50AS	2,76	2,46	2,67	2,63	0,13
CSR70AS	1,91	2,12	2,08	2,04	0,09
CAS100	2,06	1,63	1,87	1,85	0,18

FONTE: AUTOR, 2023

Os concretos fabricados com 50% de agregado sintéticos e 50% de brita ou seixo (CPB50AS e CSR50AS) exibiram aos 28 dias, resultados de resistência à tração por compressão diametral muito próximos aos de referência (CPB100 e CSR100), com uma redução de 0,38% e 2,95% respectivamente como mostrados na figura 43.

Figura 43 Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.

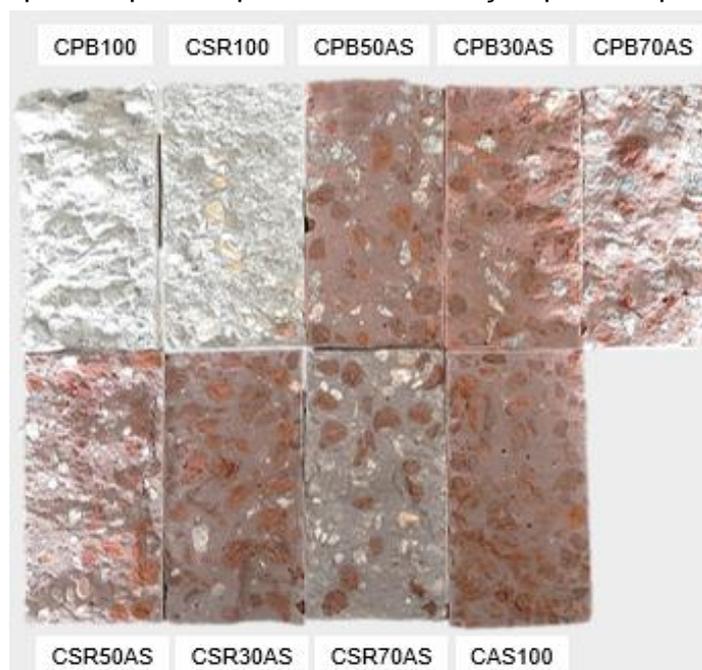


FONTE: AUTOR, 2023

As amostras confeccionadas com 100% de agregado sintético (CAS100), com essa exata idade, mostrou uma redução de 29,39% e 31,73% em comparação aos concretos de referência (CPB100 e CSR100). Os outros concretos com agregados sintéticos aos 28 dias, a redução dos resultados de resistência à tração por

compressão diametral, em comparação aos de referência (CPB100 e CSR100), foi disposto em 12,98%, 7,25%, 23,25% e 24,72%, para os concretos (CPB30AS, CPB70AS, CSR30AS e CSR70AS), respectivamente. A figura 44 exibi os corpos de provas após o ensaio de resistência à tração por compressão diametral para os nove grupos de concreto.

Figura 44 Corpos de prova após ensaio de tração por compressão diametral.



FONTE: AUTOR, 2023

Com relação ao concreto confeccionado com 100% de agregado sintético, vê-se que a média (1,85 MPa), não cumpriu os requisitos mínimos de 02 MPa para resistência à tração por compressão diametral da idade de 28 dias exigidos ASTM C330 (2017) como pode ser visto na tabela 26.

Ao fazer uma comparação com Rosário (2013) e Souza (2010) os resultados do ensaio de resistência a tração na flexão, tiveram um aumento, em comparação ao concreto da Rosário (2013), mostrou para substituição do seixo em 50% e 100% valores de 2,36 MPa e 1,74 MPa. Já para Souza (2010) foi de 3,29 MPa.

4.3.6. Resistência à tração na flexão

Ao comparar os nove grupos de concretos na figura 45 avista-se que os valores de (CPB70AS e CSR70AS) mostrou resultados de resistência à tração na flexão maior aos de referência (CPB100 e CSR100), fabricados com 100% de brita e seixo rolado teve um aumento de 4,36% e 7,01% respectivamente. Na tabela 27 são expressados os resultados individuais de cada CP's, assim como seu desvio padrão.

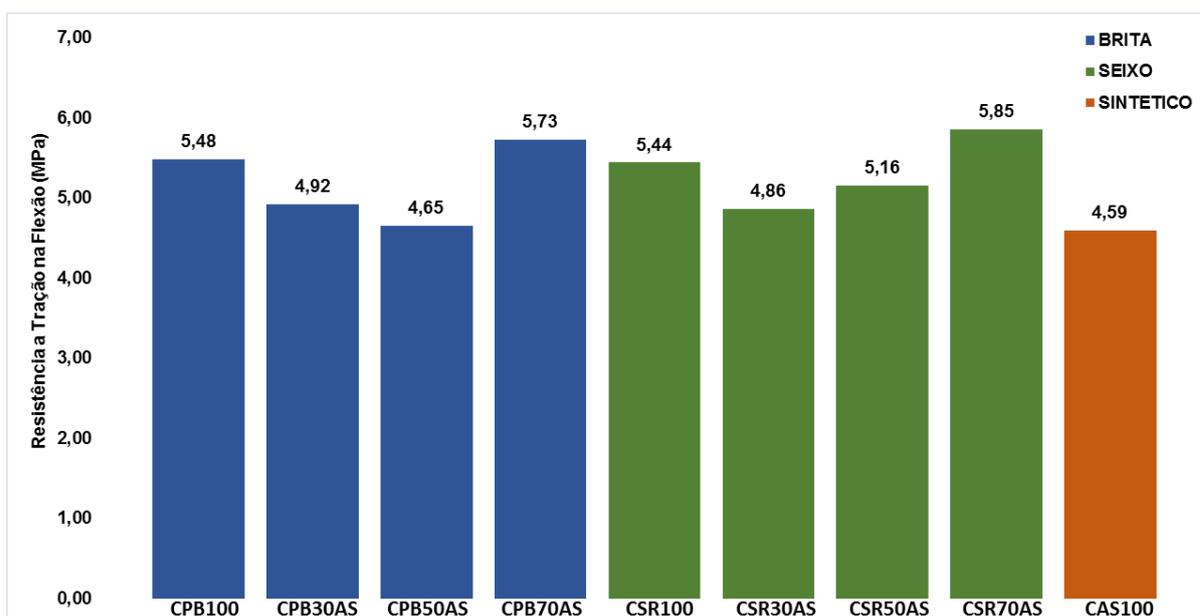
Tabela 27 Resistência à Tração na Flexão.

Concretos	28 dias				DP
	CP1	CP2	CP3	Média	
CPB100	4,89	5,81	5,76	5,49	0,42
CPB30AS	4,89	4,81	5,07	4,92	0,11
CPB50AS	4,35	4,78	4,83	4,65	0,22
CPB70AS	6,09	6,14	4,96	5,73	0,54
CSR100	5,35	5,27	5,71	5,44	0,19
CSR30AS	4,58	4,91	5,09	4,86	0,21
CSR50AS	5,71	4,53	5,25	5,16	0,49
CSR70AS	5,73	6,02	5,81	5,85	0,12
CAS100	4,60	4,50	4,68	4,59	0,07

FONTE: AUTOR, 2023

O concreto confeccionado com 100% de agregado sintético (CAS100), com idade de 28 dias, mostrou uma redução de 16,24% e 15,63% em comparação aos concretos de referência (CPB100 e CSR100) como pode ser visto no gráfico da figura 45. Os demais concretos com agregados sintéticos com a mesma idade, a redução dos resultados de resistência à tração na compressão diametral, em comparação aos de referência (CPB100 e CSR100), foi disposto em 10,22%, 15,15%, 10,66% e 5,15%, para os concretos (CPB30AS, CPB50AS, CSR30AS e CSR50AS), respectivamente.

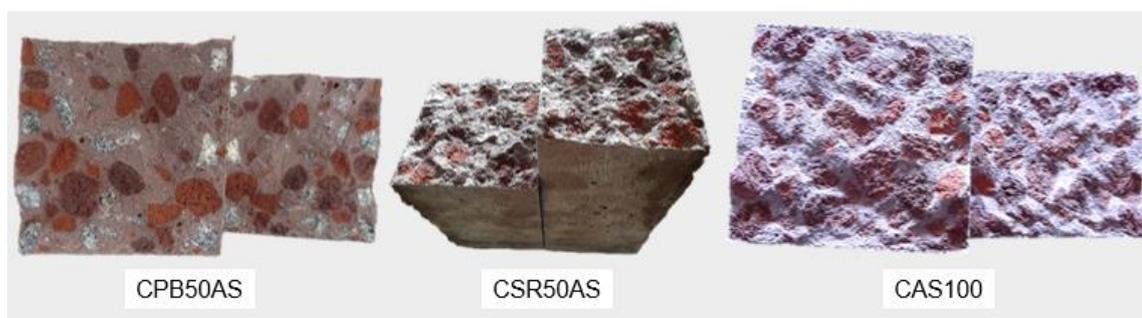
Figura 45 Resistência à Tração na Flexão aos 28 dias.



FONTE: AUTOR, 2023

A Figura 46 exibi os corpos de provas após o ensaio de resistência à tração na flexão para os nove grupos de concreto.

Figura 46 Corpos de prova após ensaio de tração na flexão



FONTE: AUTOR, 2023

Ao fazer uma comparação com Rosário (2013) os resultados do ensaio de resistência a tração na flexão, obtiveram um aumento significativo, onde o concreto da autora, mostrou para substituição do seixo em 50% e 100% valores de 3,4 MPa e 3,48 MPa.

4.3.7. Módulo de elasticidade estático

A Tabela 28 apresenta uma comparação entre os valores de módulo de deformação, de acordo com a NBR 8522 -1 (ABNT, 2021), e os resultados da resistência a compressão obtidos conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018). Segundo Almeida (2012) os concretos de maior resistência apresentam maiores módulos de elasticidade e menores deformações do que os concretos de menores resistências.

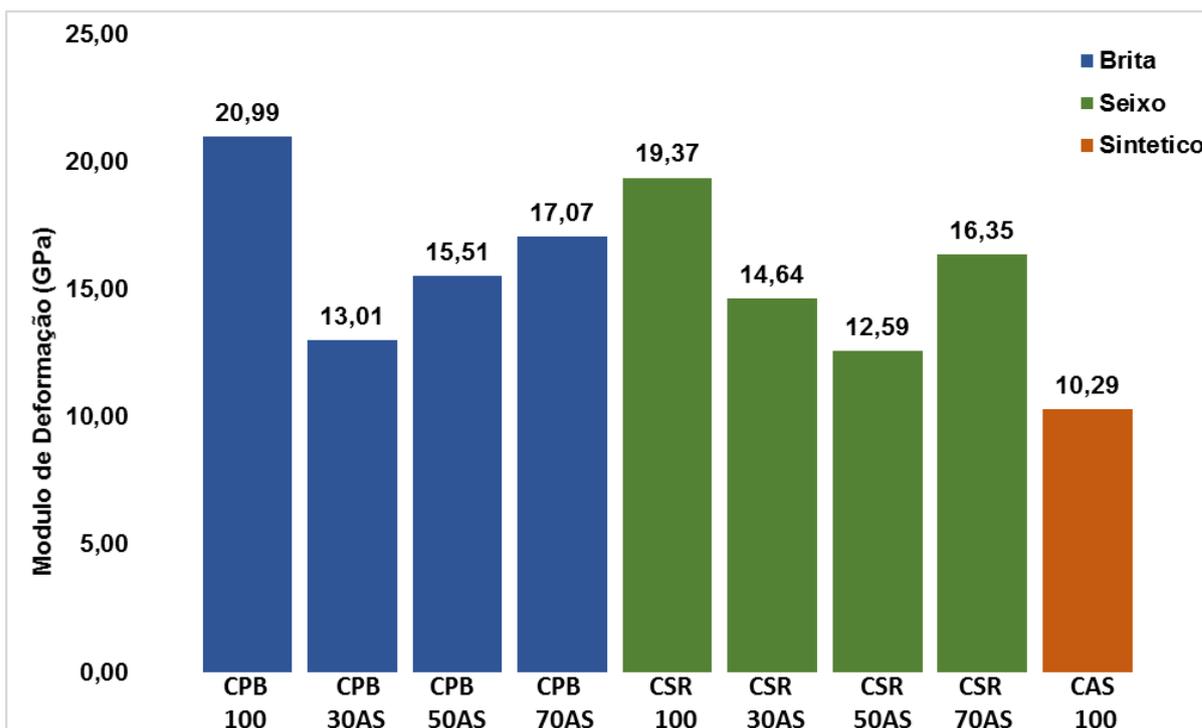
Tabela 28 Valores de módulo de deformação e resistência a compressão aos 28 dias

Concretos	Resistência a compressão aos 28 dias (MPa)	Modulo de Deformação (GPa)
CPB100	30,20	20,99
CPB30AS	22,60	13,01
CPB50AS	24,11	15,51
CPB70AS	26,16	17,07
CSR100	30,02	19,37
CSR30AS	21,74	14,64
CSR50AS	23,79	12,59
CSR70AS	26,07	16,35
CAS100	20,18	10,29

FONTE: AUTOR, 2023

No gráfico da figura 47 podemos visualizar um padrão onde se tem a grande quantidade de agregado sintético como e o caso das amostras (CPB30AS, CPB50AS, CSR30AS, CSR50AS e CAS100), obtiveram um resultado menor do que as demais, onde os agregados têm grande intervenção no diagrama tensão-deformação, especialmente os graúdos.

Figura 47 Resultados de módulo de deformação aos 28 dias



FONTE: AUTOR, 2023

Almeida (2012) explica essa diminuição mostrando que a porosidade é uma das características do agregado graúdo que mais afeta o módulo de elasticidade do concreto, pois a porosidade do agregado determina a rigidez do concreto. Onde absorção de água do agregado sintético e de 21%, obtido em Laboratório.

Segundo Almeida (2012) as variações normais na porosidade do agregado não afetam a resistência de concretos de baixa ou média resistência. Isso mostra que nem todas as variáveis controlam a resistência e o módulo de elasticidade da mesma forma. O autor ainda completa que a dimensão, a forma, a textura superficial, a distribuição granulométrica e a composição mineralógica dos agregados influenciam na fissuração na zona de transição na interface, e assim, afeta a forma da curva tensão-deformação, e conseqüentemente, o módulo de elasticidade.

4.3.8. Carbonatação Natural

Como visto em todas as amostras tiveram o pH de 12,5 a 13 com colorações em carmin nas amostras CPB100, CSR100, CPB70AS, CSR70AS, que foram as amostras que tiveram a menor taxa de substituição com agregado sintético entre 0 a

30%, as amostras CPB50AS, CPB30AS, CSR50AS, CSR30AS, CAS100 não tiveram uma estagnação na cor como as outras, pois o agregado sintético teve um excesso de material pulverulento, podemos observar que os agregados sintéticos em sua maioria não tiveram sua coloração sobreposta assim como a brita e o seixo.

Foram realizadas medições em cada lado de 1 corpo de prova para cada traço, totalizando 40 medições, obtendo a média em milímetro apresentada na figura 48, mas, optou-se por apresentar apenas uma imagem que correspondente a primeira face rompida dos corpos de prova para ilustrar a baixa carbonatação e evitar a repetição de informações.

Os valores médios das 40 medidas de espessura de carbonatação medidos nos CPs com 90 dias de idade mostram a baixa carbonatação em todos os traços. Observando que a relação a/c foram de 0,51 em todos os traços, em sua dissertação Ferreira (2013) explica que os melhores desempenhos foram verificados nos concretos com relação a/c igual a 0,40, seguidos dos concretos com relação a/c 0,55 e 0,70, respectivamente, sendo este um comportamento esperado.

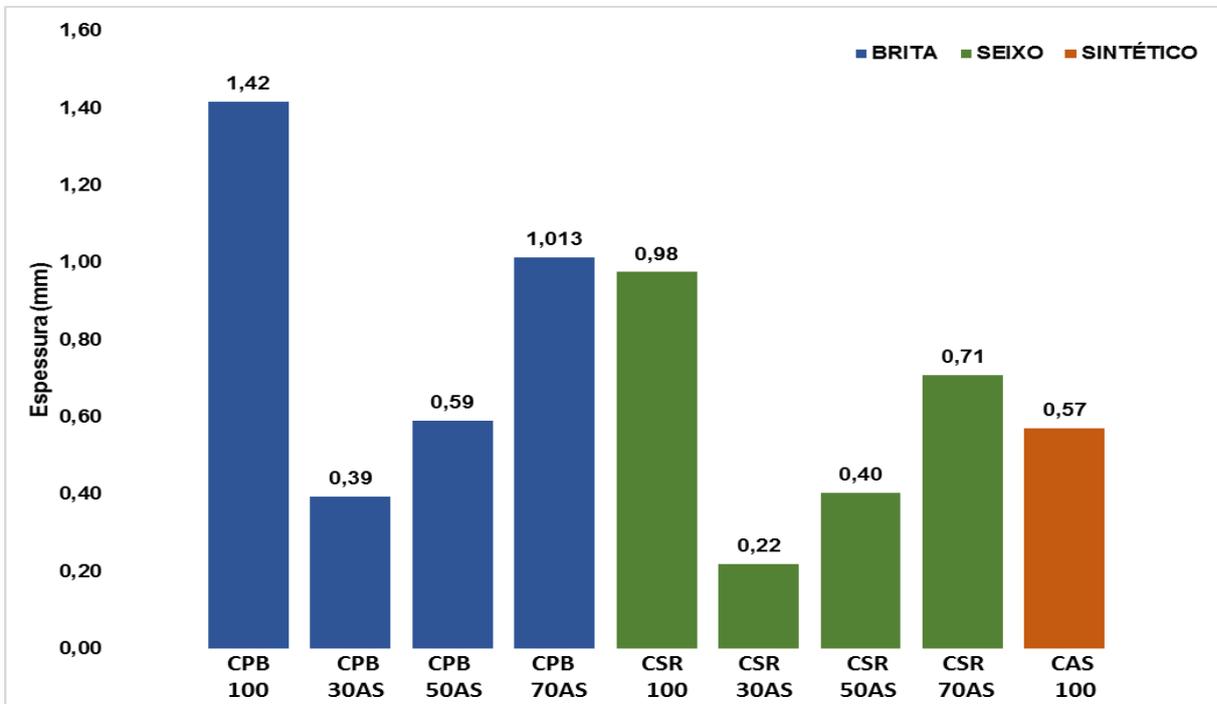
Nesse contexto podemos observar um padrão em que tanto na coloração quanto nas medições de espessura observou que CPB100, CSR100, CPB70AS, CSR70AS se mantiveram maior em comparação ao de baixa substituição de agregados que foram CPB50AS, CPB30AS, CSR50AS, CSR30AS, CAS100. Bolina, Tutikian e Helene (2019) justifica que com maior reserva alcalina, portanto, com menor profundidade de carbonatação.

A carbonatação através do método natural são ainda pouco utilizados segundo Possan (2010) as reações decorrentes da difusão do CO₂ nos poros com os compostos alcalinos dos produtos de hidratação são relativamente lentas nas estruturas de concreto em dado ambiente. Possan (2010) ainda completa que a concentração no ar é baixa (0,04% em atmosferas normais), resultando num processo que, muitas vezes, torna inviável o tempo de espera para a determinação da velocidade de carbonatação, que pode levar até 20 anos.

Com isso, conclui-se que o ensaio de carbonatação natural é regido pela relação água/cimento e tempo de exposição ao CO₂, tendo em vista que o a/c de todos os traços foram de 0,51 e o tempo de ensaio foi de 90 dias e o local foi em área urbana, era um comportamento esperado. Onde os cps que tiveram em sua composição a

brita variaram de 0,39 a 1,42 mm e os com seixo de 0,22 a 0,98 mm e o 100% sintético foi de 0,57mm como pode observar na figura 48.

Figura 48 Médias das espessuras das amostras de carbonatação natural



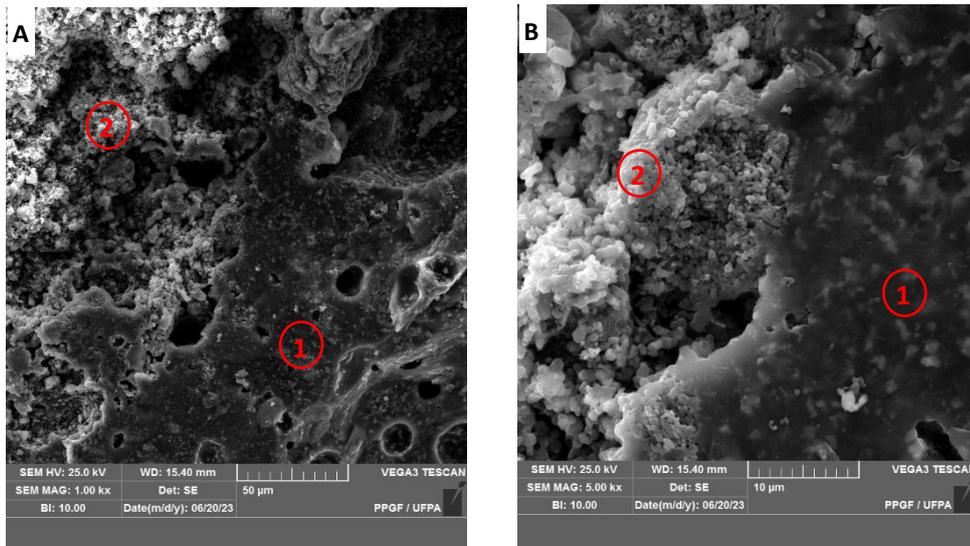
FONTE: AUTOR, 2023

4.3.9. Análise Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Por intermédio das micrografias tendo a finalidade de analisar a área de interação entre a pasta de cimento e o agregado. Foram identificadas nas figuras 49, 50, 51, 52 e 53, os espaços mais claros das micrografias como a massa cimentícia, o ponto mais escuro, o agregado sintético, no meio das duas está posicionada a zona de transição e alguns pontos porosos do agregado.

Na figura 49 temos a análise do concreto (CAS100) onde ficou concentrada somente no agregado sintético, é possível observar que a amostra possui agregado sintético no ponto (1), e os poros do agregado sintético no ponto (2), onde na faixa de ampliação 5000X apresentou óxido de silício, sódio, alumínio e ferro em sua composição química com maior percentual.

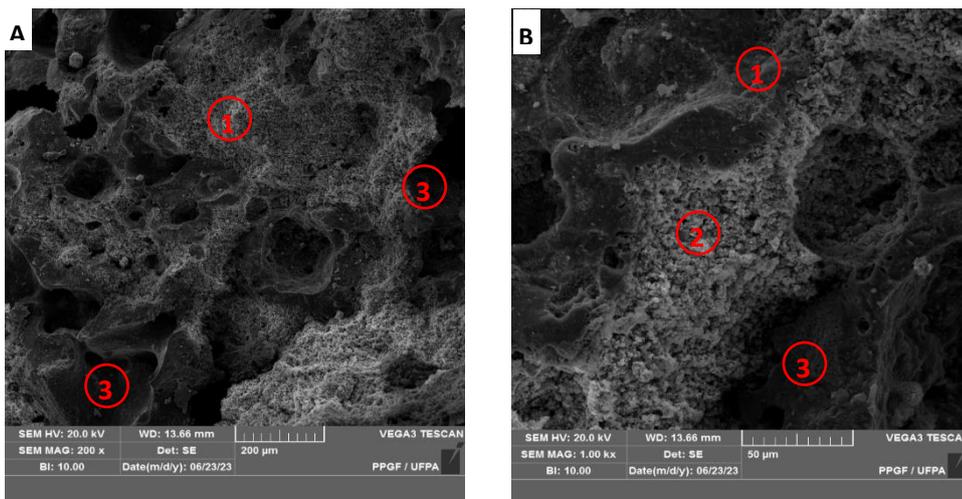
Figura 49 Concreto CAS100 (a) MEV a 1Kx e (b) MEV a 5Kx



FONTE: AUTOR, 2023

A Figura 50, a e b mostram as micrografias obtidas por MEV do concreto (CSR70AS), onde essa análise ficou concentrada somente no agregado sintético, é possível observar que a amostra possui em seu interior a pasta cimentícia no ponto (2) com agregado sintético no ponto (1), e os poros do agregado sintético no ponto (3), onde na faixa de ampliação 1000X apresentou oxido de silício, sódio, alumínio e ferro em sua composição química com maior percentual.

Figura 50 Concreto CSR70AS (a) MEV a 200x e (b) MEV a 1Kx

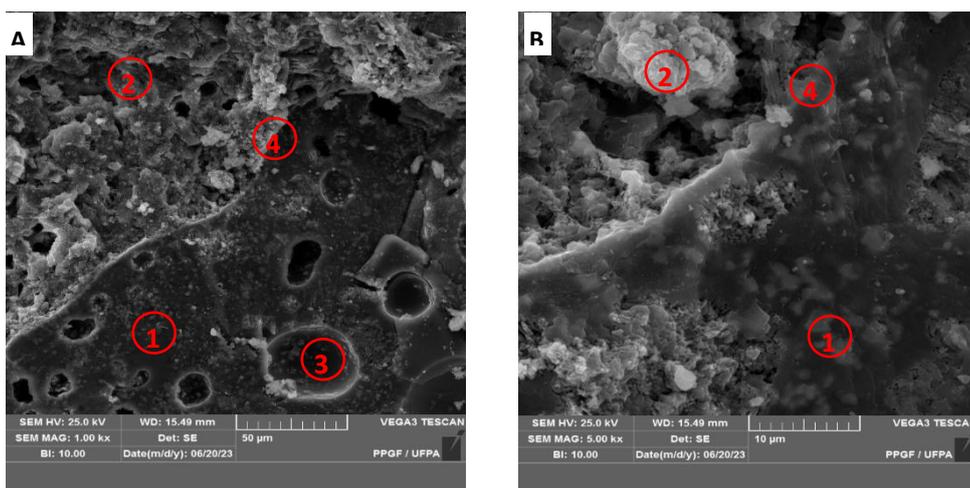


FONTE: AUTOR, 2023

A Figura 51, a e b mostram as micrografias obtidas por MEV do concreto (CAS100), é possível observar que a amostra possui um bom cobrimento da massa

cimenticia no ponto (2) com agregado sintético no ponto (1), e entre elas está o ponto (4) a zona de transição, contudo existem poros do agregado sintético no ponto (3), onde na faixa de ampliação 5000X apresentou oxido de silício, sódio, alumínio e ferro em sua composição química com maior percentual.

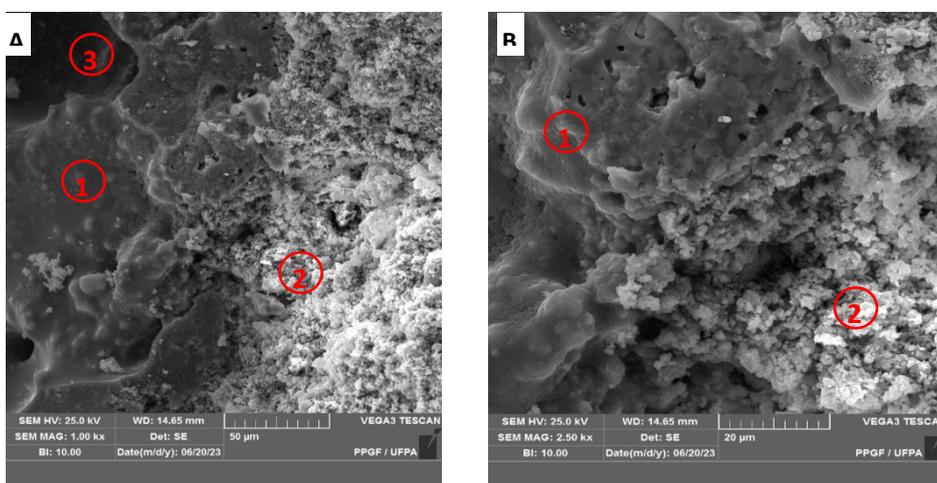
Figura 51 Concreto CAS100 (a) MEV a 1Kx e (b) MEV a 5Kx



FONTE: AUTOR, 2023

A Figura 52, a e b mostram as micrografias obtidas por MEV do concreto (CPB50AS), é possível observar que a amostra possui um bom cobertura da pasta cimenticia no ponto (2) com agregado sintético no ponto (1), contudo existem poros do agregado sintético no ponto (3), onde na faixa de ampliação 2500X apresentou oxido de titânio, sódio, alumínio e ferro em sua composição química com maior percentual.

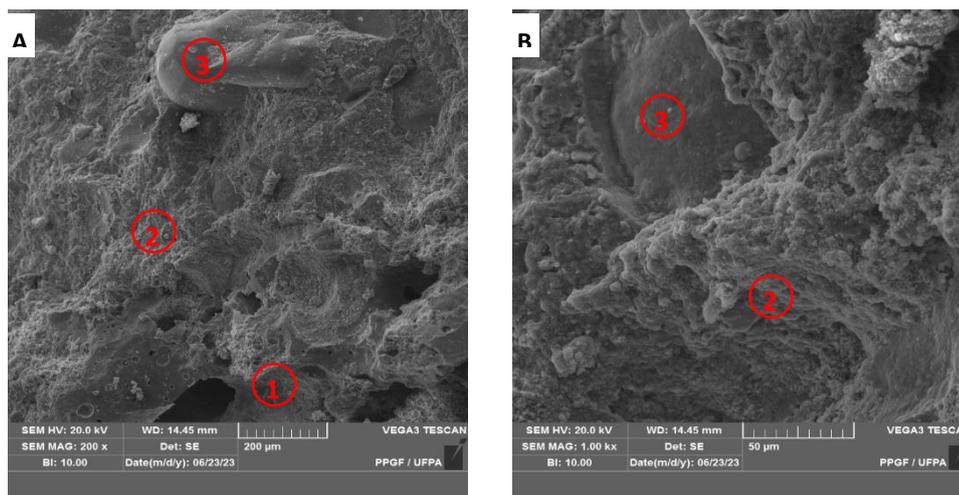
Figura 52 Concreto CPB50AS (a) MEV a 1Kx e (b) MEV a 2Kx



FONTE: AUTOR, 2023

A Figura 53, a e b mostram as micrografias obtidas por MEV do concreto (CSR70AS), é possível observar que a amostra possui um bom cobrimento da pasta cimentícia no ponto (2) com agregado sintético no ponto (1), e o agregado graúdo seixo rolado no ponto (3), onde na faixa de ampliação 1000X apresentou óxido de ferro, cálcio, sílica e carbono em sua composição química com maior percentual.

Figura 53 Concreto CSR70AS (a) MEV a 200x e (b) MEV a 1Kx



FONTE: AUTOR, 2023

4.4. CONCLUSÃO

O estudo em questão atingiu o objetivo principal a que se propôs, uma análise no que concerne no uso de agregados graúdos sintéticos com a reutilização do resíduo da bauxita, com uma ínfima proporção em peso de argila e areia e a aplicação destes na confecção de concretos. Em conformidade com os objetivos pré-estabelecidos, o programa experimental aderido apresentou-se congruente para a perquirição das características e propriedades dos concretos fabricados com uso do agregado sintético com 85% de resíduo da bauxita e calcinados a 1000°C. O agregado em análise atendeu as condições impostas por normas vigentes, retratando resultados satisfatórios e aproximados aos de agregados comumente usufruídos na confecção de concretos.

Os concretos fabricados são aplicados no âmbito da construção civil, visto que exibem resultados oportunos tendo em vista a temperatura de calcinação do agregado base do estudo e a não utilização de aditivos superplastificantes, especialmente no que se atribui aos resultados de ensaios mecânicos e no estado fresco.

Para todos os concretos foi realizado ensaio de carbonatação natural que regido pela relação água/cimento e tempo de exposição ao CO₂, tendo em vista que o a/c de todos os traços foram de 0,51 e o tempo de ensaio foi de 90 dias e o local foi em área urbana, a baixa carbonatação era um comportamento esperado. Onde os concretos que tiveram em sua composição a brita (CPB100, CPB30AS, CPB50AS e CPB70AS) variaram de 0,39 a 1,42 mm e os com seixo (CSR100, CSR30AS, CSR50AS e CSR70AS) de 0,22 a 0,98 mm e o 100% agregado sintético (CAS100) foi de 0,57mm.

Nas especificidades dos concretos no estado fresco, todos os nove grupos de concreto confeccionados mostraram coesão, temperatura, plasticidade e consistência adequadas, viabilizando a execução dos corpos-de-prova. Destaca-se que nos concretos presenciou a inexistência dos fenômenos de segregação dos agregados e da exsudação. Os resultados de massa específica divergiram entre 2,04 g/cm³ e 2,32 g/cm³. O concreto com 100% de agregado sintético (CAS100) mostrou uma redução de 11,86% e 10,89% em comparação aos concretos de referência (CPB100 e CSR100) respectivamente. Ao comparar a massa específica no estado endurecido que variou de 1,85 g/cm³ a 2,14 g/cm³ com a massa específica no estado fresco podemos ver uma tendência de redução da massa específica no estado endurecido.

Os resultados de resistência à compressão axial (20,18 MPa), tração por compressão diametral (1,85 MPa) e tração na flexão (4,59 MPa) do concreto confeccionado com 100% de agregado com resíduos da bauxita (CAS100), foram apontados como apropriados e compatíveis com a temperatura de 1000°C utilizadas obtendo a classificação (CL20 S50). Entretanto, os resultados ficaram abaixo dos alcançados para os concretos de referência (CPB100 e CSR100). Cabe ressaltar os concretos de 50% de agregado sintético (CPB50AS e CSR50AS) que alcançaram valores de resistência à compressão axial (24,11 e 23,79 MPa) respectivamente.

Os resultados do módulo de deformação dos concretos fabricado com 100% do agregado sintético (CAS100) os resultados ficaram abaixo (10,29 GPa) aos alcançados para os concretos de referência (CPB100 e CSR100).

Com as análises realizadas, conclui-se que o agregado sintético composto em 85% com resíduo da bauxita detém disponibilidade técnica, tornando-se usuais em concretos leves com finalidades estruturais.

4.5. REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI. **Building Code Requirements for Structural Concrete**. ACI Committee 318. Detroit, 2019.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. **Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete**. ACI – 211.1-91. ACI Manual of Concrete Practice, 2002.

AIRES, M. F. M.; PAIVA, A. E. M. **Utilização de agregados graúdos sintéticos de lama vermelha e argila em concretos**. In: Anais 58º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, Bento Gonçalves, RS, 2014.

ALMEIDA, S. M. **Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/ISMS-96DR6D>. Acesso em: maio, 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM - C330/C330M, 2017 – **Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete**. USA.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122: **Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2022.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522 -1: **Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação Parte 1: Módulos estáticos à compressão**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953: **Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9833: **Concreto Fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico**. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768-1: **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12142: **Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 16697: **Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSUNÇÃO, J. W. **Concreto Leve Autoadensável: avaliação da influência da argila expandida no processo de dosagem e na e propriedades do concreto**. 2016. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

BATTAGIN, I. L. S; BATTAGIN, A. F; SBRIGHI NETO, C. **A norma técnica de reação álcali-agregado faz seu primeiro aniversário**. Concreto & Construções, São Paulo. n. 54 p. 34-47, abr.-jun. 2009.

BOGAS, A. GOMES, A. **Compressive behavior and failure modes of structural lightweight aggregate concrete – Characterization and strength prediction**, Materials and Design, v.46, pp.832–834, 2013

BOLINA, F.L.; TUTIKIAN, B.F.; HELENE, P.R.L. **Patologia de estruturas**. Oficina de Textos, São Paulo, 2019.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

CHANDRA, S. BERNTSSON, L. **Lightweight aggregate concrete: Science, technology, and applications**. Noyes Publications, USA, p.409, 2002.

COSTA, D. S. da, [et. al.]. **Valoração de resíduos industrial de lama vermelha em material compósito**. Fórum internacional de resíduos sólidos, 9º, 2018, Porto Alegre-RS, 5p, 2018.

COSTA, G. V. GOMES, G. A. M. **Uso do concreto leve na construção civil**. UNIS, 2020. Disponível em: <<http://repositorio.unis.edu.br/bitstream/prefix/1400/1/Gilmar%20Veloso%20da%20Costa.pdf>>. Acesso em: 27 de abr. de 2023.

DOMAGATA, L., **The effect of lightweight aggregate water absorption on the reduction of water-cement ratio in fresh concrete**. *Procedia Engineerin*, v. 108, pp. 206-2013, 2016.

FERREIRA, M. B. **Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição**. 2013. 197 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

GERMAN INSTITUTE FOR STANDARDIZATION. DIN EN 14630:2007. **Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method**. Germany.

GOULARTE, R. M. **Módulo de elasticidade de materiais lamelares determinados com a técnica de indentação instrumentada**. 2014. TCC (Graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/127454>. Acesso em: maio. 2023.

INTERNATIONAL STANDARD. ISO 1920-12:2015 – **Testing of concrete – Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete – Accelerated carbonation method**. Geneva, Switzerland.

KARAHAN, O. HOSSAIN, K. Özbay, E. LACHEMI, M. SANCAK, E. **Effect of metakaolin content on the properties self-consolidating lightweight concrete**. *Construction and Building Materials*. [S.l.], v. 31, p. 320-325, June 2012.

MAGALHÃES, F. C. **Estudo probabilístico da resistência à compressão e da resistência à tração na flexão dos concretos utilizados na construção do dique seco do estaleiro rio grande, no superporto, em Rio Grande-RS**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2009.

MEDEIROS, M. **Estudo de argamassas de revestimento com resíduo de scheelita**. 2016. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3 ed. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. PORTO ALEGRE: Bookman, 2013, 448 p.

OLIVEIRA, C. F. **Análise das propriedades do concreto quando utilizado após início de pega: tempo de utilização de concreto estrutural vencido**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de pós-graduação em construção civil, Belo Horizonte, 2018.

OZGUVEN.A., GUNDUZ L., **Examination of effective parameters for the production of expanded clay aggregate**, Cement and Concrete composites, v.34,pp. 781-787, 2012.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 2010. 265 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RECENA, F. A. P. **Dosagem e controle de qualidade de concretos convencionais de Cimento Portland**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2017. 260p.

RODRIGUES, P. **Estruturas e Bim**. Disponível em: <https://estruturasebim.com/2022/05/06/o-que-e-traco-de-concreto/>, [S.l.]: 2022. Acesso em: 30 de maio de 2023.

ROSÁRIO, K. A. **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.

ROSSIGNOLO, J.A. **Influência Avaliação da zona de transição interfacial pasta agregado leve em concretos com sílica ativa e látex**. Revista Matéria, v. 12, n. 3, 2007.

SANTOS, D. H. **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.

SANTOS, J. A. V. **Concretos com agregado graúdo a partir dos resíduos de cerâmica vermelha**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Programa de Profissional em Processos Construtivos e Saneamento Urbano (PPCS), Belém, 2015.

SOUZA, J. **Estudo e avaliação do uso de resíduos do processo Bayer como matéria prima na produção de agregados sintéticos para a construção civil**. 2010. Tese. (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia), Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

SOUZA, P. H. R. [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. mar. 2019.

TUTIKIAN, B.; HELENE, Paulo. **Dosagem dos Concretos de Cimento Portland**. In: Geraldo C. Isaia. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011, v. 2, p. 1283-1325. Disponível em:< <https://www.phd.eng.br/wpcontent/uploads/2014/07/lc56.pdf>>. Acesso em: 7 jun. 2023.

5- CONCLUSÃO GERAL

A presente pesquisa propôs uma análise no que concerne a fabricação de agregados graúdos sintéticos com a reutilização do resíduo da bauxita, com uma ínfima proporção em peso de argila e areia e a aplicação destes na confecção de concretos. Em conformidade com os objetivos pré-estabelecidos, o programa experimental aderido apresentou-se congruente para a perquirição das características e propriedades dos concretos fabricados com uso do agregado sintético com 85% de resíduo da bauxita e calcinados a 1000°C. O agregado em análise atendeu as condições impostas por normas vigentes, retratando resultados satisfatórios e aproximados aos de agregados comumente usufruídos na confecção de concretos.

As análises realizadas confirmaram que o resíduo da bauxita detém disponibilidade técnica para moldagem de agregados sintéticos tornando-se usuais em concretos leves com finalidades estruturais. Os concretos fabricados são aplicados no âmbito da construção civil, visto que exibem resultados oportunos tendo em vista a temperatura de calcinação do agregado base do estudo e a não utilização de aditivos superplastificantes, especialmente no que se atribui aos resultados de ensaios mecânicos e no estado fresco.

Para todos os concretos foi realizado ensaio de carbonatação natural que regido pela relação água/cimento e tempo de exposição ao CO₂, tendo em vista que o a/c de todos os traços foram de 0,51 e o tempo de ensaio foi de 90 dias e o local foi em área urbana, a baixa carbonatação era um comportamento esperado. Onde os concretos que tiveram em sua composição a brita (CPB100, CPB30AS, CPB50AS e CPB70AS) variaram de 0,39 a 1,42 mm e os com seixo (CSR100, CSR30AS, CSR50AS e CSR70AS) de 0,22 a 0,98 mm e o 100% agregado sintético (CAS100) foi de 0,57mm.

O resíduo da bauxita não é quimicamente inerte, onde é inevitável uma modificação química para consolidar os compostos, para confirmação foi realizado o ensaio de índice de atividade pozolânica (IAP), com a incorporação da argila proveio abaixo do requisito físico com resistência à compressão média de 3,44 MPa, considerado adições minerais inertes.

O agregado sintético foi submetido ao ensaio de álcali-agregado (RAA) a reação química que ocorre em argamassas ou concretos envolvendo cimento Portland e agregados graúdos ou miúdos, que, sob certas condições, pode causar expansão

deletéria. Onde a expansão das barras de argamassa aos 30 dias ficou entre 0,19 e 0,40% tendo as características de potencialmente reativo Grau R1. Se torna desprezível em ambientes secos e não maciços cuja menor dimensão da seção transversal é menor que 1 m e reatividade mínima para elementos maciços cuja menor dimensão da seção transversal é igual ou superior que 1 m.

A temperatura empregada de 1000°C se demonstrou como aceitável para as reações em estado sólido, na qual a fase mulita não é gerada segundo os autores referenciados nesta pesquisa. Quanto mais geração de mulita, resistência dos agregados sintéticos será maior. Tendo essa afirmação como base, pode-se analisar que o agregado sintético não atingiu os parâmetros recomendados pela norma NBR 16974 (ABNT, 2022) de Abrasão “Los Angeles” alcançando 64,60%.

Nas especificidades dos concretos no estado fresco, todos os nove grupos de concreto confeccionados mostraram coesão, temperatura, plasticidade e consistência adequadas, viabilizando a execução dos corpos-de-prova. Destaca-se que nos concretos presenciou a inexistência dos fenômenos de segregação dos agregados e da exsudação. Os resultados de massa específica divergiram entre 2,04 g/cm³ e 2,32 g/cm³. O concreto com 100% de agregado sintético (CAS100) mostrou uma redução de 11,86% e 10,89% em comparação aos concretos de referência (CPB100 e CSR100) respectivamente. Ao comparar a massa específica no estado endurecido que variou de 1,85 g/cm³ a 2,14 g/cm³ com a massa específica no estado fresco podemos ver uma tendência de redução da massa específica no estado endurecido.

Os resultados de resistência à compressão axial (20,18 MPa), tração por compressão diametral (1,85 MPa) e tração na flexão (4,59 MPa) do concreto confeccionado com 100% de agregado sintético (CAS100), foram apontados como apropriados e compatíveis com a temperatura de 1000°C utilizadas obtendo a classificação (CL20 S50). Entretanto, os resultados ficaram abaixo dos alcançados para os concretos de referência (CPB100 e CSR100). Cabe ressaltar os concretos de 50% de agregado sintético (CPB50AS e CSR50AS) que alcançaram valores de resistência à compressão axial (24,11 e 23,79 MPa) respectivamente.

Os resultados do módulo de deformação dos concretos fabricado com 100% do agregado sintético (CAS100) os resultados ficaram abaixo (10,29 GPa) aos alcançados para os concretos de referência (CPB100 e CSR100).

5.1 PROPOSTA PARA PESQUISAS FUTURAS

Durante o processo de execução desta pesquisa, foi necessário modificar metodologias pré-estabelecidas e uso de maquinários, onde se optou por fazer o ensaio de carbonatação natural em menos dias pelo prazo de entrega da pesquisa e a execução do ensaio de RAA que seria a mais de 30 dias visando um resultado mais preciso, se limitou ao que a norma estabelece. O forno precisou ser adaptado, mas seguindo todos os tempos já elaborados se chegou a resultados favoráveis. A seguir mostram-se algumas propostas para realização de pesquisas futuras:

a) Utilizar na ação da queima do agregado sintético, um forno rotativo, visando um aquecimento homogêneo;

b) Realizar um estudo a longo prazo, da interação entre os elementos como agregados e o cimento Portland, por meio do RAA com ensaio pelo método de longa duração dos prismas de concreto.

c) Analisar a longo prazo, a carbonatação do concreto com a penetração do CO₂ por meio da carbonatação acelerado com uso da câmara.

d) Usar o cimento CII-Z-32 na confecção dos concretos com o agregado com resíduo da bauxita. Ao qual estava previsto no programa experimental inicial da pesquisa em questão.

5- REFERÊNCIAS GERAIS

ABAL. **Relatório da sustentabilidade da indústria de alumínio**, 2019. Disponível em: < www.abal.org.br>. Acesso em: 10 jun. 2020.

ABRÃO, P. C. R. A. **O uso de pozolanas como materiais cimentícios suplementares: disponibilidade, reatividade, demanda de água e indicadores ambientais**. São Paulo, 2019.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI. **Building Code Requirements for Structural Concrete**. ACI Committee 318. Detroit, 2019.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. **Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete**. ACI – 213R-87. ACI Manual of Concrete Practice, 1997.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. **Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete**. ACI – 211.1-91. ACI Manual of Concrete Practice, 2002.

AIRES, M. F. M.; PAIVA, A. E. M. **Utilização de agregados graúdos sintéticos de lama vermelha e argila em concretos**. In: Anais 58º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, Bento Gonçalves, RS, 2014.

ALCOA, **Brasil**, 2021. Disponível em: < <https://www.alcoa.com/brasil/pt>>. Acesso em: 23 jun. 2023.

ALMEIDA, S. M. **Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/ISMS-96DR6D>. Acesso em: maio, 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM - C330/C330M, 2017 – **Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete**. USA.

ANDRIOLO, F. R. **Observação de estruturas de concreto: Validade quanto à ocorrência da reação alkali-agregado**, Anais do Simpósio sobre Reatividade Alkali-Agregado em Estruturas de Concreto, Goiânia, GO, p. 14, 1997.

ARNDT, J. A.; SOUZA, J.; BIANCHINI, M. **Influência do índice de forma do agregado graúdo na resistência a compressão do concreto**. In: 49º CBC 2007 – Congresso Brasileiro do Concreto. Setembro 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5751: **Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122: **Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: **Agregados para concreto — Especificação**. Rio de Janeiro, 2022.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522 -1: **Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação Parte 1: Módulos estáticos à compressão**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953: **Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9833: **Concreto Fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico**. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9939: **Agregado graúdo – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768-1: **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768-3: **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 3: Ensaio de caracterização**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12142: **Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: **Concreto - Materiais pozolânicos — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 12655: **Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577 - 1: **Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577 - 2: **Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 2: Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577 - 4: **Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15900-1: **Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16372: **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16606: **Cimento Portland — Determinação da pasta de consistência normal**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16607: **Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: **Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16916: **Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16917: **Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16972: **Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16973: **Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16974: **Agregados - Ensaio de resistência ao impacto e à abrasão Los Angeles**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17054: **Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 11 -2: **Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxidos principais por complexometria Parte 2**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 13: **Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO – ANEPAC. **Mercado: Perspectivas para o Setor de Agregados**. Disponível em: Acesso: 13 de abril 2017.

ASSUNÇÃO, J. W. **Concreto Leve Autoadensável: avaliação da influência da argila expandida no processo de dosagem e na e propriedades do concreto**. 2016. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

BACELLAR, A. A., **Competitividade da alvenaria estrutural na cidade de Manaus**. Dissertação (Mestrado), CPG-FT/FAM, Manaus, AM, 2001.

BATTAGIN, Arnaldo Forti. **Uma Breve História do Cimento Portland**. 2019. Disponível em: <<https://abcp.org.br/cimento/historia/>>. Acesso em: 22 jan. 2020

BATTAGIN, I. L. S; BATTAGIN, A. F; SBRIGHI NETO, C. **A norma técnica de reação álcali-agregado faz seu primeiro aniversário**. Concreto & Construções, São Paulo. n. 54 p. 34-47, abr.-jun. 2009.

BOGAS, A. GOMES, A. **Compressive behavior and failure modes of structural lightweight aggregate concrete – Characterization and strength prediction**, Materials and Design, v.46, pp.832–834, 2013

BOLINA, F.L.; TUTIKIAN, B.F.; HELENE, P.R.L. **Patologia de estruturas**. Oficina de Textos, São Paulo, 2019.

BOUSSEN, S. BENNOUR, A. **Characteristics and industrial application of the lower cretaceous clay deposits (Buhedma formation), southeast Tunisia: Potential use for the manufacturing of ceramic tiles and bricks**, Applied Clay Science, v. 123, pp. 210-221, 2016.

CABRAL, E. M., SÁ, R. J., VIEIRA, R. K., VASCONCELOS, R. P. **Utilização de massas cerâmicas na produção de agregado sintético de argila calcinada para uso em concreto**, Cerâmica, v. 54, pp 404-410, 2008.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

CARLETE, B. A.; QUEIRÓZ, F. C.; SILVA, H; V. **Caracterização de concreto constituído de agregados minerais provenientes de resíduos grosseiros de rochas ornamentais**. In: aNAIS DA JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 25. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 5p, 2017.

CHANDRA, S. BERNTSSON, L. **Lightweight aggregate concrete: Science, technology, and applications**. Noyes Publications, USA, p.409, 2002.

CELIK, H. **Technological characterization and industrial application of two Turkish clays for the ceramic industry**, Applied Clay Science, 50, pp. 245-254, 2010.

CHAGAS, G.M; RESENDE, E.C; GUERREIRO, M.C. **Preparo de Material a partir de Lama Vermelha Impregnada com Fe(III) e Aplicação em Processos Oxidativos Avançados**. Revista Virtual de Química, Lavras-MG, Brasil, jan, 2018. 1984-6835.

COSTA, D. S. da, [et. al.]. **Valoração de resíduos industrial de lama vermelha em material compósito**. Fórum internacional de resíduos sólidos, 9º, 2018, Porto Alegre-RS, 5p, 2018.

COSTA, G. V. GOMES, G. A. M. **Uso do concreto leve na construção civil**. UNIS, 2020. Disponível em: <<http://repositorio.unis.edu.br/bitstream/prefix/1400/1/Gilmar%20Veloso%20da%20Costa.pdf>>. Acesso em: 27 de abr. de 2023.

COSTA, L. F. **Estudo do bagaço da cana de açúcar como material para construção civil no estado de Pernambuco – sistema ternário com metacaulim e cal hidratada**. 2017. Dissertação. (Mestre em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2017.

DA SILVA, T. C. G.; PIMENTEL, M. G., MACÊDO, A. N., PICANÇO, M. S., MARTINS, W. S., JUNIOR, A. O., SILVA, A. L. M. F., BRITO, W. S. **Avaliação dos efeitos da temperatura na lama vermelha da região amazônica**. Congresso Brasileiro de engenharia e ciência dos materiais, Nova Iguaçu, PR, 2018.

DEGEN, M. K. CARDOSO, T. C. COSTA, R. P. MASUERO, A. B. MOLIN D. C. C. D. **Estudo da lama vermelha como fíler em matrizes cimentícias**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Rio Grande do Sul, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM. **Anuário Mineral Brasileiro**. Brasília, DF, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_metalicos2017>. Acesso em: 23 jun. 2023.

DOMAGATA, L., **The effect of lightweight aggregate water absorption on the reduction of water-cement ratio in fresh concrete**. Procedia Engineerin, v. 108, pp. 206-2013, 2016.

EVANS, K. **The History, Challenges, and New Developments in the Management and Use of Bauxite Residue**, Journal of Sustainable Metallurgy. (2016) 316–331.

FERREIRA, M. B. **Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição**. 2013. 197 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

GERMAN INSTITUTE FOR STANDARDIZATION. DIN EN 14630:2007. **Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method**. Germany.

GOULARTE, R. M. **Módulo de elasticidade de materiais lamelares determinados com a técnica de indentação instrumentada**. 2014. TCC (Graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/127454>. Acesso em: maio. 2023.

HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Introdução da Durabilidade no Projeto das Estruturas de Concreto. Ambiente Construído**. São Paulo, v. 1, n. 2, p. 45-57, jul. 1997.

HYDRO. **Bauxita**, 2023. Disponível em: < <https://www.hydro.com/pt-BR/aluminium/products/bauxita-e-alumina/bauxita/>>. Acesso em: 23 jun. 2023.

HYDRO ALUNORTE. **Depósitos de Resíduos Sólidos**, 2023. Disponível em: < <https://www.hydro.com/pt-BR/sobre-a-hydro/a-hydro-no-mundo/americas/brasil/barcarena/alunorte/deposito-de-residuos-solidos/>>. Acesso em: 23 jun. 2023.

HYDRO. **Relatório Anual**. Relatório da Administração, 2020. Disponível em: <<https://www.hydro.com/pt-BR/investidores/relatorios-e-apresentacoes/relatorios-anuais/>>. Acesso em: 23 jun. 2023.

INTERNATIONAL STANDARD. ISO 1920-12:2015 – **Testing of concrete – Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete – Accelerated carbonation method**. Geneva, Switzerland.

ISAIAS Jr. L. F; FURLAN, L. S; PELISSER, F; PETERSON, M; MONTEDO, O. R. K; DE NONI Jr, A. **Coarse Aggregates Obtained from Red Mud via Pelletizing Process**, Materials Science, Criciúma SC, Brasil, jun 2014. 798-799.

JAMIESON, Evan John. **Development and Utilisation of Bayer process By-products**. School of Civil and Mechanical Engineering, Department of Civil Engineering, 2013.

JOHN, V. M.; ROCHA, J. C. **Utilização de resíduos na construção habitacional**. Porto Alegre: Coleção Habitare, v.4, ANTAC, 272 p, 2003.

KARAHAN, O. HOSSAIN, K. Özbay, E. LACHEMI, M. SANCAK, E. **Effect of metakaolin content on the properties self-consolidating lightweight concrete. Construction and Building Materials.** [S.l.], v. 31, p. 320-325, June 2012.

LAUREANO, J. L. **Redução da alcalinidade disponível da lama vermelha mediante composição com argilas para uso como aditivo suplementar ao cimento portland.** 2014. Dissertação. (Mestre em Ciências e Engenharia de Materiais), Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2014.

MAGALHÃES, B. L. S.; RABELO, D. B., LIMA, R. S., CRUZ, R. S. J. **Utilização de resíduo do processo Bayer e biomassa da Amazônia para a produção de agregado sintético.** Conjecturas, 1657-5830, 2022.

MAGALHÃES, F. C. **Estudo probabilístico da resistência à compressão e da resistência à tração na flexão dos concretos utilizados na construção do dique seco do estaleiro rio grande, no superporto, em Rio Grande-RS.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2009.

MANFROI, E. P. CHERIAF, M. ROCHA, J. C. **Avaliação da lama vermelha como material pozolânico em substituição ao cimento para produção de argamassas.** Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

MARQUES, G. L. O. **Procedimentos de avaliação e caracterização de agregados minerais usados na pavimentação asfáltica.** Seminário de qualificação ao doutorado – Coordenação 156 Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2001.

MEDEIROS, M. **Estudo de argamassas de revestimento com resíduo de scheelita.** 2016. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2016.

MEDEIROS, M. H.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. R. L. **Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. Concreto: Ciência e Tecnologia.** 1ª ed. São Paulo: IBRACON, 2011.

MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais,** Ed. PINI, S. Paulo, Brasil, p. 249, 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 3 ed. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MELO JÚNIOR, A. S. **Análise quantitativa do material particulado na região e campinas através das técnicas de microfluorescência de raios-X e reflexão total usando radiação síncrotron.** Tese (Doutorado em Química) - Unicamp, Campinas, São Paulo, 2007.

MENDONÇA, M. F. **Substituição parcial do cimento Portland por cinzas de bambu (*Bambusa Vulgaris*)**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil PPGEC, Belém, 2018.

MUNHOZ, F. A. C. **Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-sílica e álcali-silicato**, Dissertação de Mestrado em Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de S. Paulo, S. Paulo, 166 p, 2008.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. PORTO ALEGRE: Bookman, 2013, 448 p.

NOGUEIRA, K. A. **Reação álcali-agregado: diretrizes e requisitos da abnt nbr 15577/2008**, Belo Horizonte. fev 2010.

OLIVEIRA, C. F. **Análise das propriedades do concreto quando utilizado após início de pega: tempo de utilização de concreto estrutural vencido**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de pós-graduação em construção civil, Belo Horizonte, 2018.

OLIVEIRA, D. R. C; ROSSI C. R. C. **Concretes with Red Mud Coarse Aggregates**, Materials Research, Belém, Brasil, jan 2012. 333-340.

OLIVEIRA, H. A. **Avaliação de argilas industriais formuladas com resíduo de vidro na produção de agregado sintético**, São Cristóvão – SE, out. 2017.

ORÉFICE, R. L. PEREIRA. M. M.. MANSUR. H. S. **Biomateriais: fundamentos e aplicações**. 1. ed. Rio de Janeiro: Cultura Médica. 538 p, 2006.

OZGUVEN.A., GUNDUZ L., **Examination of effective parameters for the production of expanded clay aggregate**, Cement and Concrete composites, v.34,pp. 781-787, 2012.

PAUMGARTTEN, M. D. V.; REIS, F. J. L., PIKANÇO, M. S., MACEDO, A. N., COSTA, D. S. R., SANTOS, A. C. M. **Caracterização e avaliação do índice de atividade Pozolânica de lama vermelha e resíduo de manganês para produção de misturas ternárias cimentícias**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v.7, n.8, p. 85965-85979, ago. 2021.

PEREIRA, A. L.; REIS, M. A., FERREIRA, L. L. H. C., NAKACHIMA, P. M. **Brazilian refractory grade bauxite: a new alternative to refractories makers and users**. Cerâmica 65, São Paulo, 40-46, 2019.

PEREIRA, C. **Tipos de cimento: Características e especificações**. Escola engenharia, 14 de jan. de 2019. Disponível em: <<https://www.escolaengenharia.com.br/tipos-de-cimento/>>. Acesso em: 27 de abr. de 2023.

PEREIRA, C. **Tipos de concretos utilizados na construção civil**. Escola engenharia. jul. 2016. Disponível em: < <https://www.escolaengenharia.com.br/tipos-de-concreto/.pdf>> Acesso: 20 de nov. de 2023.

PETRUCCI, E.G. R. **Concreto de cimento Portland**. 13. ed. São Paulo: Globo, 1998.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 2010. 265 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

RACANELLI, L. A.; BRITO, W. S., CARDOSO, D. N. P., VIVEIROS, D. C. S., SOUZA, J. A. S. **Caracterização de dois tipos de argilas do município de São Miguel do Guamá utilizados para fabricação de telhas e blocos de vedação**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 5, n. 4, p. 3803-3812, apr. 2019.

RECENA, F. A. P. **Dosagem e controle de qualidade de concretos convencionais de Cimento Portland**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2017. 260p.

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

REIS, M. O. B. SILVA, A. M. S. **Reações álcalis-sílica: recomendações gerais para prevenir a deterioração do betão**, Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Boletim Técnico. ITCM 23), 27 p, 1997.

RIBEIRO, D. V. SILVA, A. M. S. LABRINCHA, J. A. MORELLI, M. R. **Estudo das reações alcalis-sílica associadas ao uso da lama vermelha em argamassas colantes e de revestimento**. Cerâmica. [S.l.], vol.58, n.345, p. 90-98, 2012.

RIBEIRO, J. L. B. **Estudo das interações rocha-fluido em arenitos inconsolidados com simuladores físicos utilizando tomografia computadorizada e microfluorescência de raios-X por luz síncrotron**. Tese (Doutorado em Química) - UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

RIVARD, P. BÉRUBÉ, M. A. OLLIVIER, J. P. BALLIVY, G. **Mater. Structures** **40**, [S.l.], 9- 909, 2007.

RODRIGUES, P. **Estruturas e Bim**. Disponível em: <https://estruturasebim.com/2022/05/06/o-que-e-traco-de-concreto/>, [S.l.]: 2022. Acesso em: 30 de maio de 2023.

ROSÁRIO, K. A. **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.

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.

ROSSIGNOLO, J.A. **Influence Avaliação da zona de transição interfacial pasta agregado leve em concretos com sílica ativa e látex**. Revista Matéria, v. 12, n. 3, 2007.

SANTOS, D. H. **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.

SANTOS, J. A. V. **Concretos com agregado graúdo a partir dos resíduos de cerâmica vermelha**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Programa de Profissional em Processos Construtivos e Saneamento Urbano (PPCS), Belém, 2015.

SIKA, Brasil. **Sika Concreto Forte**. Ficha técnica de produto, São Paulo, 2020. Disponível em: < https://bra.sika.com/content/dam/dms/br01/o/sika_concreto_forte.pdf >. Acesso em: 28 de jun.de 2023

SOUZA, J. **Estudo e avaliação do uso de resíduos do processo Bayer como matéria prima na produção de agregados sintéticos para a construção civil**. 2010. Tese. (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia), Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

SOUZA, P. H. R. [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. mar. 2019.

TUTIKIAN, B.; HELENE, Paulo. **Dosagem dos Concretos de Cimento Portland**. In: Geraldo C. Isaia. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011, v. 2, p. 1283-1325. Disponível em: < <https://www.phd.eng.br/wpcontent/uploads/2014/07/lc56.pdf> >. Acesso em: 7 jun. 2023.

U.S.G.S, **Mineral Commodity Summaries**, jan. 2020. Disponível em: < www.usgs.gov >. Acesso em: 10 jun. 2020.

World Aluminium and the European Aluminium Association. **Bauxite Residue Management: Best Practice**, available from the International Aluminium Institute, London, 2015. Disponível em: < https://bauxite.world-aluminium.org/fileadmin/_migrated/content_uploads/Bauxite_Residue_Management_-_Best_Practice__English_.pdf >. Acesso em: 23 jul. 2023