



Vinícius Costa Machado

Resíduo da bauxita na produção de agregados graúdos sintéticos para concreto estrutural: análise de durabilidade

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Dissertação orientada pelo prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço

Belém – Pará – Brasil
2022



Vinícius Costa Machado

Resíduo da bauxita na produção de agregados graúdos sintéticos para concreto estrutural: análise de durabilidade

Defesa de dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará (PPGEC-UFPA), como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em engenharia.

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Orientador
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – UFPA

Profª. Drª. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro
Examinadora interna
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – UFPA

Prof. Dr. Adelson Bezerra de Medeiros
Examinador externo
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – UFPA

Prof. Dr. Mateus Antônio Nogueira Oliveira
Examinador externo
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – UFMG

Coordenador de pesquisa Me. Marcelo Montini
Convidado externo
Norsk Hydro Brasil

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Vinícius Costa Machado

TÍTULO: Resíduo da bauxita na produção de agregados graúdos sintéticos para concreto estrutural: análise de durabilidade

GRAU: Mestre ANO: 2022

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

Vinícius Costa Machado

Av. Augusto Correa, n. 1, Campus Universitário do Guamá,
Laboratório de Engenharia Civil. Guamá, Belém, Pará.
CEP: 66075-970

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

M149r Machado, Vinícius Costa.

Resíduo da bauxita na produção de agregados graúdos sintéticos para concreto estrutural: análise de durabilidade /
Vinícius Costa Machado. — 2022.

124 f.: il. color.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,

Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Belém, 2022.

1. Resíduo da bauxita. 2. Agregado graúdo
sintético. 3. Concreto. 4. Durabilidade. I. Título.

CDD 620.11



RESÍDUO DA BAUXITA NA PRODUÇÃO DE AGREGADOS GRAÚDOS SINTÉTICOS PARA CONCRETO ESTRUTURAL: ANÁLISE DE DURABILIDADE

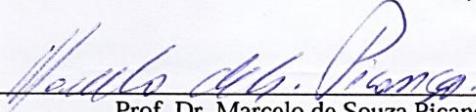
AUTOR:

VINICIUS COSTA MACHADO

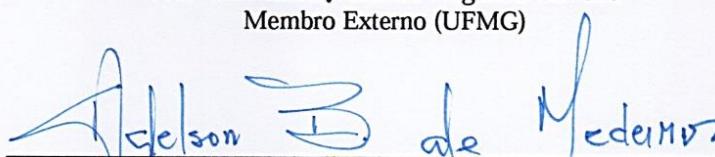
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 15/12/2022.

BANCA EXAMINADORA:


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

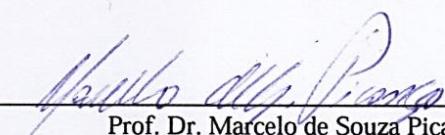
Prof. Dr. Mateus Antonio Nogueira Oliveira
Membro Externo (UFMG)


Prof. Dr. Adelson Bezerra de Medeiros
Membro Externo (UFPA)

Documento assinado digitalmente
 LUCIANA DE NAZARÉ PINHEIRO CORDEIRO
Data: 01/03/2023 08:10:59-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

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

Visto:


Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

*“Bem-aventurado o homem que acha sabedoria,
e o homem que adquire conhecimento.”*

(Provérbios 3:13)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me conceder forças e suprir minhas necessidades, não somente ao longo da vida, mas também durante toda a minha jornada no mestrado.

Agradeço aos meus pais, José Machado e Ana Maria Machado, que pavimentaram parte do caminho para que pudesse chegar até aqui.

Agradeço ao meu orientador professor Dr. Marcelo de Souza Picanço que me auxiliou neste grande passo da minha vida acadêmica.

Agradeço ao professor Dr. Matheus Antônio Nogueira Oliveira, que apesar da grande distância física nunca deixou de dar o apoio necessário e dentro do possível para o desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço à professora Drª. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro, minha orientadora no TCC, que me iniciou nas produções acadêmicas sobre estudo dos materiais de construção.

Agradeço à professora Drª. Isaura de Nazaré Paes, minha coorientadora no TCC, que de forma semelhante me auxiliou na área do estudo dos materiais de construção.

Agradeço ao grupo de pesquisas Hydro da qual fiz parte junto ao Marcelo Farias, Marcella Ribeiro, Robson Andrade, Adriana Garcia e Renan Cunha, que também auxiliaram nesta pesquisa durante o desenvolvendo das suas respectivas teses, dissertações e TCC.

Agradeço ao técnico do laboratório de engenharia civil (LEC-UFPA), Joel Silva Martins e ao bolsista Luciano Farias, que dispuseram dos seus tempos para auxiliar parte dos ensaios realizados nesta pesquisa.

Agradeço ao discente de mestrado Luciano Reis, de São Luís do Maranhão, que auxiliou em parte das análises de durabilidade realizadas no Instituto Federal do Maranhão (IFMA).

Faço ainda menções honrosas, de forma semelhante, a todos que de forma direta e indireta contribuíram para a concepção e idealização do presente estudo.

RESUMO

Em meio as políticas de meio ambiente, a construção civil passou a buscar materiais alternativos, a exemplo advindos de resíduos industriais; e a cada dia que passa isso tem se tornado mais comum. Este fato está relacionado a questões envolvendo: a alta demanda por materiais para construção; o esgotamento das reservas de matérias-primas; o elevado custo e espaço de armazenagem de resíduos; e possíveis riscos à saúde pública advindos. Tratando-se de resíduos industriais cabe destaque aos de mineração, em especial o resíduo da bauxita (RB) decorrente do processo Bayer de refino do minério, que já se tornaram uma alternativa promissora de matéria-prima em diversos países inclusive no Brasil para uma série de aplicações. O RB vêm sendo estudado e utilizado de forma um tanto recente na produção de agregados graúdos para concretos, obtendo-se sucesso em vários estudos. Porém, as informações que se tem a respeito da utilização de agregados graúdos sintéticos no concreto estão em maior parte ligadas às propriedades físico-mecânicas do mesmo, havendo certa carência de dados a respeito da influência destes na durabilidade do concreto estrutural. O estudo abordou de início as características físico-mecânicas e potencial reativo por reação álcali-agregado (RAA) de 3 agregados graúdos sintéticos (AGS 70, AGS 80 e AGS 90), obtidos a partir do RB junto à sílica e argila, com base nos requisitos normativos exigidos para utilização em concretos. Logo após, os concretos produzidos com estes agregados, em substituição total ao seixo, foram avaliados quanto as suas propriedades físico-mecânicas (resistência à compressão axial, tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, absorção de água por capilaridade) e à durabilidade (carbonatação acelerada e penetração de cloretos). Os resultados evidenciaram que os agregados sintéticos de RB se mostraram condizentes com as especificações técnicas para utilização no concreto estrutural e não desencadearam a RAA, permanecendo assim inóculos. A resistência à compressão axial (28 dias) atingiu valores entre 36-24 MPa; tração e módulo de elasticidade demonstraram pouca variabilidade; a absorção capilar se mostrou proporcional à tendência linear crescente das absorções de água dos agregados graúdos; destacando-se os concretos com AGS 70 e AGS 80 que obtiveram melhor desempenho nas características físico-mecânicas analisadas. A resistência à carbonatação dos concretos contendo o AGS 70 e AGS 80, como base nos referenciais normativos, classificaram-se como baixa e excepcional respectivamente. Em relação à penetração de cloretos, os mesmos foram classificados como resistência moderada (c/ AGS 70 e AGS 80) e baixa (c/ AGS 90) segundo a metodologia utilizada.

Palavras-chave: resíduo da bauxita, agregado graúdo sintético, concreto, durabilidade.

ABSTRACT

In the midst of environmental policies, civil construction began to seek alternative materials, such as those arising from industrial waste; and with each passing day this has become more common. This fact is related to issues involving: the high demand for construction materials; the depletion of raw material reserves; the high cost and space of waste storage; and possible risks to public health arising. In the case of industrial waste, mining waste should be highlighted, in particular the bauxite residue (BR) resulting from the Bayer ore refining process, which has already become a promising alternative raw material in several countries, including Brazil for a number of applications. The BR has been studied and used somewhat recently in the production of coarse aggregates for concrete, with success in several studies. However, the information available regarding the use of coarse synthetic aggregates in concrete is mostly linked to its physical-mechanical properties, with a certain lack of data regarding their influence on the durability of structural concrete. The study initially addressed the physical-mechanical characteristics and reactive potential by alkali-aggregate reaction (AAR) of 3 coarse synthetic aggregates (AGS 70, AGS 80 and AGS 90), obtained from BR together with silica and clay, based on the normative requirements required for use in concrete. Soon after, the concrete produced with these aggregates, in total replacement of pebbles, were evaluated regarding their physical-mechanical properties (resistance to axial compression, traction due to diametric compression, modulus of elasticity, water absorption by capillarity) and durability (accelerated carbonation and penetration of chlorides). The results showed that the synthetic BR aggregates were consistent with the technical specifications for use in structural concrete and did not trigger AAR, thus remaining inoculum. The axial compression strength (28 days) reached values between 36-24 MPa; traction and modulus of elasticity showed little variability; capillary absorption was proportional to the increasing linear trend of water absorption by coarse aggregates; highlighting the concretes with AGS 70 and AGS 80 that obtained better performance in the physical-mechanical characteristics analyzed. The carbonation resistance of concretes containing AGS 70 and AGS 80, based on normative references, were classified as low and exceptional respectively. Regarding the penetration of chlorides, they were classified as moderate resistance (with AGS 70 and AGS 80) and low (with AGS 90) according to the methodology used.

Key-words: bauxite waste, synthetic coarse aggregate, concrete, durability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Minério de bauxita <i>in natura</i>	20
Figura 2 - Bauxita metalúrgica e não-metalúrgica (refratária)	22
Figura 3 - Localização das minas de bauxita no Brasil	23
Figura 4 - Planta industrial de beneficiamento da bauxita (Hydro Alunorte), em Barcarena/PA	24
Figura 5 - Fluxograma do processo Bayer de obtenção da alumina	25
Figura 6 - Depósitos de resíduo sólidos da bauxita (disposição drenada) e RB proveniente do filtro prensa (Barcarena-PA)	26
Figura 7 - Curvas granulométricas do resíduo de refino da bauxita, em diferentes localidades	29
Figura 8 - Difração de raios X do RB	31
Figura 9 - Ingresso dos agentes agressivos e esforços produzidos, que levam à fissuração e destacamento do concreto devido à corrosão de armaduras	39
Figura 10 - Formas de ocorrência de íons cloreto na estrutura de concreto	41
Figura 11 - Representação esquemática da corrosão eletroquímica no concreto armado	42
Figura 12 - Formação do gel expansivo decorrente da reação álcali-sílica, e posterior fissura do agregado e matriz cimentícia	47
Figura 13 - Avanço do processo de carbonatação	51
Figura 14 - Frente de carbonatação e alteração do pH do concreto ao longo do tempo	52
Figura 15 - Avanço da carbonatação com passar do tempo e despassivação da armadura	53
Figura 16 - Zonas envolvidas no mecanismo de carbonatação e variação do pH ao longo da profundidade do concreto	54
Figura 17 - Influência do tipo de cimento na profundidade de carbonatação	56
Figura 18 - Influência da relação água/cimento na profundidade de carbonatação para condições específicas de ensaio e do concreto analisado	57
Figura 19 - Representação do grau de carbonatação em função da umidade relativa	58
Figura 20 - Variação do coeficiente de permeabilidade do concreto de acordo com a relação a/c	60
Figura 21 - Influência da cura na profundidade de carbonatação no concreto	61
Figura 22 - Correlação entre a profundidade de carbonatação e a raiz quadrada do tempo, visando a determinação do coeficiente de velocidade de carbonatação acelerada de referência, K_{ao} , para o concreto/argamassa analisada	64
Figura 23 - Matérias primas de composição do agregado graúdo sintético	67
Figura 24 - Organograma resumido do programa experimental	69
Figura 25 - Organograma de produção dos agregados graúdos sintéticos otimizados	73
Figura 26 - Amostras dos agregados graúdos sintéticos, otimizados	73
Figura 27 - Aspectos visuais apresentados pelos concretos durante a dosagem	75
Figura 28 - Infográfico ilustrativo dos ensaios mecânicos realizados nos concretos	76
Figura 29 - Esquematização do ensaio de absorção por capilaridade, realizado nos concretos	78
Figura 30 - Corpos de prova prismáticos para ensaio de carbonatação acelerada	79
Figura 31 - Câmara de carbonatação acelerada utilizada na análise	80
Figura 32 - Esquema de medições nas fatias retiradas dos prismas, através de corte com cerra circular ..	81
Figura 33 - Corpos de prova prismáticos para ensaio de penetração de íons cloreto	82
Figura 34 - Corpos de prova prismáticos após o preenchimento do recipiente com solução de NaCl (3%)	82

Figura 35 - Esquematização do corpo de prova prismático rompido por tração na compressão	83
Figura 36 - Esquematização das seções longitudinais aspergidas com solução de AgNO ₃	84
Figura 37 - Esquematização das medições nas seções dos prismas fraturados	84
Figura 38 - Potencial reativo dos agregados graúdos, obtidos no ensaio de RAA	86
Figura 39 - Resumo da caracterização do agregado graúdo natural e sintético, características intrínsecas	87
Figura 40 - Correlação do teor composicional (variado) dos agregados sintéticos e suas propriedades físico-mecânicas apresentadas	88
Figura 41 - Resumo da caracterização dos agregados graúdos (natural e sintético), características granulométricas	90
Figura 42 - Curvas granulométricas dos agregados graúdos (natural e sintéticos)	90
Figura 43 - Resumo da caracterização mecânica dos concretos	92
Figura 44 - Estimativa do desenvolvimento da resistência média à compressão ao longo do tempo	92
Figura 45 - Estimativa da absorção média de água por capilaridade dos concretos, ao longo do tempo ..	94
Figura 46 - Média da ascensão de água nos corpos de prova cilíndricos, rompidos diametralmente após o término do ensaio de absorção por capilaridade	94
Figura 47 - Estimativa do desenvolvimento da profundidade de carbonatação nos concretos ao longo da raiz do tempo, em semanas (com linhas de tendência)	96
Figura 48 - Profundidade média de carbonatação nos concretos nas idades de análise (dias)	96
Figura 49 - Visualização da diferença de carbonatação nas faces dos prismas seccionados, aos 42 dias de ensaio	97
Figura 50 - Correlação individual dos ensaios de carbonatação acelerada, absorção de água dos agregados graúdos e F _{ck,28} dos concretos	98
Figura 51 - Correlação individual dos ensaios de carbonatação acelerada, massa específica dos agregados e absorções dos agregados e concreto	99
Figura 52 - Penetração média dos cloretos nos concretos após 28 e 60 dias de ensaio	101
Figura 53 - Estimativa da penetração média dos cloretos nos concretos, ao longo do tempo de ensaio ..	101
Figura 54 - Visualização da penetração dos cloretos nas faces dos prismas, rompidos aos 28 e 60 dias	102
Figura 55 - Correlação individual da penetração final de cloretos com a resistência à compressão axial do concreto (F _{ck,28}) e absorção de água dos agregados graúdos. Tendência linear	103
Figura 56 - Correlação individual da penetração final de cloretos com a massa específica dos agregados graúdos e absorção de água capilar do concreto. Tendência linear	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ranking mundial das reservas e do beneficiamento da bauxita (refino)	21
Tabela 2 - Principais empresas que atuam na mineração de bauxita no Brasil, para fins de uso metálico ..	23
Tabela 3 - Composição química do RB (%) produzida em diferentes países, segundo alguns autores	29
Tabela 4 - Resumo das principais metodologias para avaliação da penetração de cloreto no concreto ..	44
Tabela 5 - Proposta de classificação da resistência à ação de cloreto nos concretos com base na profundidade de penetração, para 4 metodologias distintas	46
Tabela 6 - Características dos estudos de carbonatação em concretos, realizados por diversos autores .	63
Tabela 7 - Classificação simplificada quanto a resistência à carbonatação acelerada nos concretos	65
Tabela 8 - Ensaios de caracterização dos materiais primários	67
Tabela 9 - Ensaios de caracterização do agregado graúdo sintético	68
Tabela 10 - Pré-tratamento das matérias primas (agregados naturais e argila)	68
Tabela 11 - Composição, temperatura e tempo de sinterização de cada amostra no pré-estudo composicional do agregado graúdo sintético. Fatores controláveis	71
Tabela 12 - Composição, temperatura e período de sinterização das amostras otimizadas para produção dos agregados graúdos sintéticos	72
Tabela 13 - Traço (em massa), teor de argamassa, relação a/c, consistência e teor de agregados graúdos dos concretos produzidos.....	74
Tabela 14 - Resumo de gerenciamento dos corpos de provas para os ensaios nos concretos	75
Tabela 15 - Parâmetros adotados na câmara de carbonatação acelerada	79
Tabela 16 - Principais parâmetros adotados durante o ensaio de penetração de íons cloreto	82
Tabela 17 - Caracterização do cimento Portland	85
Tabela 18 - Síntese da caracterização do agregado miúdo natural (areia)	85
Tabela 19 - Composição química do RB, <i>in natura</i> , utilizado na produção dos agregados sintéticos	85
Tabela 20 - Classificação dos concretos analisados quanto a resistência à carbonatação	100
Tabela 21 - Classificação dos concretos produzidos quanto a resistência ao ingresso de íons cloreto, com base na profundidade média de penetração.	105

LISTA DE SIGLAS E ABREVIAÇÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGS	Agregado Graúdo Sintético
ASTM	American Society for Testing and Materials
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ALCOA	Atribuível, Legível, Contemporâneo, Original e Acurado
ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
a/c	Relação água/cimento
BET	Braunauer, Emmet e Teller
Dns	Coeficiente de difusão do cloreto no estado não estacionário
DRS	Depósito de Resíduos Sólidos
EPA	Environmental Protection Agency
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
IFPA	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
ISO	International Organization for Standardization
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
MPa	Megapascal
GPa	Gigapascal
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NT	Nordic Test
PPGEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
PPEEQ	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
PROPESP	Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
RAA	Reação álcali-agregado
RB	Resíduo da bauxita
UR	Umidade relativa
UFPA	Universidade Federal do Pará

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
JUSTIFICATIVA	17
1.1. OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICO	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 BAUXITA	20
2.2 PROCESSO BAYER	24
2.3 RESÍDUO DA BAUXITA	26
2.3.1 Generalidades	26
2.3.2 Composições e Características	28
2.3.3 Estudos de aplicabilidade do RB na construção civil	31
2.4 AGREGADOS SINTÉTICOS	33
2.4.1 Sinterização de agregados	33
2.4.2 Agregados graúdos produzidos a partir do RB	35
2.6 DURABILIDADE	37
2.6.1 Conceitos e Generalidades	37
2.6.2 Efeitos das características dos agregados na durabilidade do concreto	38
2.6.3 Fatores de ingresso dos agentes agressivos no concreto	40
2.6.4 Ataque de íons cloreto	41
2.6.5 Avaliação da resistência à penetração de íons cloreto do concreto	45
2.6.6 Reação álcali-agregado (RAA)	47
2.6.7 Carbonatação	50
2.6.8 Avaliação da resistência à carbonatação do concreto	61
3. MATERIAIS E MÉTODOS	66
3.1 MATERIAIS	66
3.1.1 Materiais primários	66
3.1.2 Agregado graúdo sintético	67
3.2 METODOLOGIA	69
3.2.1 Síntese do programa experimental	69
3.2.2 Pré-estudo para sinterização do agregado graúdo (resumo)	70
3.2.3 Produção dos agregados graúdos sintéticos	72
3.3 DOSAGEM E PRODUÇÃO DOS CONCRETOS	74
3.4 ANÁLISE DE INFLUÊNCIA DO AGREGADO GRAÚDO SINTÉTICO NAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÂNICAS DO CONCRETO	76

3.4.1 Características mecânicas	76
3.4.2 Absorção de água por capilaridade (porosidade)	77
3.5 ANÁLISE DE INFLUÊNCIA DO AGREGADO GRAÚDO SINTÉTICO NA DURABILIDADE DO CONCRETO	78
3.5.1 Carbonatação	78
3.5.2 Penetração de íons cloreto	81
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	85
4.1.1 Materiais primários	85
4.1.2 Agregado graúdo sintético de RB	85
4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DO CONCRETO	92
4.2.2 Propriedades mecânicas	92
4.2.3 Absorção de água por capilaridade (porosidade)	93
4.3 DURABILIDADE DO CONCRETO	96
4.3.1 Resistência à carbonatação	96
4.3.2 Resistência à penetração de íons cloreto	101
5. CONCLUSÕES	105
6. SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS	107
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil (ICC), apesar dos benefícios econômicos-sociais proporcionados, é responsável por um alto índice de processamento dos materiais, ficando em primeiro lugar no consumo de recursos naturais. A mesma traz consigo uma média de 57,5% da utilização da matéria-prima produzida a nível mundial conforme dados do Instituto de Engenharia do Brasil (IEB, 2019).

Falando-se em recursos naturais, os agregados graúdos tem ampla utilização na construção civil sendo consumidos para as mais diversas finalidades como a produção de concretos, pré-moldados, argamassa, pavimentos, barragens dentre outros. Nas últimas décadas nota-se um grande crescimento do consumo destes agregados, tomando-se como exemplo a China que entre os anos de 2011-2014 chegou a consumir mais agregados do que os Estados Unidos em todo o século XX (OLIVEIRA & ÂNGULO, 2020). Atentando-se agora para um cenário nacional, segundo os últimos autores, a exploração e consumo de agregados graúdos no Brasil tende a ser crescente, com exceção dos períodos de crises econômicas, dessa forma contribuindo com a ligeira escassez deste recurso devido à alta demanda e a limitada oferta. A busca pela preservação destes recursos naturais aponta para a necessidade de novas formas de obter agregados no intuito de atenuar a degradação direta ao meio ambiente.

A mineração, assim como a ICC, é uma das atividades produtivas essenciais mais antigas na história da humanidade. Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), em 2020 a produção mineral brasileira beneficiada chegou a 457,82 milhões de toneladas (ton.), e como toda atividade industrial de larga escala esta gera uma grande quantidade de rejeitos com elevados custos de gerenciamento e potenciais riscos ao ser humano. A indústria da alumina, especificamente no que se diz respeito a fase de refino de sua matéria-prima, tem como principal rejeito o resíduo da bauxita (RB), popularmente conhecido como “lama vermelha”. O mesmo consiste em um resíduo dos componentes minerais insolúveis, provenientes da digestão do minério pelas soluções de hidróxido de sódio Na(OH) na fabricação de alumina, pelo processo Bayer (HILDEBRANDO, 1998). Estima-se que no Brasil gera-se anualmente cerca de 14,5 milhões de toneladas do RB pelo refinamento do minério, via processo Bayer, segundo a ABAL (2017).

Na região norte do país, o estado do Pará detém a maior parcela nacional na produção, beneficiamento e refino da bauxita ($\approx 85\%$) sendo a Hydro Alunorte com refinaria localizada no município de Barcarena, a que lidera o ranking estadual com cerca de 51% da produção de alumínio primário (ABAL, 2017; HYDRO 2019). A Hydro

Alunorte em Barcarena-PA possui a mais moderna e sustentável tecnologia disponível para depósito a seco de resíduos sólidos do setor, além de possuir certificação internacional da *Aluminium Stewardship Initiative* em relação ao padrão de desempenho e da cadeia de custódia sobre suas atividades (HYDRO, 2022), contudo ainda enfrenta os grandes desafios do setor para reutilização padronizada do RB.

Segundo Vick (1983) e Fahey *et al.* (2002) o RB trata-se de um resíduo que faz parte da categoria “*tailings*” de partículas muito finas e sem aplicação padronizada em larga escala, embora apresente propriedades físico-químico-mineralógicas com bom sinergismo com outros materiais. Por conta desta ausência de aplicação, a princípio, os resíduos são armazenados em grandes lagoas artificiais ou em extensas áreas de deposição a seco, dependendo do tipo de armazenamento utilizado, tornando-se também um dos outros problemas enfrentados pela indústria. Do ponto de vista técnico os resíduos gerados, desde que bem armazenados (à seco), não chegam a contaminar o ambiente específico ao qual estão inseridos, conferindo um baixo risco ambiental, sendo assim chamados de “passivos ambientais” uma vez que ocupam uma grande área ao ar livre.

Muitas pesquisas têm sido realizadas ao longo dos anos, para dar uma aplicação viável ao RB, em especial na construção civil como matéria-prima. Uma proposta um tanto recente no meio científico e que já é realidade, consiste na utilização do mesmo no processo de produção de agregados graúdos sintéticos para o concreto; por meio da mistura com outros materiais. A produção destes novos agregados tem o intuito de diminuir a alta demanda por agregados graúdos naturais, comumente utilizados na construção civil e que degradam o meio ambiente durante o processo de extração (SOUZA, 2010; SANTOS, 2011).

O uso de matéria prima alternativa, como o RB, na produção de agregados graúdos para construção civil, deve ser realizada mediante a estudos prévios objetivando constatar, além das características do mesmo, o desempenho na aplicação requerida. Ou seja, o grande desafio é alcançar o desempenho adequado do produto final com a maior quantidade de RB possível, seja nas suas propriedades iniciais, finais e de processamento (ISAIAS JR., 2013). Com base no que se tem presenciado na literatura científica, ligada à construção civil, fica evidente uma certa escassez de estudos que busquem avaliar a durabilidade de concretos produzidos com agregados artificiais, em especial os obtidos a partir do RB, que têm sido objeto de estudo principalmente nas regiões onde atuam grandes refinarias de bauxita. Ou seja, aborda-se razoavelmente sobre as características físico-mecânicas de tais concretos com

agregados de RB, mas pouco se diz a respeito da durabilidade dos mesmos dada a relevância de tal análise também como critério de qualidade.

Conforme Gordon (1996), alternativas que garantam altas taxas de consumo e que torne mais viável o uso do RB para fabricação ou substituição de materiais já consagrados na construção civil, a exemplo os agregados graúdos naturais, tornam-se necessária. Isto aliado à necessidade de se garantir um material que proporcione uma durabilidade satisfatória na aplicabilidade desejada, no caso para os concretos estruturais.

JUSTIFICATIVA

Tratando-se do resíduo de refino da bauxita via processo Bayer, estima-se que anualmente sejam produzidos um montante de 120 milhões de ton. ao redor do mundo, sendo 2,7 bilhões de ton. ainda em armazenamento (POWER, 2011; EVANS *et al.*, 2012). Em relação ao descarte do RB, o reaproveitamento do mesmo assim como outros vem se tornando uma alternativa viável em vários países (POWER *et al.*, 2011; ZHANG *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2018), onde a motivação para tal está atrelada principalmente ao esgotamento das reservas de matérias-primas aplicadas por exemplo à construção civil; junto ao crescimento do volume de resíduo gerado que é um passivo ambiental (CASTRO *et al.*, 2012).

Os estudos sobre a produção de concretos utilizando o agregado graúdo, feito a partir do RB, ainda é algo recente quando comparado as pesquisas sobre este agregado de forma isolada. Ao se analisar a literatura científica da construção civil, a respeito de destes concretos, percebe-se um foco nas características físico-mecânicas ao mesmo tempo que uma carência de informações sobre a sua durabilidade. Dessa forma, a análise de durabilidade para os concretos produzidos com agregados de RB torna-se necessário visto que é um critério fundamental que o mesmo deve atender ao longo de sua vida útil, isto junto ao fornecimento de informações importantes sobre a influência deste novo agregado nesta característica do concreto.

Partindo então do pressuposto que há um problema de ordem econômico-social a respeito da escassez de agregados graúdos; que estudos acerca da viabilidade na produção de agregados sintéticos de RB para concreto já são uma realidade; e pouco se aborda no meio científico a respeito da durabilidade do concreto produzido com agregados deste resíduo. Surge a partir daí uma oportunidade para se investigar os efeitos desse novo agregado na durabilidade dos concretos, dessa forma complementando estudos de aplicabilidade na construção civil que já utilizam o resíduo

como matéria prima na produção de agregados graúdos para esta finalidade. Isto, como uma projeção futura, poderá favorecer um alto consumo do rejeito considerando a alta demanda por agregados naturais.

Esta pesquisa foi concebida como iniciativa da refinaria Hydro Alunorte (PA) em parceria com a Universidade Federal do Pará (PPGEC e PPGEQ) no intuito de complementar os estudos de aplicabilidade viável e segura para o RB, que é classificado como resíduo classe II (não perigoso), utilizando-o como matéria-prima principal na produção de agregados graúdos para o concreto estrutural ao mesmo tempo que investiga sua durabilidade. Dessa forma olhando para mesmo como um subproduto da indústria da alumina e não mais um rejeito, uma vez que ocupa extensas áreas para seu armazenamento gerando custos extras para o setor.

Portanto, por meio desse trabalho espera-se contribuir à comunidade científica com informações acerca da durabilidade, que viabilizem mais o uso do RB como matéria-prima na produção de agregados graúdos para concretos. E que os benefícios econômicos-sociais proporcionados podem vir a compensar os possíveis impactos de produção. Dessa forma aperfeiçoando uma alternativa para o reaproveitamento e utilizando-o como insumo para produção de agregados, assim contribuindo com a atenuação dos problemas da escassez de agregados naturais no mercado, junto às lacunas no meio científico sobre a durabilidade de concretos com agregados de RB.

Tendo em mente que ao se obter um concreto com durabilidade satisfatória utilizando-se o agregado sintético de RB em substituição ao natural, o mesmo vem a se tornar “apto” a fazer parte da construção civil como uma matéria prima e da indústria mineradora como um subproduto.

1.1 OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICO

O presente estudo visa avaliar a durabilidade de concretos estruturais produzidos utilizando 100% de agregados graúdos sintéticos (em substituição ao seixo), obtidos a partir da mistura do RB junto a outros materiais. Como objetivos específicos buscou-se:

- Caracterizar brevemente os agregados graúdos, sintetizados a partir de misturas calcinadas do RB junto a outros materiais (sílica, argila);

- Investigar o potencial reativo (RAA) dos agregados graúdos sintéticos e se os mesmos atendem ao critério de inocuidade estabelecido em norma para uso em concretos;

- Avaliar as características físico-mecânicas dos concretos produzidos, frente aos ensaios de: resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade estático, absorção de água por capilaridade; e principalmente aos ensaios de durabilidade: carbonatação acelerada e penetração de íons cloreto.

- Determinar quais dos agregados sintéticos analisados melhor influenciou no desempenho quanto à durabilidade dos concretos estruturais, classificando a resistência destes concretos aos respectivos agentes agressivos a qual foram expostos, com base nos referenciais normativos e estudos atuais

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BAUXITA

A bauxita para fins metalúrgicos (Figura 1) é uma rocha mineral geralmente de coloração avermelhada, rica em alumina (Al_2O_3), apresentando geralmente o teor de 40%. Sendo a fonte natural do alumínio, é o terceiro elemento químico de maior abundância na natureza, depois do oxigênio e do silício (SAMPAIO *et al.*, 2008). Devido as excelentes propriedades físico-químicas, entre as quais se ressaltam o baixo peso específico, a resistência à corrosão, a alta condutibilidade térmica e elétrica, o alumínio torna-se o metal não-ferroso mais consumido no mundo (ALCOA, 2008).



Figura 1 – Minério de bauxita *in natura*.
Fonte: ABAL (2017).

Detendo uma reserva de aproximadamente 8% da crosta terrestre, o alumínio (em forma de alumina) é o terceiro metal mais abundante no planeta, dessa forma a disponibilidade de matéria-prima para a produção desse metal é bastante abundante (European Aluminium Association - EAA, 2008; ABAL, 2017).

A bauxita pode ser encontrada em três principais grupos climáticos no planeta: mediterrâneo, tropical e subtropical (ABAL, 2017). E o Brasil possui a terceira maior reserva mundial de bauxita, com um potencial na ordem de 2,5 bilhões de toneladas, concentrada majoritariamente na região Norte do país. As bauxitas costumam ser classificadas de acordo com tipo de hidróxido de alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) presente (gibbsíticas, diásporas ou boemitas) cujas principais impurezas são: caulinita, hematita, quartzo, rutilo, goethita e anatásio (AQUINO, 2007; EAA, 2008). Aquelas geologicamente mais novas possuem um teor mais alto de gibbsita, ocorrendo em áreas de clima tropical como Jamaica, Austrália, Guiné, Guiana, Suriname, Índia e Brasil,

sendo as que apresentam maior interesse comercial (CONSTANTINO *et al.*, 2002). Em sua maior parte, a bauxita brasileira é do tipo gibbsítico.

Os minérios de bauxita economicamente aproveitáveis possuem um teor médio de alumina (Al_2O_3) entre 50-55% sendo a concentração mínima para que a produção de alumínio metálico se torne economicamente viável é na ordem de 30% (SAMPAIO *et al.*, 2008; GOMES *et al.*, 2017). Segundo Prado *et al.* (2012), mais de 90% da produção mundial de bauxita processada é utilizada na obtenção de alumina, visando a obtenção do alumínio metálico.

As reservas brasileiras de bauxita, em geral de ótima qualidade ($40\% \leq \text{Al}_2\text{O}_3$), também estão entre as maiores do mundo sendo que em 2015 a produção ocupou o terceiro lugar no mundo, logo atrás da Austrália com cerca de 81 milhões de toneladas anuais e a China com 65 milhões. Imediatamente abaixo do Brasil, estão Guiné e Índia com cerca de 27,6 e 24,2 milhões de toneladas anuais, respectivamente (Tabela 1).

Tabela 1 – Ranking mundial das reservas e do beneficiamento da bauxita (refino).

Ranking	Reservas de Bauxita (Em milhões de toneladas)		Produção (Em milhões de toneladas)					
	Países	Volume	Bauxita	Volume	Alumina	Volume	Alumínio Primário	Volume
1º	Guiné	7400	Austrália	81741	China	58978	China	31870
2º	Austrália	6200	China	65000	Austrália	20097	Rússia	3454
3º	Brasil	2600	Brasil	37057	Brasil	10452	Canadá	3209
4º	Vietnã	2100	Guiné	27605	Índia	5000	Emirados Árabes	2471
5º	Jamaica	2000	Índia	24219	Estados Unidos	4541	Índia	1909
6º	Indonésia	1000	Jamaica	8540	Rússia	2593	Austrália	1646
7º	China	980	Malásia	7664	Jamaica	1865	Noruega	1231
8º	Guiana	850	Rússia	5432	Canadá	1561	Bahrain	971
9º	Índia	590	Cazaquistão	4802	Ucrânia	1481	Estados Unidos	818
10º	Suriname	580	Grécia	2100	Cazaquistão	1448	Brasil	793
11º	Arábia Saudita	210	Arábia Saudita	1660	Espanha	1400	Islândia	764
	Outros	3490	Outros	4672	Outros	7284	Outros	8421
	Total	28000		270492		116700		57557

Fontes: British Geological Survey, 2011 - 2015.

U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January, 2017.

World Metal Statistics – March, 2017.

De acordo com os dados do *International Aluminium Institute* (IAI, 2013) *apud* ABAL (2017), as reservas mundiais de bauxitas estão distribuídas nas regiões tropicais (57%), mediterrâneas (33%) e subtropicais (10%). O mundo dispõe de aproximadamente 27,9 bilhões de toneladas (bt) de reservas de bauxita, sendo o Brasil detentor de aproximadamente 2,6 bt dessas reservas (bauxita metalúrgica 95% e refratária 5%), o equivalente a 9,3 % do total mundial segundo dados da Agência Nacional de Mineração (ANM, 2017).

Além disso, o minério de bauxita ocupa a terceira posição de recursos naturais em volume produzidos no país, com cerca de 37 milhões de toneladas anuais, logo atrás

dos materiais para construção civil (areia, brita, cascalho e cimento), com cerca de 772 milhões, e do minério de ferro com 411 milhões de toneladas anuais (ABAL, 2017).

A bauxita metalúrgica é aplicada na obtenção da alumina que é transformada posteriormente em alumínio. Já a bauxita não-metalúrgica é usada principalmente na indústria de refratários, mas sua aplicação também engloba abrasivos, cimentos argilosos, indústria química, antiderrapantes, retardadores de chama, soldas, dentre outros (SAMPAIO & NEVES, 2002; QUARESMA, 2015).

A Figura 2 mostra as principais diferenças compositionais e visuais entre bauxita metalúrgica e não metalúrgica.

			
Metalúrgica	Não-Metalúrgica		
Constituintes (%)			
Fe_2O_3	11 - 12	Fe_2O_3	2,5 (máx)
SiO_2	< 4,0	SiO_2	5 - 7
Al_2O_3 *	> 48	Al_2O_3	50
* Aproveitável pelo proc. Bayer			
Densidade Aparente > 3,0			

Figura 2: Bauxita metalúrgica e não-metalúrgica (refratária).
Fonte: HABASHI (1993).

O setor da mineração tem sido e ainda é um dos principais motores de crescimento da região Norte (Figura 3), especialmente no estado do Pará, onde se encontram as duas maiores jazidas da região: a de Oriximiná, que se extrai a bauxita, com maior parte da produção destinada à exportação; e a de Serra dos Carajás, que representa uma das maiores do planeta e também produz o minério de ferro de melhor pureza (ABAL, 2017).

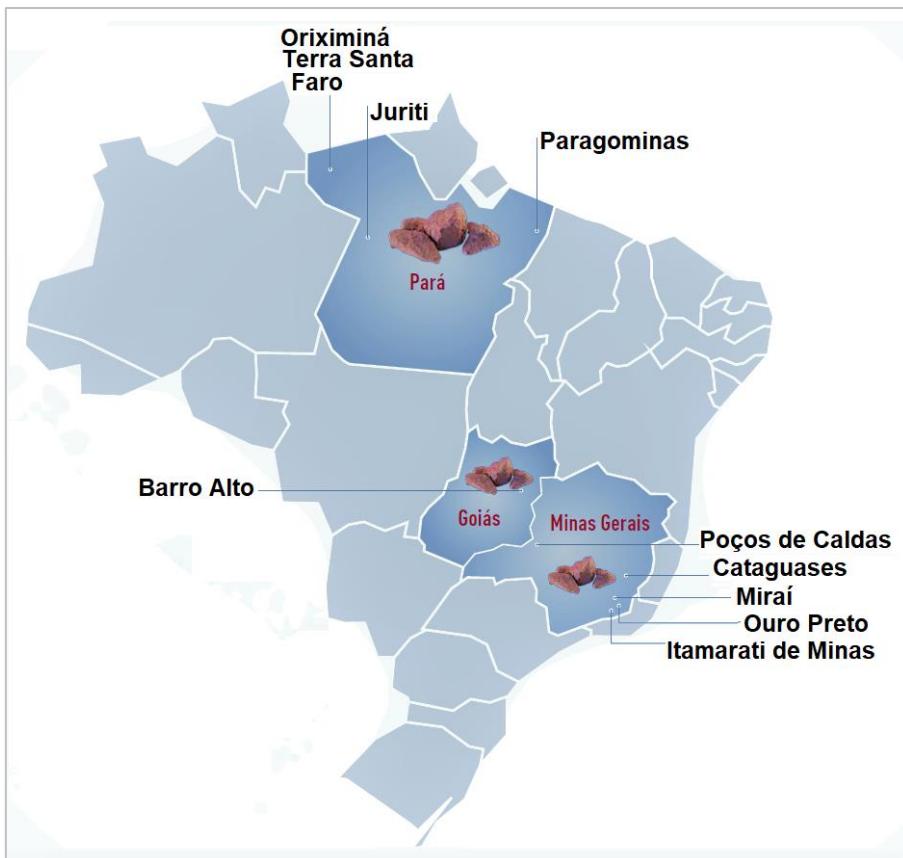


Figura 3 – Localização das minas de bauxita no Brasil. Fonte: ABAL (2017).

As principais companhias mineradoras no Brasil, que extraem a bauxita para fins metálicos, o volume e expressão na produção, são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Principais empresas que atuam na mineração de bauxita no Brasil, para fins de uso metálico.

Empresa	Volume (milhões ton., base úmida)	%	Localização
MRN - Mineração Rio Norte S.A.	17,82	48	Trombetas (PA)
Mineração Paragominas S.A. (Hydro)	10,06	27	Paragominas (PA)
Alcoa Alumínio S.A.	5,73	15	Juriti (PA) e Poços de Caldas (MG)
Companhia Brasileira de Alumínio - CBA	2,12	6	Itamarati **, Cataguases e Miraí (MG)
Outros *	1,33	4	
Total	37,06	100	

(*) Hindalco, Mineração Curimbaba, Bauminas Mineração, Mineração Santo Expedito e Mineração Varginha;

(**) Encerrou a produção em 2015

Fonte: Anuário ABAL, edição 2017.

Conforme os dados evidenciados da Associação Brasileira do Alumínio, o estado do Pará representa cerca de 82,5% da produção nacional de bauxita para uso metálico. Sendo a Hydro Alunorte, na qual o RB utilizado neste trabalho foi oriundo, a que lidera na produção estadual. A bauxita utilizada na Hydro Alunorte vem da empresa Mineração Paragominas S.A, por meio de um mineroduto, e da Mineração Rio do Norte S.A. (MRN), através do porto de Vila do Conde-PA. Uma parcela dessa alumina produzida é

exportada e a outra é fornecida para a planta de beneficiamento da Albras, também localizada em Barcarena-PA, que produz lingotes de alumínio (HYDRO, 2021). No processo de beneficiamento da bauxita o RB gerado é lavado, filtrado e drenado, ficando armazenado nos depósitos de resíduos sólidos da refinaria. A Hydro Alunorte (Figura 4) possui dois depósitos de resíduos sólidos com métodos semelhantes de disposição a seco: DRS 1 (*dry-stacking*) e DRS 2 (*dry-disposal*).

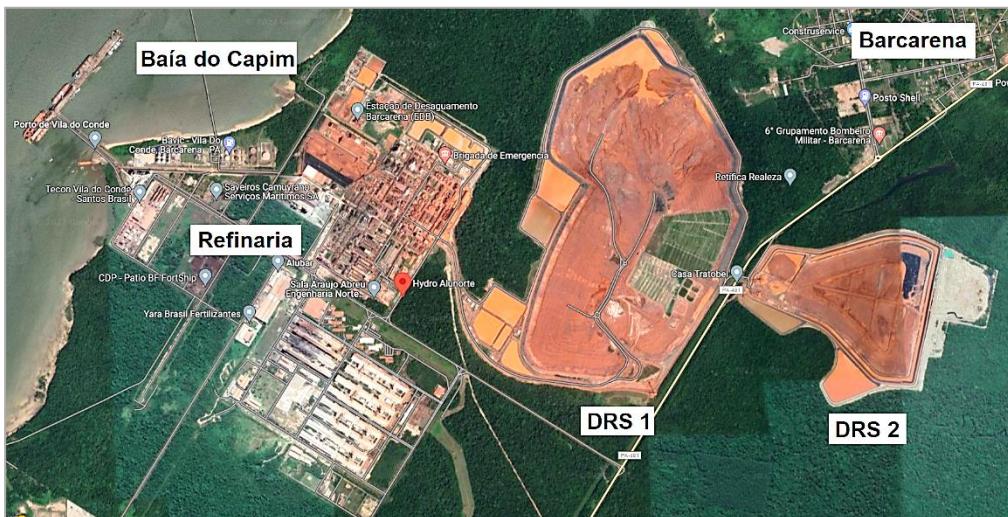


Figura 4 - Planta industrial de beneficiamento da bauxita (Hydro Alunorte), em Barcarena/PA.
Fonte: Google Maps (2022).

2.2. PROCESSO BAYER

No ano de 1888, Karl Josef Bayer desenvolveu e patenteou o processo hoje mundialmente conhecido como “Processo Bayer” (HIND *et al.*, 1999). Esse método representou e ainda representa um marco na história da metalurgia, sendo considerado, em conjunto com o processo de cianetação para tratamento de ouro e prata, a concepção da hidrometalurgia moderna (HABASHI, 2005). O processo Bayer substituiu o processo Le-Chatelier, principalmente devido ao fato deste primeiro ter proporcionado uma redução considerável no custo de produção do óxido de alumínio (Al_2O_3), (HIND *et al.*, 1999).

Segundo o IAI (2013), o processo é amplamente utilizado em todo o mundo além de ser o método mais econômico entre os meios de obtenção de alumina. O método é baseado no fato de que os hidratos de alumínio são muito solúveis em soda cáustica, o que não ocorre com os demais óxidos constituintes da bauxita sendo estes não aproveitáveis durante o processo (VILLAR, 2002). A Figura 5 exemplifica a obtenção da alumina pelo processo Bayer.

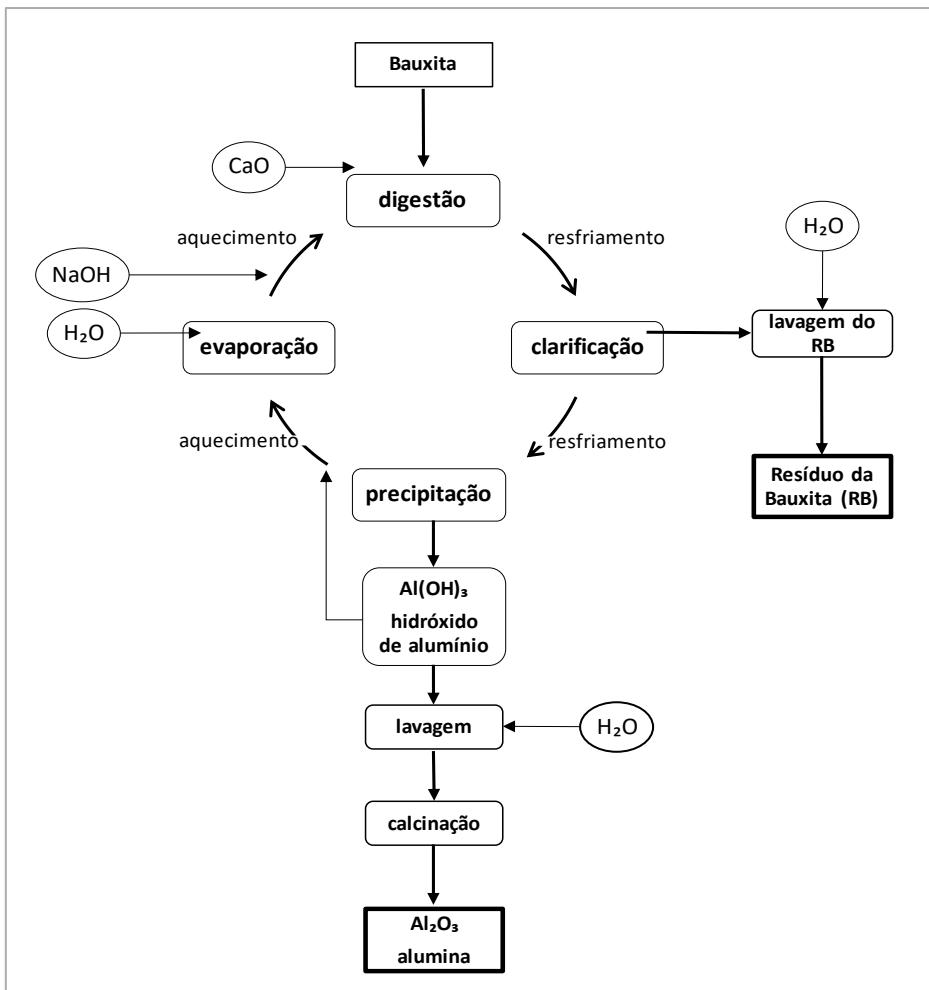


Figura 5 – Fluxograma do processo Bayer de obtenção da alumina.

Fonte: CONSTATINO *et al.* (2002), p. 491, reformulado.

Resumidamente, as etapas do processo Bayer são: digestão em $\text{Na}(\text{OH})$, separação do resíduo da bauxita (RB), cristalização do hidróxido de alumínio e calcinação (SILVA FILHO *et al.*, 2007). Com relação às proporções durante o processo, são necessárias aproximadamente de 5 a 7 toneladas de bauxita *in natura* para se produzir cerca de 2 toneladas de alumina (Al_2O_3), que são convertidos em 1 tonelada de alumínio metálico, no Brasil (ABAL, 2017).

Ao longo da etapa de beneficiamento da bauxita para obtenção de alumina, realizado nas refinarias, os resíduos gerados (água de lavagem e RB), são direcionados para as grandes áreas de disposição, previamente licenciadas pelos órgãos ambientais competentes, projetadas para adequar-se aos melhores padrões de segurança do setor (ABAL, 2017).

2.3. RESÍDUO DA BAUXITA (RB)

2.3.1 Generalidades

O RB, outrora conhecido como lama vermelha devido suas características visuais (Figura 6), consiste em um rejeito dos componentes minerais insolúveis provenientes da digestão da bauxita pelas soluções de hidróxido de sódio, na fabricação de alumina pelo processo Bayer (HILDEBRANDO, 1998). Em estudos já consolidados, Singh (1996) afirma que aproximadamente 35 a 40% do minério de bauxita são perdidos e dispostos como esse rejeito altamente alcalino durante o processo.

O RB também faz parte de um grupo de rejeitos conhecidos internacionalmente como “tailings”, resultantes do processamento de minérios pela indústria extrativista mineral e representa o principal objeto de atenção da indústria de beneficiamento da bauxita devido à sua natureza cáustica e as grandes áreas necessárias para sua deposição (SMITH *et al.*, 2006; ABAL, 2017).

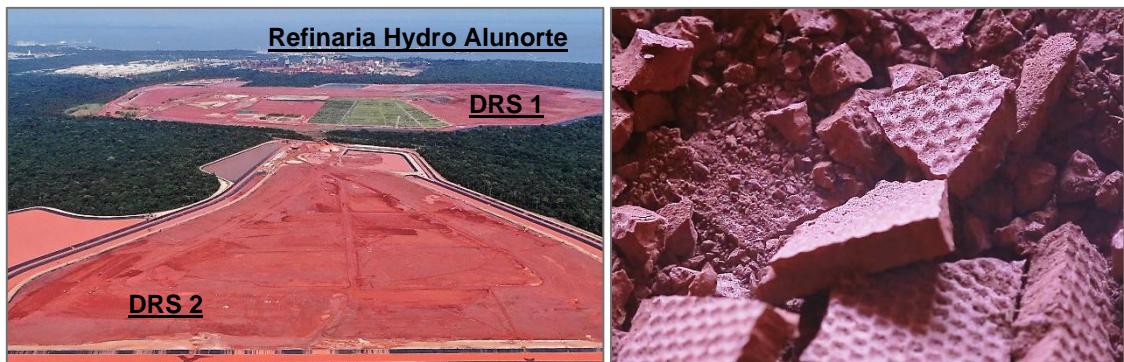


Figura 6 - Depósitos de resíduo sólido da bauxita (disposição drenada) e RB proveniente do filtro prensa (Barcarena-PA). Fonte: HYDRO (2022).

Como já mencionado, o conteúdo sólido desse rejeito contém as impurezas que não são dissolvidas de forma significativa, além da alumina que não é extraída na etapa da digestão. As principais impurezas encontradas são os óxidos de ferro, sílica e titânio, enquanto que outros elementos, como zinco, fósforo, níquel e vanádio são encontrados em apenas em pequenos traços (VILLAR, 2002; CBA, 2008). Observando o processo, alguns autores fazem distinção entre as partículas grosseiras (areias) e as partículas finas (lamas), devido ao fato de as mesmas serem geradas em momentos diferentes durante a etapa de clarificação. Porém, a disposição final dos dois materiais, em conjunto ou em separado, é uma questão meramente operacional (FILHO *et al.*, 2007).

De acordo com o que é evidenciado na literatura científica ligada à construção civil, de forma geral, não há um consenso claro da proporção exata entre a quantidade

de alumina produzida e quantidade de RB gerado mundialmente, uma vez que a qualidade da bauxita influencia diretamente na quantidade do rejeito. Contudo, são mais comuns referências que uma fábrica padrão de alumina utilize cerca de 5-7 ton. de bauxita na produção de 2 ton. de alumina que se convertem em 1 ton. de alumínio metálico, gerando entre 0,3-2,5 ton. de RB (ABAL 2017; KANASHIRO, 2018).

Atualmente a maioria das plantas de beneficiamento de bauxita utilizam processos modernos de deposição de resíduos, com tecnologias avançadas e que oferecem muito menos riscos ao meio ambiente. Os métodos de disposição conhecidos são o seco (drenada) e a disposição úmida/não-drenada, (FILHO *et al.*, 2007; TINOCO, 2017).

A área de disposição final necessária para os resíduos gerados varia entre 40,5 a 81 hectares, em média, e os custos associados são altos devido à necessidade de impermeabilização prévia da área normalmente através de membranas plásticas ou da aplicação de camada de material impermeável, por conta dos riscos de contaminação do solo, lençol freático e outros componentes. O tempo de vida útil de uma área de disposição é relativamente curta, estimada entre 4 a 7 anos, sendo a reabilitação da mesma um processo demorado (KIRKPATRICK, 1996 e NGUYEN & BOGER, 1998).

O “*dry-stacking*” (acomodação a seco - drenado) é um dos métodos de disposição mais comumente utilizados para o RB, e se baseia na disposição progressiva do rejeito em uma área de disposição que é dividida em leitos de secagem, onde é descarregado até atingir uma determinada altura, passando-se a seguir para o leito de secagem livre assim permitindo a diminuição da umidade através da evaporação e da drenagem. Segundo Filho *et al.* (2007) a secagem solar é uma variante do “*dry-stacking*”, sendo aplicável em regiões onde há uma taxa de evaporação elevada. A indústria de produção da alumina também utiliza o “*thickened tailing disposal*” (disposição de rejeito espessado) no qual o RB é armazenado no ponto central da área de disposição, formando um monte cônico, que elimina a necessidade de barragens ou diques, aumentando a estabilidade do depósito e facilitando a reintegração da área ao meio ambiente (FILHO *et al.*, 2007).

Outro método de armazenamento empregado para deposição do RB trata-se do “*dry-disposal*”. O método consiste na utilização de um filtro presa para gerar o resíduo com umidade próxima aos 25% (75% de sólidos) como forma de facilitar o manuseio e disposição durante o processo de refino do minério. Este método, além de mais recente, surgiu como forma de estender a vida útil dos depósitos e reduzir significativamente os possíveis riscos ambientais proporcionados por uma acomodação úmida não drenada. O “*dry-disposal*” também possibilita a recuperação parcial do Na(OH) (soda cáustica)

presente na parcela filtrada, além do aumento da vida útil do depósito em pelo menos 20 anos (JÚNIOR *et al.* 2014).

O armazenamento deste grande volume de rejeito alcalino é caro, cerca de 1-2% do preço da alumina, e requer uma grande área de disposição - 1 km² por cada 5 anos, em uma fábrica que produz 1 milhão de toneladas de alumina anualmente - para gerenciamento do RB até seu destino final (SINGH *et al.*, 1996; SILVA, 2016). Villarejo *et al.* (2012) afirma que por conta da dificuldade do descarte apropriado e seguro deste resíduo, o mesmo impacta em 5% do custo de produção do alumínio para adoção de tais medidas.

Apesar da modernização dos métodos de disposição do RB, que proporcionam maior segurança, a estocagem ainda é onerosa e isso aliado a outros fatores como a demora para recuperação total das áreas de deposição e a falta de aplicabilidade industrial do mesmo torna-se ainda um desafio para o setor da alumina.

2.3.2 Composições e Características

O teor de sólidos do RB varia entre de 15-30%, sendo constituído por partículas extremamente finas, contendo óxido de ferro e uma quantidade significativa de hidróxido de sódio potencialmente perigoso (POWER *et al.*, 2009; IAI, 2013). Como consequência, a área superficial é elevada e o RB mostra elevada capacidade de absorção de água (SINGH, 1996).

De acordo com Villar (2002), a granulometria deste resíduo é uma característica que está estritamente relacionada a mineralogia da rocha de origem, ao processo de extração, processamento e deposição (adição de floculantes). O último autor ainda destaca que para aqueles rejeitos cuja forma de disposição inicial é na forma de lama, necessariamente possuem uma granulometria mais fina.

A Figura 7 mostra diferentes curvas granulométricas para o RB, segundo estudos de alguns autores pioneiros.

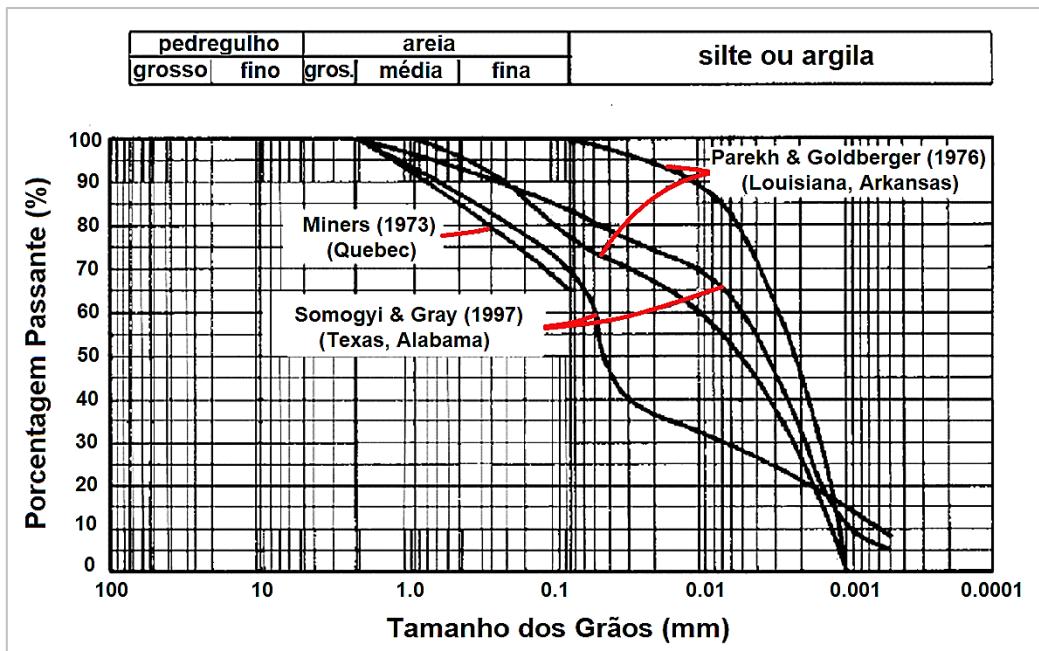


Figura 7 – Curvas granulométricas do resíduo de refino da bauxita, em diferentes localidades.

Fonte: VILLAR (2002), adaptado de VICK (1983).

Conforme Hind *et al.* (1999), o RB é constituído por partículas cerca de 95 % menores que 44 µm, e apresenta uma área superficial entre 13 - 22 m²/g. Em seu estudo, Chandra (2013) comenta que o RB no estado seco pode apresentar massa específica entre 2,5 à 2,7 g/cm³. Manfroi (2009) observou que o RB seco, *in natura*, apresenta massa específica de 2,71 g/cm³.

A composição química do RB possui amplas variações, dependendo da fonte de origem da bauxita e dos parâmetros tecnológicos de produção envolvidos em cada planta industrial. A Tabela 3 apresenta composições detalhadas do RB, originadas de pesquisas em diferentes países que utilizam o processo Bayer na obtenção da alumina.

Tabela 3 – Composição química do RB (%) produzido em diferentes países, segundo alguns autores.

Referência	País	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	TiO ₂	MgO	CaO	K ₂ O	LOI ⁽¹⁾
Pan <i>et al.</i> (2003)	China	9,46	7,17	17,75	3,23	2,41	1,51	38,69	0,5	16,38
Genç <i>et al.</i> (2003)	Austrália	34,05	25,45	17,06	2,74	4,90	1,86	3,69	-	-
Komnitsas <i>et al.</i> (2004)	Grécia	45,58	15,65	6,96	3,26	7,07	0,19	14,84	0,07	6,42
Diaz <i>et al.</i> (2004)	Espanha	37	12	-	5	20	-	6	-	-
Halász <i>et al.</i> (2005)	Hungria	33 - 48	16 - 18	9 - 15	8 - 12	4 - 6	0,3 - 1	0,5 - 3,5	-	-
Peng <i>et al.</i> (2005)	China	14,17	28,72	5,81	2,7	4,09	-	-	-	-
Wang <i>et. al.</i> (2005)	Austrália	60	15	5	16	5	-	-	-	-

Referência	País	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	Na_2O	TiO_2	MgO	CaO	K_2O	LOI ⁽¹⁾
Park & Jun (2005)	Coréia	16,6	23,7	22,9	11,6	6,7	-	6,7	-	-
Prado <i>et al.</i> (2006)	Brasil	30 - 60	10 - 20	3 - 5	2 - 10	2 - 8	0 - 10	-	-	-
Aires <i>et al.</i> (2013)	Brasil	31,22	20,77	14,37	9,87	4,55	3,92	2,49	0,2	12,61
Reis (2014)	Brasil	27,04	22,87	19,19	8,01	2,98	0,04	2,17	-	-
Ferreira (2016)	Brasil	62,78	14,02	15,15	-	7,39	-	-	-	-
Alam <i>et al.</i> (2017)	Índia	51,04	17,57	8,65	8,03	3,24	-	-	-	-
Wang <i>et al.</i> (2019)	China	19,79	23,53	18,00	6,91	3,38	14,91	-	-	-
Viegas <i>et al.</i> (2019)	Brasil	29,54	22,54	17,24	12,51	4,56	0,15	1,08	0,03	12,04

⁽¹⁾ - Perdas por ignição: representa a massa de umidade e material volátil presente em uma amostra.

Fonte: VIERGAS *et al.* (2019); AUTOR (2022), adaptado de FILHO *et al.* (2007).

De acordo com Snars e Gilkes (2009) a composição do RB pode ser distinta em uma mesma região, embora os conjuntos produzidos em diferentes refinarias a partir da bauxita coletada no mesmo depósito sejam bastante semelhantes.

Usualmente esse resíduo retém todo o ferro, titânio e sílica presentes na bauxita, além do alumínio que não foi extraído durante o refino, combinado com o sódio sob a forma de um silicato hidratado de alumínio e sódio de natureza zeolítica (REESE & CUNDIFF, 1955; MCCONCHIE *et al.*, 2002). O RB apresenta uma fração solúvel de aproximadamente 9%, constituída de elevada quantidade de Na_2O proveniente da digestão do minério com soda cáustica pelo processo Bayer, resultando no equivalente alcalino elevado de 10,3%, (ROMANO, 2016).

Em relação aos minerais constituintes, o RB também apresenta uma composição mineralógica complexa, com a presença de fases de baixa cristalinidade em virtude da baixa intensidade e do alargamento dos picos evidenciados por difratogramas de raios X (CASTALDI *et al.*, 2008; MERCURY *et al.*, 2010). A título de exemplificação, na Figura 8, pode-se observar um exemplo de DRX do RB obtido por Mercury *et al.* (2010) em seu estudo.

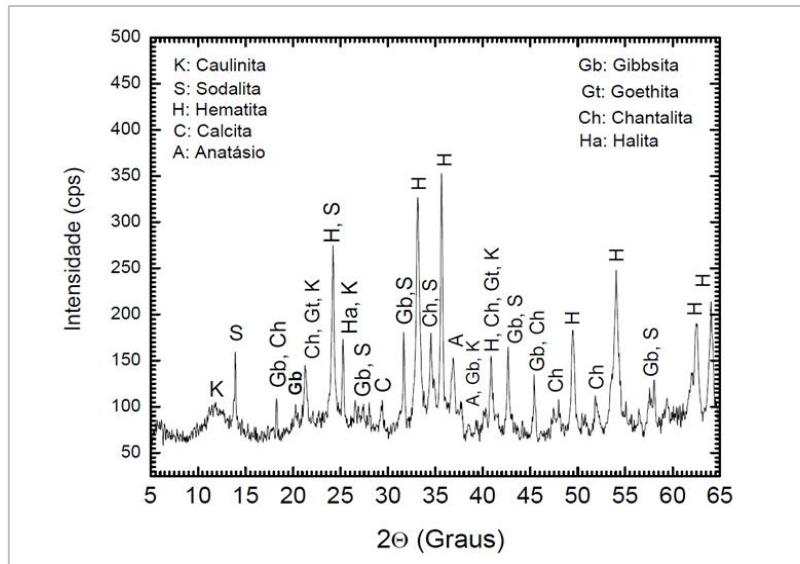


Figura 8 – Difração de raios X do RB.
Fonte: MERCURY *et al.* (2010).

Na fração insolúvel o resíduo apresenta fases mineralógicas características da matéria-prima, a bauxita, com maiores intensidades dos picos de hematita, muscovita, sodalita, hematita e quartzo. O baixo teor de gibbsita indica a boa digestão do minério (ROMANO, 2016).

2.3.3 Estudos de aplicabilidade do RB na construção civil

Ao longo dos últimos anos, vários estudos têm sido desenvolvidos no intuito de proporcionar aplicabilidades específicas para o RB, especialmente na construção civil (SINGH *et al.*, 1997; SLAVO *et al.* 2000a; SLAVO *et al.*, 2000b; PAN *et al.*, 2003; TSAKIRIDIS *et al.*, 2004; SOUZA, 2010; SANTOS, 2011; AIRES, 2014; SOUZA, 2022; JÚNIOR, 2022).

Lourenço (2013), em um estudo realizado na UFSCar utilizou RB oriundo de refinarias no Brasil como possível fonte alternativa de óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de férrico (Fe_2O_3) para clínquer de cimento Portland, obtendo resultados satisfatórios. Azevedo (2017) também caracterizou rejeitos de beneficiamento da bauxita para produção de cimento ambientalmente sustentável a um custo reduzido, obtendo sucesso em sua análise uma vez que o mesmo se comportou semelhante ao cimento Portland.

Ribeiro (2011), em seu estudo sobre a incorporação do RB em matrizes cimentícias, mostrou que a adição desse rejeito é benéfica ao concreto armado, reduzindo o potencial risco de corrosão da armadura e aumentando a resistividade elétrica. Assim, segundo o autor, o RB dentre outras possíveis aplicações, também se

apresenta como uma promissora adição ao concreto armado no intuito de inibir o processo corrosivo.

Zhang *et al.* (2011) avaliaram a possível viabilidade da mistura de RB com outros resíduos industriais para usar-se como um material cimentício, e desenvolveram cimento contendo 30% de RB, que possui propriedades de resistência à compressão semelhante ao do cimento Portland, entre 45,3 - 49,5 MPa. Segundo os autores, melhores valores de resistência à compressão foram demonstrados pela mistura contendo 30% de RB, 21% de escória de alto forno, 10% de cinzas volantes, 30% de clínquer, 8% de gesso e agente composto de 1%. Além disso, compararam ao método de produção tradicional para o cimento Portland comum e observam que a possível aplicação dessa tecnologia sustentável ligada ao RB é mais fácil de ser implementada.

Gordon *et al.* (1996), objetivando produzir um compósito cimentício para utilização como material de construção, sem empregar cimento Portland como ligante, realizaram a adição de diferentes quantidades de cal hidratada, microssílica e calcário do RB da Jamaica. Na intenção de obter silicatos de cálcio, os autores utilizaram a microssílica para reagir com cal livre, sendo esta reação de materiais silicosos com cal conhecida como reação pozolânica.

Em sua tese Souza (2010) afirma que resíduos de refino mineral, como o RB, tem grande potencial para a produção de agregados sintéticos com características semelhantes aos agregados graúdos naturais, tendo potencial de os substituir do ponto de vista técnico, pois nas análises realizadas com os concretos os mesmos obtiveram resultados satisfatórios de resistência mecânica. Rossi (2009) também afirma que o RB apresenta um grande potencial na produção de agregados sintéticos para concretos, por conta dos elevados valores de resistência à abrasão encontrados, podendo de certa forma substituir os agregados convencionais como o seixo natural e/ou pedra britada.

A Universidade Federal do Pará, atualmente, vem trabalhando acerca da aplicação do RB na construção civil (SOUZA *et al.*, 2022). Onde foi obtido sucesso na possibilidade de fabricação de agregados sintéticos com diferentes características físico-químicas, muitas das quais puderam ser parcialmente controladas durante o processo produtivo (ex.: massa específica, resistência mecânica, porosidade e inocuidade), assim ajudando a viabilizar o RB para produção de agregados para construção civil.

Estudos recentes do Instituto Federal do Pará (IFPA) em conjunto com a UFPA sobre o uso do RB na produção de agregados graúdos para concretos estruturais, especificam que os mesmos atendem aos padrões normativos vigentes (ex.: abrasão, perda ao choque, massa específica etc.) possuindo desempenho semelhante aos

agregados graúdos naturais (JÚNIOR *et al.*, 2022). Dessa forma, confirmado sua viabilidade técnica para fabricação de agregados, além do grande potencial para introduzir-se uma logística reversa para o rejeito visando esta aplicabilidade.

Como pôde ser evidenciado, têm sido realizados diversos estudos que propõem a utilização do RB como matéria-prima na produção de materiais de construção, em especial como componente principal na sinterização de agregados para concreto. Isso no intuito do mesmo ser futuramente utilizado e normatizado na construção civil, já que essa indústria tem uma capacidade de consumo compatível com a escala de produção do resíduo (BITENCOURT, 2012).

Apesar do volume de estudos acerca da aplicação do RB na construção civil, especificamente na viabilidade de produção de agregados sintéticos, o meio científico ligado a estes agregados ainda carece de informações acerca da durabilidade de concretos com eles produzidos, frente aos agentes agressivos (OLIVEIRA, *et al.*, 2012).

2.4 AGREGADOS SINTÉTICOS

2.4.1 Sinterização de agregados

O processo de sinterização define-se como sendo uma transformação física e química a nível permanente, sendo acompanhada, geralmente, de uma redução da porosidade do material pelo sistema de crescimento e contorno de grão (REIS, 2014).

Gomes Neto (1998) explica que na sinterização é feito uma mistura da matéria prima com uma quantidade definida de combustível, podendo ser carvão mineral/vegetal finamente moído ou coque. Logo após, esse material é exposto a elevadas temperaturas, acarretando na expansão do mesmo devido à formação de gases. Santos *et al.* (1986) reforça que os agregados produzidos por meio de sinterização podem apresentar poros abertos, elevada capacidade de absorção de água e não possuir recobrimento. Ou seja, o processo de sinterização pode produzir agregados que possuem alta rugosidade, formas angulares (dependendo do método) e superfície porosa (ROSÁRIO, 2013). No caso de agregados pré-conformados por meio de extrusão antes da sinterização, o formato mais cilíndrico-angular dos mesmos pode proporcionar um incremento na resistência mecânica, dependendo da composição, mas também gera um aumento na quantidade de água necessária para se obter uma trabalhabilidade adequada aos concretos (ZHANG & GJFRV, 1990a; CEB/FIP, 1997).

Segundo Rosário (2013), em estudos realizados na UFPA, as características exigíveis dos agregados sintéticos são: resistência mecânica satisfatória e inocuidade;

e são geralmente obtidas por meio da calcinação destes materiais à elevadas temperaturas. Conforme Souza (2010), a qualidade do produto está atrelada basicamente à três fatores, sendo estes: a matéria prima utilizada, temperatura de queima e o processo de conformação da mistura cerâmica.

A produção dos agregados sintéticos é feita por meio do aquecimento da matéria prima, triturada ou moída, na maioria das vezes pelotizada, utilizando geralmente um forno rotativo para o agregado adquirir uma forma arredondada. Ainda segundo o último autor citado, ao se observar os estudos relacionados a produção de agregados sintéticos, conclui-se que quase todo material argiloso (após hidratado e pelotizado), forma grãos rígidos ao ser submetidos à queima.

Rossignolo (2003) concluiu que agregados produzidos por meio de forno rotativo apresentam formato regular e âmago formado por uma massa esponjosa envolvida por uma camada cerâmica vitrificada, que apresenta boa resistência mecânica e baixa permeabilidade, que confere ao agregado uma porosidade fechada além de granulometria variada. O autor também conclui que agregado produzidos por este processo recebem a denominação de “encapado” por possuírem essa camada externa de aspecto vítreo responsável pela redução significativa da absorção de água, mas prejudicando a aderência do mesmo a pasta de cimento.

A produção por forno rotativo também pode proporcionar, além da forma mais esférica e fina camada externa com baixa porosidade, a melhoria da trabalhabilidade de concretos e baixas relações água/cimento, o que contribuiu com a resistência mecânica (ROSSIGNOLO, 2003). O autor ainda destaca, entretanto, que por conta do formato arredondado, o agregado pode mostrar maior facilidade de segregação ao ser comparado com ao produzido por outros métodos.

Conforme estudos de Souza *et al.* (2019), a temperatura de sinterização tem função muito importante no controle das variáveis do agregado sintético, dentre as quais pode-se destacar: resistência mecânica, densidade, porosidade; absorção de água e controle da lixiviação de metais pesados contidos nas matérias-primas.

A produção de agregados sintéticos valoriza o reaproveitamento de resíduos diversos, principalmente minerais. Segundo Costa *et al.* (2014) o processamento desses rejeitos é um importante tema a ser abordado tanto do ponto de vista para redução da poluição ambiental quanto à potencialidade para o reaproveitamento.

Do ponto de vista econômico-social, a utilização do RB na sinterização de agregados, apesar de não parecer ambientalmente tão favorável por conta do processo produtivo, torna-se atrativa devido ao elevado consumo desse em todo o mundo ser compatível com a geração também elevada do resíduo (SOUZA, 2010; RIBEIRO *et al.*,

2011). Segundo Krivenko *et al.* (2017), seus estudos demonstram que a presença do RB não é perigosa para as aplicações voltadas à materiais de construção, desde que tratados corretamente.

2.4.2 Agregados graúdos produzidos a partir do RB

No ano de 1990 a Hydro Alunorte realizou uma parceria com a Universidade Federal do Pará no intuito de desenvolver estudos utilizando o RB, produzido durante o processo Bayer, como matéria prima para obtenção de possíveis materiais de aplicação na indústria civil, a exemplo, materiais cerâmicos (SOUZA *et al.*, 2002). Os autores chegaram à conclusão que a mistura do RB, sílica e argila em proporções e temperaturas de calcinação definidas apresenta-se viável para o uso na produção de agregados sintéticos, uma vez que as análises mecânicas realizadas em concretos produzidos com esses agregados obtiveram bons resultados físico-mecânicos.

Rossi (2009) e Oliveira *et al.* (2012) sugeriram para literatura científica a produção de agregados graúdos para uso em concreto; agregados esses obtidos por meio da extrusão e/ou conformação manual, mostrando em alguns casos, resultados interessantes quanto ao desempenho. Os autores também afirmam que a aplicação do RB na produção de agregados é uma proposta promissora, já que é um insumo de grande demanda na construção civil, dessa forma podendo ser incluídos na composição dos concretos em proporções que variam entre 35 a 50%.

Oliveira *et al.* (2012) nas conclusões de seu estudo realizados na UFPA afirmam que o uso direto do RB, na produção de diferentes tipos de agregados graúdos por meio da sinterização, leva a resultados bastante motivadores, onde o formato arredondado do produto final, a maior concentração de RB na mistura e, principalmente, a maior proporção de agregados graúdos utilizados na matriz cimentícia contribuem positivamente para melhores desempenhos mecânicos em concretos.

Em 2013, na UFPA, Rosário também sugere a produção de concretos utilizando agregado graúdo sintetizado a partir do RB, na qual primeiramente faz um estudo de dosagem e caracterização. Em sua pesquisa a autora utiliza RB, sílica, argila e carvão vegetal nas proporções de 60%; 20%; 10% e 10% respectivamente, concluindo por meio dos resultados que os agregados produzidos demonstram um grande potencial para uso na construção civil devido as características físico-mecânicas apresentadas e proporcionadas.

Aires *et al.* (2014) em seu estudo sobre a incorporação do RB na indústria civil produziu agregados por meio da prensagem uniaxial, posterior calcinação (1050 °C) e

britagem, de uma formulação com 50% do RB em relação à massa de argila. O estudo teve como base um anterior de mesma autoria na qual foram produzidos agregados graúdos sintéticos com proporções de 50%; 60% e 70% do RB em relação à duas amostras distintas de argilas. Dessa forma, analisando a influência do rejeito em suas propriedades físico-mecânicas à diferentes temperaturas de calcinação (850 °C, 950 °C e 1050 °C). A autora obteve resultados satisfatórios, corroborando com a literatura científica a respeito da aplicabilidade do RB na indústria civil, apesar da durabilidade do concreto produzido não ter sido contemplada no seu estudo.

O RB na produção de agregados graúdos sintéticos também tem sido alvo de pesquisas no cenário internacional, como forma de refinar as aplicabilidades propostas no meio científico da construção civil. Mudgal *et al.* (2018) propôs a produção de agregados artificiais densos, pelotizados e calcinados à 1300°C, utilizando o resíduo da bauxita em conjunto com aditivos químicos; assim obtendo amostras com altas resistências à abrasão e perda ao choque juntamente com densidades variando entre 3,70 - 4,16 g/cm³. Sun Y. *et al.* (2021) produziram agregados graúdos sintéticos de baixa densidade (1,78 g/cm³), baixa absorção de água (0,8%) e resistência mecânica individual da partícula na ordem de 27 Mpa; os autores utilizaram a mistura pelotizada e posteriormente calcinada do RB junto a cinza volante na obtenção dos agregados em questão. De forma semelhante, Tian *et al.* (2021) também utilizaram o resíduo da bauxita junto às cinzas volantes na produção de agregados sintéticos leves, em substituição ao natural, para aplicações na construção civil, obtendo assim partículas/grãos de elevada resistência mecânica e baixa absorção de água.

Apesar dos potenciais riscos que o RB *in natura* (não tratado) pode trazer ao meio ambiente por conta do seu teor cáustico, o processo de sinterização explanado na literatura científica para produção de agregados graúdos, geralmente em conjunto com argila e outros, provoca uma insolubilização do hidróxido de sódio solúvel presente inicialmente na mistura e assim conferindo certa inocuidade (COSTA, 2014).

Baseando-se na literatura até aqui mencionada, observa-se o potencial que o RB possui na produção de agregados, principalmente graúdos, no que tange ao emprego na construção civil.

2.6 DURABILIDADE

2.6.1 Conceitos e Generalidades

O American Concrete Institute - ACI (1991), no Comitê 201, define a durabilidade do concreto de cimento Portland como a sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração, mantendo sua forma original e qualidade quando exposto ao meio. A Associação Brasileira de Normas Técnicas, na norma referente à projetos de estruturas de concreto armado (ABNT NBR 6118:2004), coloca que a durabilidade “consiste na capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto”.

Medeiros *et al.* (2011) já define a durabilidade como o resultado da interação físico-química entre a estrutura de concreto, o ambiente, as condições de uso, operação e manutenção. Dessa forma não sendo uma propriedade inerente apenas à estrutura, armadura ou ao próprio concreto.

O concreto é constituído por compostos naturais, material cimentício e adições minerais ou industrializadas. Os processos físico-químicos presentes no concreto desenvolvem-se ao longo de toda sua vida, os quais, dependendo do tipo de interação, podem afetar a sua qualidade e a sua durabilidade. Até meados da década de 80, pensava-se que o concreto possuía uma durabilidade indefinida e subjetiva, os autores como Medeiros *et al.* (2011), em seus respectivos estudos perceberam que este conceito de durabilidade indefinida é errôneo e não pode mais ser utilizado uma vez que a cada dia mais são aprofundadas questões que tratam sobre as propriedades e a durabilidade das estruturas de concreto armado. Dessa forma toma-se por base a significativa importância dos custos de manutenção e intervenções que se fazem necessárias em estruturas, a fim de garantir seu desempenho e durabilidade, bem como as origens de patologias que as atingem e seus efeitos nas estruturas.

Segundo Brandão (2007), Milani & Kripka (2012) e Lucena (2016), a durabilidade das estruturas de concreto armado tem sido objeto de estudo nas últimas décadas, especialmente relacionada aos fenômenos que propiciam a corrosão das armaduras, já que é uma das manifestações patológicas que mais as afetam segundo os autores. Haque & Kawamura (1992) *apud* Kalsing (2020) associam a principal causa de patologias no concreto armado, relacionadas a corrosão do aço, à perda de eficiência do concreto de recobrimento das armaduras através deste processo, permitindo o ingresso de agentes agressivos que causam a despassivação das armaduras.

Segundo Helene e Gjørv (2015), há uma certa ausência de informações padronizadas quando se fala na durabilidade de estruturas, especialmente quando a mesma está submetida a mais de um processo deteriorativo. E esta ausência de dados implica no aspecto econômico da construção civil. Medeiros *et al.* (2011) em um estudo anterior defendem que uma mesma estrutura pode ter diferentes comportamentos, ou seja, diferentes funções de durabilidade no tempo segundo suas diversas partes, também dependente da forma como as mesmas são utilizadas.

Mehta & Monteiro (1994) afirmam que os custos de reparos e substituições em estruturas devido a falhas nos materiais têm se tornado parte substancial do orçamento total das construções. Segundo os mesmos autores, a preservação de recursos através da produção de materiais mais duráveis é, além de tudo, um passo para o desenvolvimento sustentável. Cerca de 40% dos custos da indústria da construção civil dos países desenvolvidos são destinados a recuperação de estruturas prontas por conta dos processos deteriorativos ligados a durabilidade (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Segundo Silva *et al.* (2020), a porosidade do concreto e dos agregados está diretamente ligada ao desempenho e durabilidade das edificações. Troian (2010) afirma que uma boa durabilidade do concreto está atrelada à sua fabricação, com materiais não expansivos e de características que proporcionem resistir às agressões decorrentes do ambiente que está inserido.

2.6.2 Efeitos das características dos agregados na durabilidade do concreto

Com o passar do tempo a microestrutura e as propriedades dos materiais podem mudar em decorrência de interações ambientais, e como consequência a durabilidade do concreto é alterada (MEHTA & MONTEIRO 1994).

Algumas características importantes dos agregados graúdos como massa específica, porosidade, resistência mecânica, forma, textura superficial e absorção de água também determinam as propriedades dos concretos no estado fresco e endurecido (MEHTA & MONTEIRO, 2008; SILVA *et al.*, 2020). Atentando-se para a porosidade do agregado, a mesma influencia na absorção de água do concreto também afetando a demanda de água, que pode repercutir negativamente no alcance da trabalhabilidade desejada (TROIAN, 2010).

Segundo Silva *et al.* (2020), grãos/partículas de formato irregular têm influência negativa nas propriedades do concreto, os agregados graúdos irregulares provocam acumulo de água e consequentemente um aumento na porosidade do concreto que repercute na diminuição da sua vida útil. Os autores também afirmam que o formato equidimensional junto à uma textura superficial áspera do agregado graúdo confere uma

baixa porosidade, menor consumo de cimento, melhores características mecânicas, maior fluidez, aderência da pasta, economia e durabilidade do concreto.

Rao (2001) *apud* Silva et al. (2020) em seus estudos já mencionava que grãos de formato equidimensional são geralmente preferíveis ao invés de planos ou alongados para uso como agregados graúdos em concreto, uma vez que geralmente produzem melhor empacotamento das partículas. Grãos lamelares, segundo Silva et al. (2020), produzem uma mistura de trabalhabilidade reduzida com determinado teor de água, o que leva à uma compactação pobre e um maior número de vazios, dessa forma resultando em uma baixa durabilidade aos agentes agressivos (CO_2 e Cl^-).

A corrosão de armaduras é a manifestação patológica mais recorrente em estruturas de concreto armado (SILVESTRO, 2020), em decorrência do processo de carbonatação, penetração cloretos e até mesmo RAA. Os produtos formados durante o processo corrosivo são expansivos, gerando componentes até 600% do volume inicial de aço, e induzem o aumento das tensões internas no concreto resultando em sua deterioração, o que contribui para a drástica redução da vida útil das estruturas (TUUTTI, 1982; MEHTA & MONTEIRO 2008; RIBEIRO *et al.*, 2014).

A Figura 9 exemplifica de maneira resumida a deterioração do concreto por conta da corrosão da armadura, como consequência do estado avançado da carbonatação ou penetração de íons cloreto.



Figura 9 - Ingresso dos agentes agressivos e esforços produzidos, que levam à fissuração e destacamento do concreto devido à corrosão de armaduras.

Fonte: MEDEIROS (2011), adaptado de HELENE (1986).

2.6.3 Fatores de ingresso dos agentes agressivos no concreto

Em condições normais a armadura de aço encontra-se protegida fisicamente por uma barreira física que consiste no cobrimento do concreto, e esta dificulta o ingresso de substâncias que podem dar início ao processo de corrosão bem como limita o acesso de água e oxigênio (MEDEIROS, 2008).

A armadura também pode perder a proteção oferecida do concreto, geralmente, através da ação de elementos agressivos já contidos ou originários de fontes externas que atuam sobre o concreto, reduzindo a alcalinidade (pH) do mesmo ou rompendo a película protetora do aço (HELENE, 1993; SILVA, 2003).

Segundo Dyler (2015), a água permeia os poros do concreto levando com ela substâncias que podem produzir a deterioração, como no caso de íons de cloreto. A presença de água pode ser necessária para permitir que outros processos danosos se iniciem e progridam, tal como a reação álcali-sílica (que deve ser verificada de antemão no agregado utilizado). Além do mais, a umidade também desempenha papéis importantes, porém danosos, em outros processos que levam à deterioração mesmo que de forma mais lenta, como por exemplo a carbonatação.

Segundo os autores (HELENE, 1993; CASCUDO, 1997; FERREIRA, 2003 e NEPOMUCENO, 2005), o concreto apresenta quatro mecanismos de transporte dos agentes agressivos de maior importância, em relação à durabilidade: permeabilidade, absorção capilar, difusão e migração iônica. Podendo estes atuarem em conjunto ou de forma isolada, provocando um ou mais tipos de deterioração.

Além dos mecanismos mencionados, outros fatores relevantes influenciam de forma direta a velocidade e profundidade de penetração de agentes agressivos no concreto armado, acarretando na corrosão da armadura e posterior destacamento da sua superfície (CASCUDO, 1997). Estes são:

- i) temperatura
- ii) umidade
- iii) tipo de cimento e adições minerais
- iv) cobrimento das armaduras
- v) relação água/cimento
- vi) resistividade elétrica
- vii) resistência à compressão

2.6.4 Ataque de íons cloreto

Segundo Aïtcin (2003), a ação dos íons cloreto tem sido apontada como um dos, ou se não, o principal mecanismo de deterioração das estruturas de concreto armado. O autor também destaca que a entrada desses íons na estrutura pode acarretar na corrosão das armaduras de forma pontual e bastante agressiva, pois os íons não são consumidos no processo e seguem despassivando a camada protetora das barras de aço. Ribeiro & Medeiros (2014) afirmam que a penetração de íons de cloretos afeta mais as construções em locais litorâneos, por possuir grande concentração de íons livres.

De acordo com Helene (1993), os cloretos do ambiente em questão podem penetrar na estrutura através dos mecanismos clássicos de penetração de água contaminada e/ou difusão de íons. Dessa forma, para que haja a contaminação do concreto armado por cloretos, estes íons precisam estar dissolvidos em água uma vez que como cristais sólidos o cloreto não oferece risco elevado para as estruturas pois não penetra nos poros do concreto, que possuem dimensões mais reduzidas que a dos cristais usuais.

Seja qual for a fonte desses íons, o nível limite de concentração dos mesmos para iniciar a corrosão da armadura no concreto não parece assumir um valor padrão (CASCUDO 1997). O processo de corrosão das armaduras no concreto armado causada por cloretos é de rápida evolução, podendo chegar em casos extremos à aproximadamente 5 mm/ano em comparação com os 0,05 mm/ano no caso da carbonatação (BASHEER *et al.*, 2001). Segundo Cascudo (1997), os cloretos podem estar presentes no concreto em três formas distintas (Figura 10):

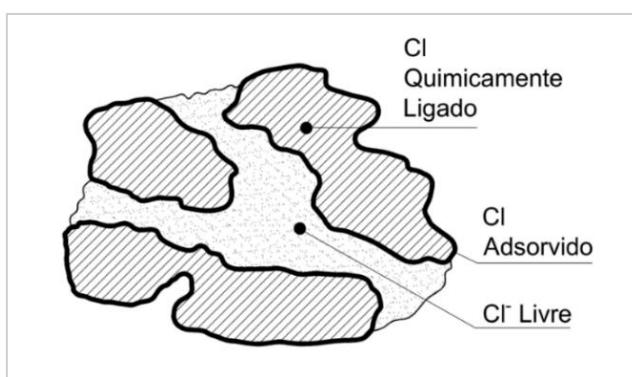


Figura 10 – Formas de ocorrência de íons cloreto na estrutura de concreto.
Fonte: CASCUDO (1997).

- Fisicamente adsorvidos: os íons cloreto são adsorvidos na superfície dos silicatos hidratados (C-S-H);

b) Quimicamente ligados: os íons cloreto se ligam com o aluminato tricálcio (C_3A) e com o ferroaluminato tetracálcio (C_4AF) formando, respectivamente, cloroaluminato de cálcio, conhecido como sal de Friedel, e cloroferrato de cálcio.

c) Livres na solução dos poros: efetivamente capazes de influenciar no processo corrosivo, despassivando a armadura.

O processo corrosivo da armadura no concreto (Figura 11), resultante da penetração de cloretos, é semelhante ao funcionamento de uma pilha eletroquímica onde há a reação de oxirredução (HELENE, 1987).

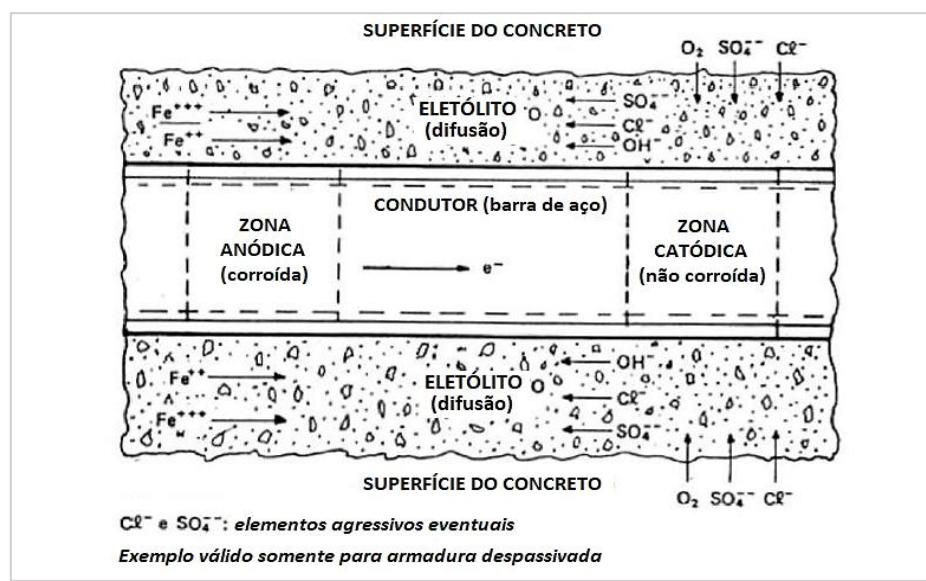


Figura 11 - Representação esquemática da corrosão eletroquímica no concreto armado.
Fonte: HELENE (1986).

De forma simplificada, em relação aos processos químicos envolvidos, os íons cloreto primeiramente se conectam ao aço (Equação 1) por meio dos mecanismos já mencionados e, após a hidrólise, esses íons então são liberados sem serem consumidos e existe a formação de hidróxido de ferro III, mais conhecido como ferrugem (Equação 2).



Conforme Souza & Ripper (1998), o interior do concreto de pH alcalino ($pH > 9$) garante a criação da película passivante - fina camada de óxido que protege a armadura - processo esse também conhecido como passivação. De acordo com Helene (1986),

quando existe a presença de íons cloreto também existe a quebra da película existente de passivação como mostrado na figura anterior, com o elemento funcionando como um catalizador, acelerando a corrosão e posterior deterioração do concreto como um todo.

Apesar da presença desses sais no concreto repercutir em um futuro processo corrosivo acentuado, também se observa que o mesmo é minimizado pela formação de cloroaluminato de cálcio, que é insolúvel e resulta da reação entre o cloreto e aluminatos do concreto. Uma vez que a formação desse produto insolúvel baixa os teores de cloretos solúveis a valores não-agressivos, os cimentos contendo teores elevados de aluminato tricálcico (C_3A) são mais indicados para resistirem a cloretos (GENTIL, 2006).

Segundo Bertolini *et al.* (2004) e Angst (2011) o patamar-limite de concentração de cloretos necessário para destruir a passividade das armaduras foi objeto de muitas pesquisas. Sendo que diversas técnicas de medida foram utilizadas e vários resultados diferentes foram obtidos, variando tipicamente entre 0,02% a 3,04% da massa de cimento.

Conforme Júnior (2019), na avaliação da resistência do concreto frente à penetração de íons cloreto, pode-se utilizar de normas técnicas internacionais capazes de analisar diferentes características do material (ex.: porosidade, coeficiente de difusão e migração). O autor também destaca que os ensaios propostos por tais normas, entretanto, consideram diferentes condições como: geometria do corpo de prova; saturação; concentração de sais na solução de exposição; duração do ensaio e a necessidade ou não de aplicação de uma corrente elétrica externa ao sistema. Yuan & Santhanam (2012) afirmam que as variações nestes ensaios proporcionam diferentes parâmetros de análise.

Levando em consideração o transporte do cloreto de maneira natural, tal fenômeno ocorre de maneira significativamente lenta para se analisar a qualidade do material pelo qual o íon penetra (YUAN & SANTHANAM, 2012; AHMAD & KUMAR, 2013). A partir daí surgem os ensaios acelerados como outra alternativa, que forçam o íon por meio da aplicação de uma corrente elétrica em uma solução de polaridade oposta ao do mesmo, conforme os últimos autores citados.

Entretanto, segundo Jen *et al.* (2017), os ensaios acelerados representam de maneira menos fiel ao real comportamento do íon em relação aos ensaios de difusão natural. Júnior (2019) elucida que também deve-se considerar que a penetração dos íons cloreto não ocorre de modo constante, dessa forma sendo diferenciadas por duas condições:

i) Estado estacionário - concentração de cloreto varia em função da capacidade de combinação à matriz cimentícia. Neste regime assume-se um caso em que o fluxo de difusão não varia com o tempo, ou seja, a massa do componente em difusão que entra numa região a ser analisada, é a mesma que sai, não existindo acúmulo (John Wiley & Sons, 2002).

ii) Estado não estacionário - fluxo de cloretos livre no material exposto. Neste regime, tanto o fluxo de difusão, quanto o gradiente de concentração, numa dada posição x, variam com o tempo t. Como resultado, ocorre um acúmulo ou esgotamento líquido do componente que se encontra em difusão. Geralmente está ligado a um experimento de imersão (MEDEIROS, 2008).

Baseado nisso, alguns métodos de análise da penetração de íons cloreto e seus respectivos referenciais normativos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resumo das principais metodologias para avaliação da penetração de cloretos no concreto.

Base Teórica	Tipo	Método de Ensaio	Parâmetro de análise	Duração	Referência normativa	Região
Segunda Lei de Fick	Natural	Imersão em solução de NaCl	Coeficiente de difusão do cloreto no estado não estacionário	> 35 dias	NT BUILD 443	Europa
		Imersão em solução de NaCl	Coeficiente de difusão do cloreto no estado não estacionário	> 35 dias	ASTM C1556	América do Norte
Equação de Nernst Planck	Forçado	Aplicação de corrente elétrica (12V) em sistema com NaCl e NaOH	Coeficiente de difusão do cloreto no estado estacionário	Várias Semanas	NT BUILD 355	Europa
		Aplicação de corrente elétrica (10-60V) em sistema com 11% de NaCl	Coeficiente de difusão do cloreto no estado não estacionário	24 - 96 horas	NT BUILD 492	Europa
		Aplicação de corrente elétrica (12V) em sistema com NaCl e H ₂ O	Coeficiente de difusão do cloreto no estado estacionário e não estacionário	> 14 dias	UNE 83987	Europa
Outros	Forçado	Aplicação de corrente elétrica (60V) em sistema com 3% de solução NaCl e NaOH	Resistência do concreto à penetração do cloreto em função da carga passante	6 horas	ASTM C1202	América do Norte
		Aplicação de corrente elétrica (60V) em sistema com solução de NaCl e NaOH	Resistência do concreto à penetração do cloreto em função da carga passante	6 horas	AASHTO T277	América do Norte
	Natural	Exposição de uma face prismática de concreto à solução de NaCl	Perfil de cloretos	> 90 dias	ASTM C1543	América do Norte
		Exposição de uma face prismática de concreto à solução com 3% de NaCl	Perfil de cloretos (ação de absorção capilar em conjunto com a difusão do cloreto)	90 dias	AASHTO T259	América do Norte

Fonte: JÚNIOR (2019), adaptado de YUAN & SANTHANAM (2012).

Algumas das metodologias de análise dos íons cloreto levam em consideração a aspersão da solução de nitrato de prata (AgNO₃) como método colorimétrico indicativo, para visualização da penetração. Dessa forma, a partir da formação do cloreto de prata (AgCl), é possível visualizar uma região “esbranquiçada” contendo cloretos. Segundo

Otsuki *et al.* (1992) *apud* Júnior (2019), as leituras de profundidade de penetração dos íons cloreto são obtidas utilizando uma solução de 0,1 mol (0,1%) de AgNO₃, que reage quando há uma concentração mínima de 0,15% do íon sobre a massa de cimento a qual foi exposto.

Outro ponto importante a se destacar é o fato de alguns dos ensaios abordados adotam, como um dos parâmetros, a concentração de 3% na solução com o agente agressivo (NaCl), sendo próxima a concentração deste sal *in natura* presente em águas marinhas ($\approx 2,81\%$) conforme Jones (1999), Matsuura & Visser (2001) *apud* Alves (2006). Dessa forma tornando o ensaio, caso natural, próximo ao fenômeno que ocorre na natureza, pois tenta simular as condições de agressividade do meio (JEN *et al.*, 2017).

A determinação de uma condição específica do ensaio serviria apenas para classificar os concretos, mas não poderia ser usada em modelos de previsão de durabilidade, já que a condição do ensaio precisa ser semelhante à condição real de exposição da estrutura no meio ambiente (ANDRADE *et al.*, 2001). Apesar disso, segundo Kropp *et al.* (1995), o concreto pode ser caracterizado por meio do coeficiente de difusão (D), que representa a habilidade do material em permitir o transporte de uma determinada substância em sua massa. O autor também ressalta que o coeficiente de difusão depende da concentração de cloretos, da temperatura e da disponibilidade de eletrólito.

A intensidade da difusão de íons cloretos depende do grau de saturação do concreto, onde o mecanismo dessa difusão cessa se os caminhos de líquido dos poros capilares forem interrompidos pela secagem (GUIMARÃES, 2000). Dessa forma segundo o autor, difusividade máxima ocorre em condições de saturação total e reduz de forma contínua com a diminuição do teor de umidade no meio.

2.6.5 Avaliação da resistência à penetração de íons cloreto do concreto

Segundo Andrade *et al.* (2000), os ensaios de curta duração resultam em coeficientes de difusão no estado não estacionário maiores do que os valores obtidos em medidas de longo prazo e nas estruturas reais. Com relação aos ensaios acelerados que geralmente utilizam uma corrente elétrica de uma fonte externa, Thomas *et al.* (2018) destacam que o possível aumento da temperatura nas soluções comprometeria a real taxa de penetração do cloreto no concreto. Dessa forma, os melhores ensaios para reproduzir condições reais deveriam ser ensaios mais longos, isso caso se disponha de tempo suficiente para realiza-los. A elevada duração dos ensaios naturais

em comparação aos métodos acelerados permite resultados mais próximos à realidade (AHMAD & KUMAR, 2013; JEN *et al.*, 2017; THOMAS *et al.*, 2018).

Ribeiro *et al.* (2021) em seus estudos publicados pelo IBRACON sobre o ingresso dos íons cloretos no concreto, fornecem alguns parâmetros para análise do fenômeno baseado em algumas das normas internacionais já citadas além de estudos de outros autores (MANGAT & LIMBACHIYA, 1999; GUIMARÃES & HELELE, 2001; FRANÇA, PEREIRA e MOTA, 2011; FIGUEIREDO *et al.* 2014).

Júnior (2019) com base nos estudos de Gjørv (2009), além de uma extensa análise de dados junto à estudos estatísticos, propõe uma classificação dos concretos quanto a resistência à penetração dos íons cloreto (Tabela 5). Esta classificação correlaciona resultados de 4 diferentes metodologias de avaliação do fenômeno (acelerados e naturais), utilizando como parâmetro as faixas da profundidade de penetração dos íons cloreto para cada método. Tal proposta mostrou-se promissora, uma vez que o autor obteve um coeficiente de determinação médio (R^2) de 0,9226 para a classificação.

Tabela 5 – Proposta de classificação da resistência à ação de cloretos nos concretos com base na profundidade de penetração, para 4 metodologias distintas.

Dns ($10^{-15} \text{ cm}^2/\text{s}$)	Resistência do concreto à penetração de cloretos	Profundidade de penetração de cloreto (mm)			
		ASTM C 1202 (2017)	AASHTO T290 (1980)	NT BUILD 492 (1999)	NT BUILD 443 (1995)
1,5	Baixa	> 27,8	> 25,0	> 29,9	> 21,0
1,0 - 1,5	Moderada	19,19 - 27,8	18,4 - 25,0	21,7 - 29,9	16,2 - 21,0
0,5 - 1,0	Alta	12,1 - 19,9	11,8 - 18,4	13,6 - 21,7	11,4 - 16,2
0,25 - 0,5	Muito alta	8,1 - 12,1	8,5 - 11,8	9,5 - 13,6	9,0 - 11,4
< 0,25	Extremamente alta	< 8,1	< 8,5	< 9,5	< 9,0

Fonte: JÚNIOR (2019), adaptado de AASHTO T290 (1998), NT BUILD 443 (1995), NT BUILD 492 (1999) e ASTM C1202 (2017).

Com relação aos agregados graúdos sintéticos, produzidos a partir do RB, ainda há uma certa escassez de pesquisas que apontem com detalhes a influência deste agregado na resistência ao ataque por cloretos nos concretos. Uma vez que o aspecto de durabilidade que este agregado sintético proporciona ao concreto estrutural ainda está sendo estudado no Brasil e ao redor do mundo, o mesmo deve ser investigado para que se tenham mais informações.

2.6.6 Reação álcali-agregado (RAA)

Segundo Mizumoto (2009), dentre as manifestações deletérias conhecidas no concreto pode-se também destacar a RAA, que é caracterizada por proporcionar um quadro de fissuração desordenada e deformações diferenciais nessas estruturas. Onde basicamente ocorre uma reação química entre os álcalis do cimento e os minerais dos agregados (reativos) na presença de umidade. Valverde (2001) explica que agregados reativos são aqueles que possuem componentes que interagem com o aglomerante, nesse caso o cimento, resultando em uma expansão deletéria da mistura após enrijecida.

O fenômeno também pode favorecer outros processos de deterioração como a carbonatação, por conta das fissurações geradas (REIS & SILVA, 1997). Segundo Tiecher (2006), geralmente o fenômeno envolve íons alcalinos, especialmente o potássio (K^+) e sódio (Na^+), advindos de frações argilosas (xisto ou argila) provenientes do cimento, de íons hidroxilas (OH^-) e alguns minerais que compõem os agregados.

A sílica presente no agregado interage com os íons alcalinos presentes na pasta de cimento, na presença de umidade, sendo o produto desta reação um gel sílico-alcalino, geralmente visível na interface pasta/agregado e nos poros do concreto, com caráter predominantemente expansivo. A Figura 12 ilustra de forma simplificada a RAA, conforme Balbo (2015).

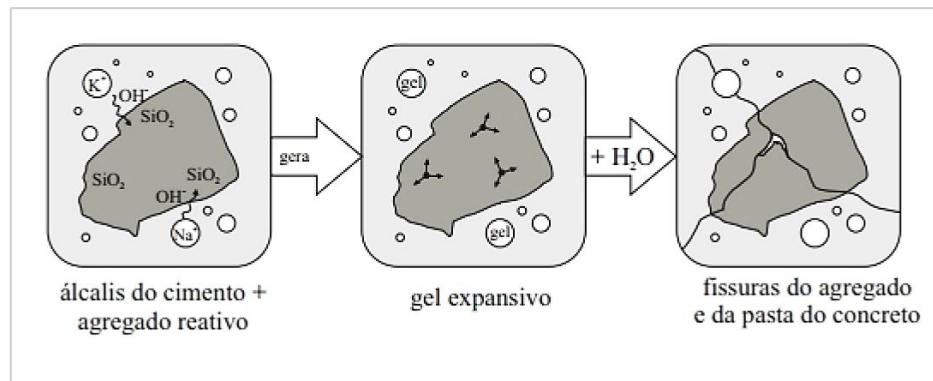


Figura 12 - Formação do gel expansivo decorrente da reação álcali-sílica, e posterior fissura do agregado e matriz cimentícia. Fonte: BALBO (2015).

Fournier & Berubé (2000) afirmam que o gel alcalino formado na RAA absorve água e não pode se expandir livremente, pois está contido mecanicamente pela pasta de cimento endurecida. A fissuração no concreto ocorrerá de fato quando a tensão exercida em determinado local, pela reação expansiva do gel, exceder a resistência à tração da pasta de cimento ou do agregado graúdo (NOGUEIRA, 2010).

Um dos principais agravantes da RAA, se não o maior, está relacionado à sua manifestação contínua ao longo do tempo, aumentando gradativamente o quadro de fissuração do concreto e comprometendo sua durabilidade (MIZUMOTO, 2009). Dessa maneira, ao se empregar novos agregados no concreto, como o analisado neste trabalho, é imprescindível realizar estudos preliminares através de ensaios de avaliação da potencialidade reativa destes materiais antes de serem utilizados.

Conforme alguns autores (HASPARYK, 1999; CICINELLI, 2008 e MIZUMOTO, 2009) o processo químico de deterioração do concreto pelo RAA pode ser classificado em função do tipo e da mineralogia do agregado reativo envolvido, de três formas distintas:

a) reação álcali-sílica (RAS)

Segundo Mizumoto (2009), a RAS é o tipo mais comum pois seu processo evolutivo é mais rápido e melhor detectado nos ensaios de reatividade.

A RAS é decorrente da interação química entre a sílica do agregado reativo e os álcalis oriundos do cimento, dos agregados que contenham feldspatos alcalinos, ou outras fontes externas, tais como soluções de sulfato de sódio (Na_2SO_4) e cloreto de sódio (NaCl). Haspary (2005) explica que os álcalis presentes no cimento, representados pelo Na_2O e K_2O , podem se apresentar na forma solúvel ou insolúvel, sendo a primeira encontrada nos sulfatos, cuja fonte de fornecimento é mais rápida à reação, ao passo que a segunda se apresenta nas fases sólidas do clínquer (fases sulfatos e aluminatos) com uma interação química mais lenta decorrente do processo de hidratação.

Dessa forma, estes componentes alcalinos em forma de solução acarretam no aumento da alcalinidade nos poros do concreto (pH), elevando a concentração de hidroxilos (OH^-) responsáveis pela reação.

b) reação álcali-silicato (RASS)

Segundo Cincinelli (2008), outra forma de RAA é a reação álcali-silicato (RASS), que se caracteriza por apresentar uma natureza mais lenta e complexa em comparação aos outros tipos, sendo o tipo reação mais comumente encontrado em barragens brasileiras e em blocos de fundação em cidades litorâneas como Recife-PE.

A interação reativa da RASS se dá entre os álcalis do cimento e alguns tipos de silicatos encontrados em rochas sedimentares, metamórficas e ígneas.

De acordo com Kihara (1986), os agregados rochosos suscetíveis a este tipo de reação apresentam fundamentalmente quartzo “tensionado” proveniente de processos tectônicos ou minerais expansivos da classe dos filossilicatos, tais como vermiculitas, ilitas e montmorilonitas expansivas. Dolar-Mantuani (1981) afirma que o quartzo tensionado é atribuído como o principal agente responsável da reação, sendo caracterizado termodinamicamente por sua elevada entropia e identificado via microscopia de luz polarizada, pelo ângulo de extinção ondulante superior a 25°.

c) reação álcali-carbonato (RAC)

A RAC é menos comum, e está presente em rochas carbonáticas, onde ocorre a desdolomitização do calcário e o enfraquecimento da ligação pasta-agregado, decorrente da reação entre dissoluções alcalinas e a dolomita (MIZUMOTO, 2009). Segundo Kihara (1986), nesta reação não ocorre a formação de um gel, sendo o mecanismo de expansão decorrente da combinação de dois fenômenos: a desdolomitização, que desestrutura a textura do calcário e a ocorrência de argilominerais (ilita) que beneficiam a desagregação do agregado.

O cimento do tipo CP IV, por conta do elevado teor de pozolanas (15 - 50%) em comparação aos demais, tem um efeito mitigador na RAA podendo até inibi-la em alguns casos. E a presença desta adição confere a este cimento Portland propriedades melhoradas como: baixo calor de hidratação, menor permeabilidade e boa durabilidade. Dessa forma o mesmo torna-se o mais recomendável em análises envolvendo agregados reativos (NEVILLE, 2016).

A reação álcali-agregado se manifesta em condições semelhantes à de carbonatação uma vez que ambos os fenômenos se desenvolvem em condições de umidade propícia, além de possuir elementos químicos comuns que interagem nos poros do concreto (MIZUMOTO, 2009). Segundo o último autor citado, cabe lembrar que embora os dois fenômenos sejam semelhantes em alguns aspectos, o comportamento do pH em ambos possibilita uma distinção entre eles uma vez que na reação álcali-agregado se tem uma constância deste fator; enquanto na carbonatação tem-se uma diminuição do mesmo.

Com relação às análises da RAA, segundo Souza (2021b), no Brasil, o método acelerado utilizando barras de argamassa (ABNT NBR 15777-4:2008) é o mais adotado no meio científico da construção civil. Alguns autores como Thomas *et al.* (2006), afirmam que o método em questão apesar de não garantir precisão excepcional, oferece

segurança para tomar-se medidas cautelares contra a RAA. Embora o método estabelecido pela ABNT NBR 15777-4:2008 seja prático e de fácil realização, pode apresentar resultados discrepantes com a realidade uma vez que agregados inóculos em ensaios podem mostrar-se reativos em campo e vice versa (SANCHEZ, 2008; SOUZA, 2021b).

Conforme Valduga (2007), fatores como a diferença geométrica dos agregados, superfície específica dos grãos e relação a/c do concreto resultam em variações bastante significativas nos resultados das análises de reatividade. Souza (2021b) considera que o período de tempo e os limites de expansão dos agregados, no método acelerado das barras de argamassa, ainda não são universais, uma vez que há outras normatizações com diferentes parâmetros que tratam desta análise baseando-se nas características dos agregados existentes em seus respectivos países.

Segundo Santos (2018), que analisou a RAA utilizando agregados produzidos a base de argila na composição, os mesmos podem influenciar na durabilidade do concreto devido ao elevado teor de álcalis; contudo o mesmo autor mostra que estes álcalis presentes nos agregados sintéticos se mostram não prejudiciais. Conforme Ribeiro *et al.* (2012) o RB quando utilizado como adição em matrizes cimentícias, por apresentar um elevado teor de álcalis, principalmente o sódio, pode favorecer a reação álcalis-sílica que é altamente prejudicial a estrutura de concreto.

Quando se trata de agregados sintéticos produzidos a partir do RB calcinado junto a outros materiais, os mesmos podem ou não se comportar de maneira semelhante ao afirmado por Ribeiro *et al.* (2012), devendo esta característica ser investigada logo no início, antes do emprego destes agregados no concreto estrutural. Atualmente ainda estão sendo desenvolvidos estudos acerca do potencial reativo dos agregados sintéticos de RB, devido a carência de mais dados dos mesmos na literatura científica da construção civil.

2.6.7 Carbonatação

Segundo Pauletti *et al.* (2007), o processo de carbonatação (ou neutralização) é um fenômeno decorrente da reação físico-química entre o dióxido de carbono (CO_2), presente na atmosfera e os compostos hidratados do cimento tais como o hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e sulfoaluminatos. Sendo que esta reação tem como produto a formação de sais de carbonato de cálcio (CaCO_3) e a redução da concentração de hidróxidos nas soluções presentes nos poros da matriz cimentícia. Esse fenômeno consome o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a partir da reação com o CO_2 , promovendo a redução do pH dos materiais cimentícios do concreto.

De acordo com os autores mencionados acima, o avanço dessa reação é chamado de frente de carbonatação, que promove esta redução da alcalinidade no concreto. Tutti (1982) já afirmava em seus estudos que a carbonatação é um grande responsável pela iniciação da corrosão das armaduras no concreto, uma vez que o torna mais suscetível às patologias pois remove gradualmente a película passivadora que proteje o aço e propicia o processo de corrosão (CALAZANS, 2013; LUCENA, 2016).

Segundo Monteiro (2010), sempre que o concreto se encontre num meio contendo dióxido de carbono e água, o mesmo está suscetível a sofrer carbonatação. Kazmierczak e Helene (1993) afirmam que o ingresso do gás carbônico no concreto acontece por difusão devido à diferença de concentração entre o meio externo e interno, conferindo maior carbonatação àquelas estruturas inseridas em locais onde há maior concentração do gás.

De acordo com estudos de Polito (2006) o concreto normalmente possui meio alcalino com pH entre 12,6 e 13,5; este pode reduzir-se para próximo de 8,5 quando o processo de carbonatação é iniciado, o que leva a despassivação do aço e corrosão das barras da armadura. Metha & Monteiro (2008), em seus estudos, chegam a encontrar valores de pH semelhantes no efeito da carbonatação em concretos.

Vale ressaltar que os valores iniciais de pH do concreto são decorrentes em grande parte do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presente na matriz cimentícia, e ao longo do processo de carbonatação há uma gradual redução do mesmo (SALDANHA, 2013). A Figura 13 ilustra de forma resumida o fenômeno da carbonatação com o ingresso do gás carbônico no concreto.

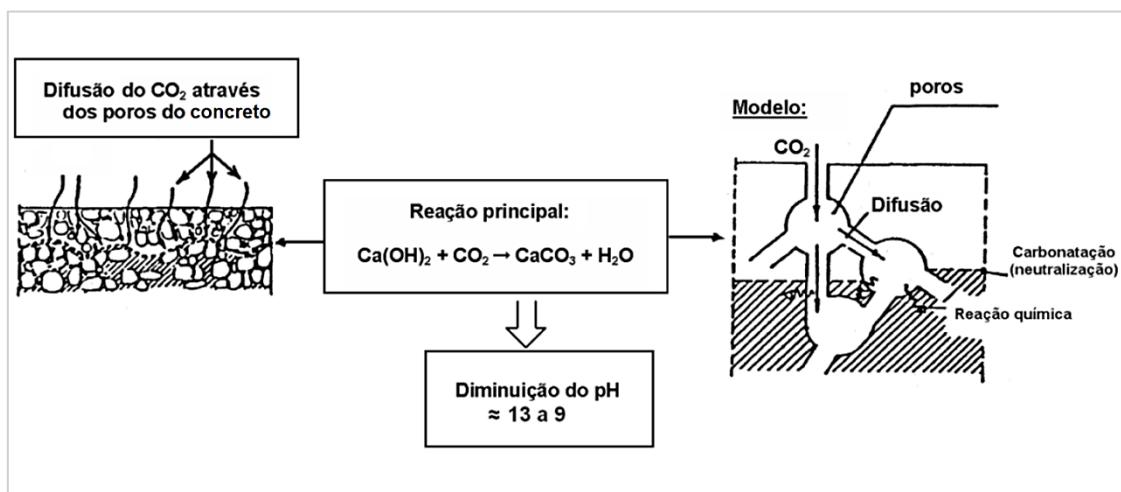


Figura 13 - Avanço do processo de carbonatação.
Fonte: SALTA (1966).

Segundo Papadakis *et al.* (1989, 1991a, 1991b, 1992) e Thiery (2005), o mecanismo de carbonatação pode ser resumido como elencado a seguir:

- i – Difusão do CO₂, na fase gasosa, dos poros e posterior dissolução na água dos poros;
- ii – Dissolução do Ca(OH)₂ na água dos poros e difusão do Ca(OH)₂ dissolvido das regiões de maior alcalinidade para as de menor alcalinidade;
- iii – Reação do CO₂ dissolvido com o Ca(OH)₂ dissolvido;
- iv – Reação do CO₂ dissolvido com C-S-H e compostos não hidratados da pasta de cimento;
- v – Redução do volume dos poros;
- vi – Condensação do vapor de água.

O fenômeno de carbonatação segundo Gouveia (2000) e Coutinho (2006) se torna, de fato, um agente agressivo para as armaduras a partir do momento em que a frente de carbonatação atinge toda a profundidade do recobrimento do concreto, e ao longo do tempo diminuindo o pH para valores próximos de 8, ocorrendo a despassivação das armaduras e formando os produtos de corrosão (Figura 14 e 15).

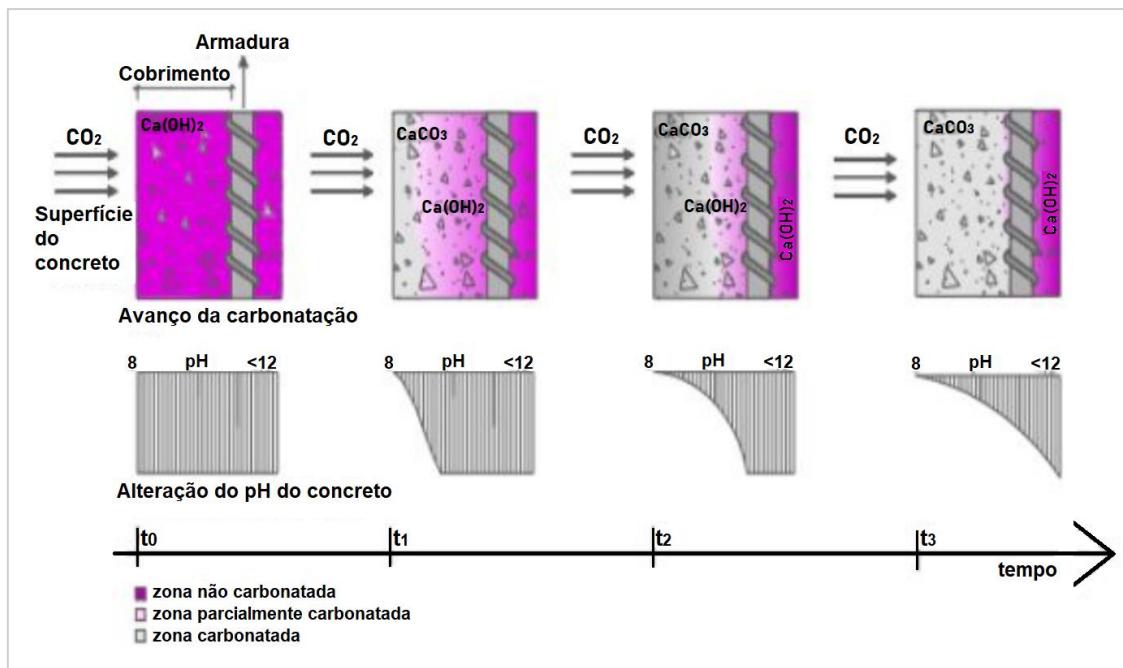


Figura 14 - Frente de carbonatação e alteração do pH do concreto ao longo do tempo.
Fonte: POSSAN (2010).

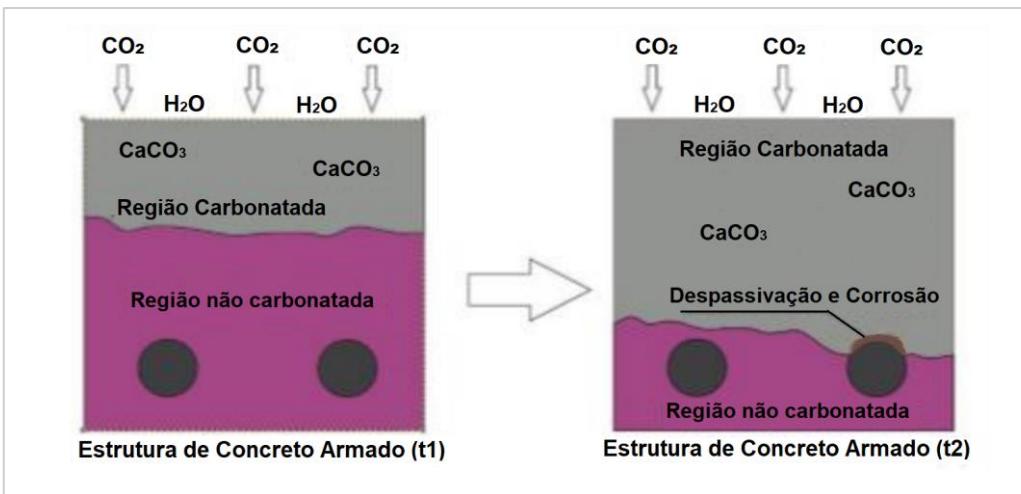


Figura 15 - Avanço da carbonatação com passar do tempo e despassivação da armadura.
Fonte: TASCA (2012).

Conforme estudos de Medeiros (2019), sobre o fenômeno da carbonatação, um dos fatores que mais interfere na velocidade de penetração do CO₂ na matriz porosa do concreto é a permeabilidade uma vez que o fenômeno se processa por meio da difusão. Este mecanismo é responsável por promover a movimentação de substâncias da região de maior concentração para uma região de menor concentração, independendo do fluxo de líquido no interior do concreto (JUNIOR, 2010). O último autor também destaca que ao se conhecer o mecanismo de transporte em questão, é possível afirmar que a profundidade de carbonatação não depende exclusivamente da concentração de CO₂ atmosférico, mas também da difusividade do agente agressivo para o interior do concreto.

É importante frisar que a carbonatação é uma reação lenta e natural no concreto, e ao longo do tempo o progresso da frente diminui significativamente, pois os produtos das reações tendem a preencher os poros, dificultando a entrada do CO₂ (CRAUSS, 2010).

A velocidade com que o CO₂ se propaga na estrutura é diferenciada de acordo com o meio difusor, podendo ser o ar ou água (TERZIAN & HELENE, 1992). De acordo com Isaia (1999), essa velocidade de propagação é dependente, especificamente, do grau de saturação dos poros do concreto, uma vez que a difusão é maior em umidade relativa entre 50-80% e decresce quando a umidade se aproxima do ponto de saturação. Segundo o último autor, esse fato é devido o coeficiente de difusão da água ser entre 100-400% menor que no ar.

Kobuku e Nagataki (1989) *apud* Tasca (2012) explicam que em condições naturais de exposição (0,03% a 1% de CO₂), o processo de carbonatação pode necessitar de vários anos para começar a apresentar dados passíveis de análise, sendo também em função da relação água-cimento (a/c) e da composição química do cimento.

Segundo os mesmos autores, para relações a/c mais elevadas ($> 0,60$), com cerca de um ano de exposição ao CO_2 , já é possível obter dados de profundidade carbonatada. Contudo, para concretos com relações a/c menores ($< 0,50$), o tempo demandado para determinar a velocidade de carbonatação pode levar até 20 anos em condições naturais.

A carbonatação segundo Costa (1999) e Possan (2010), não ocorre de forma homogênea ao longo do interior do concreto, apresentando assim três zoneamentos diferentes (Figura 16):

- A zona carbonatada (região onde o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ deu origem a CaCO_3) - $\text{pH} < 8,5$;
- A zona intermédia ou frente de carbonatação (região onde se processa a reação de carbonatação) – $\text{pH} \approx 10$.
- A zona não carbonatada (região ainda não alcançada pelo CO_2) – $\text{pH} > 12,5$;

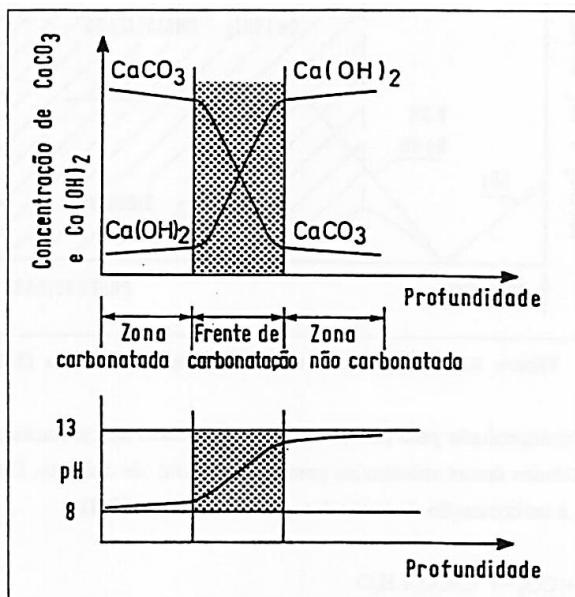


Figura 16 - Zonas envolvidas no mecanismo de carbonatação e variação do pH ao longo da profundidade do concreto. Fonte: COSTA (1999).

Apesar de tudo que foi elucidado acerca dos malefícios do excesso de CO_2 ao concreto, podem ser retirados alguns aspectos favoráveis da reação de carbonatação segundo Helene (2003), onde a transformação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em CaCO_3 , compostos muito insolúveis, conferem ao concreto uma redução da porosidade assim aumentando a resistência mecânica superficial e resistência a posteriores ataques químicos. Neville (1997) também comenta esse fato afirmando que a água liberada pela reação de carbonatação pode ajudar na hidratação do cimento, o que resulta numa maior dureza superficial, menor permeabilidade superficial e consequentemente menor movimentação de umidade. Dito isso, os efeitos deteriorativos da carbonatação estão

associados aos efeitos secundários da corrosão na armadura, gerando o aparecimento de manchas, fissuras, destacamentos do concreto e redução da seção resistente de maneira a promover o colapso de estruturas em casos mais graves (MIZUMOTO, 2009).

Mizumoto (2009) também ressalta que um fato importante a se destacar consiste que o comportamento do pH possibilita uma distinção entre a carbonatação e RAA, uma vez que podem ser confundidas, já que na primeira se tem uma diminuição deste fator enquanto na segunda este permanece inalterado. Além disso, o fenômeno não é perceptível a olho nu no concreto, sendo necessário o teste de pH com indicador químico visual da frente de evolução da reação, utilizando por exemplo a fenolftaleína.

Conforme estudos de diversos autores, (CASCUDO, 1997; ISAIA, 1999; PAPADAKIS *et al.*, 2000; MEHTA & MONTEIRO, 2008; PAULETTI, 2009; POSSAN, 2010; FERREIRA, 2013; RIBEIRO *et al.* 2021), assim como na penetração de íons cloreto, há certos fatores em comum que influenciam de maneira positiva ou negativa no processo de carbonatação e posterior corrosão da armadura no concreto. Dentre os quais pode-se citar:

a) Tipo de cimento (aglomerante)

Segundo estudos de Isaía (1999), a composição química do cimento é um fator importante para a determinação da velocidade da frente de carbonatação, uma vez que o avanço dessa frente é diretamente proporcional à reserva alcalina disponível na pasta de cimento. A substituição parcial de cimento por adições minerais proporciona um refinamento de poros (vazios grandes transformam-se em vazios pequenos), acarretando na melhora significativa na microestrutura do concreto tornando-o mais “denso” e resistente à penetração do CO₂ (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

A *American Concrete Institute* (ACI, 1991) afirma que o tipo do cimento confere características diferentes ao concreto, onde cimentos com adições, sob certas condições, diminuem a reserva alcalina, mas em contrapartida reduzem a permeabilidade e aumentam a resistividade elétrica do mesmo. Autores como Papadakis *et al.* (1992) ressaltam que nas reações pozolânicas presentes em outros tipos de cimentos, o Ca(OH)₂ é consumido, enquanto que no cimento comum (CP I) ele é produzido por conta do maior teor de álcalis. Segundo Cascudo *et al.* (2016), os cimentos como CP III (cimento Portland de alto forno) e CP IV (cimento Portland pozolânico) apresentam desempenho inferior frente à carbonatação, com menor tempo para iniciação da corrosão, comparando-os com cimentos sem adições minerais. A Figura 17 ilustra o comportamento de alguns tipos de cimento Portland mediante a resistência à carbonatação.

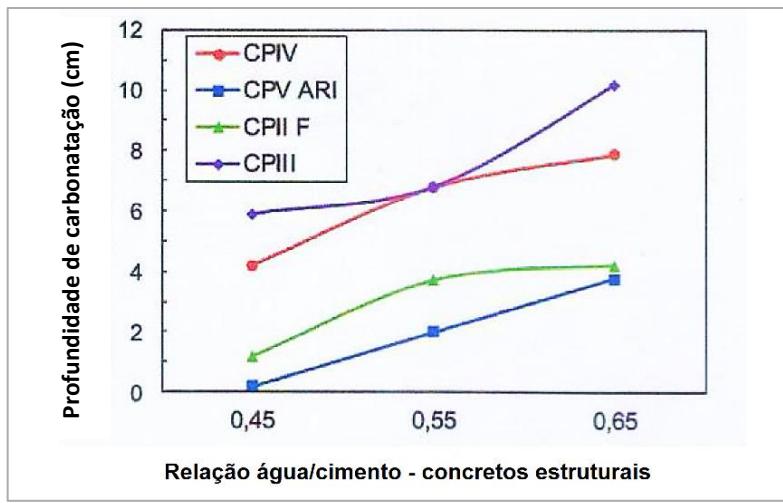


Figura 17: Influência do tipo de cimento na profundidade de carbonatação.
Fonte: RIBEIRO *et al.* (2021), adaptado de CASCUDO *et al.* (2016).

Neville (1997) afirma que os cimentos do tipo composto repercutem em menores teores de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sendo necessária uma quantidade menor de CO_2 para combinar-se com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, dessa forma produzindo CaCO_3 . Helene (1993) elucida que as adições ao cimento reduzem a porosidade, permeabilidade e aumentam a resistência à compressão, porém podem aumentar a profundidade de carbonatação até certo ponto.

b) Relação água/cimento (a/c)

Segundo Papadakis *et al.* (1991), Helene (1993) e Ferreira (2013), as propriedades microestruturais do concreto sofrem grande influência da relação (a/c). Segundo os últimos autores citados, outras características mecânicas e durabilidade do concreto endurecido podem ser influenciadas pela espessura de cobrimento, a qual fica em contato direto com as fôrmas. Conforme se aumenta a porosidade do concreto, em decorrência do aumento de água, torna-se mais fácil a difusão de gases para o interior do mesmo, obtendo-se uma maior velocidade de carbonatação.

Helene (1986) ainda afirma que reduções na relação a/c parecem contribuir para redução da absorção de água, porém, à medida que tornam o concreto mais denso e compacto, diminuem o diâmetro dos poros capilares e, desde que estes sejam intercomunicáveis, podem aumentar a absorção capilar. Conforme experimentos de concreto fissurados, realizados por Suzuki *et al.* (1990) *apud* Cascudo (1997), a relação a/c tem uma influência na corrosão mais significativa do que a própria espessura de cobrimento. A Figura 18 exemplifica, segundo Isaia (2005), a influência da relação a/c no processo de carbonatação do concreto.

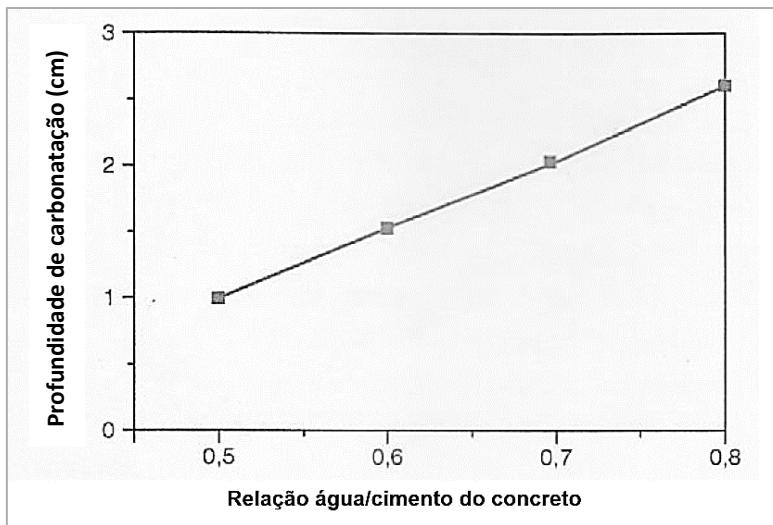


Figura 18: Influência da relação água/cimento na profundidade de carbonatação para condições específicas de ensaio e do concreto analisado. Fonte: RIBEIRO *et al.* (2021), adaptado de ISAIA (2005).

c) Concentração de dióxido de carbono na atmosfera

Tratando-se da concentração de CO₂, Parrot (1987), Uomoto & Takada (1993) afirmam que o aumento crescente do dióxido de carbono na atmosfera pode influenciar significativamente na profundidade de carbonatação das estruturas de concreto, sendo este aumento com velocidade ainda maior para concretos com relações a/c elevadas.

De acordo com Saetta & Vitaliani (2004), a concentração de CO₂ na atmosfera é um parâmetro ambiental de grande importância na taxa de carbonatação. Os autores, em seu estudo, apresentam as concentrações de CO₂ usuais em diferentes ambientes:

- i) Campo aberto - 0,015%
- ii) Centro urbano - 0,036%
- iii) Zona industrial - 0,045%

d) Umidade relativa do ambiente (UR)

Segundo Kazmierczak (1995) e Figueiredo (2004), variações na umidade do ambiente acarretam também em variações na profundidade de carbonatação. Em umidades elevadas a água obstrui os poros, dificultando o processo de difusão. Já em umidades muito baixas, não ocorre difusão por falta do agente de transporte do gás para o interior do concreto e pela insuficiência de moléculas de H₂O para reagir com o CO₂ (TASCA, 2012).

Papadakis (1991) e Monteiro (2010) afirmam que por mais que se aumente a concentração de CO₂, caso a humidade relativa não se encontrar dentro de um

determinado intervalo de concentração específico, a velocidade de carbonatação não tem nenhum incremento (Figura 19). Sendo a máxima velocidade de carbonatação obtida em uma situação de umidade relativa intermediaria, onde influi também na difusão e dissolução de CO₂. Em seu estudo, Parrot (1987) conclui que 60% de umidade é o ponto médio com maior potencial para o avanço da frente de carbonatação, dessa forma corroborando com os estudos posteriores (NEVILLE 1997; ISAIA, 1999) onde afirmam que a difusão do CO₂ é maior na faixa de umidade relativa entre 50 e 80%.

Bakker (1988) ressalta que nos poros do concreto parcialmente saturados, a difusão de CO₂ é facilitada e proporciona dessa forma a condição mais favorável para que os compostos resultantes do cimento hidratado sofram carbonatação, resultando assim na situação de risco à armadura.

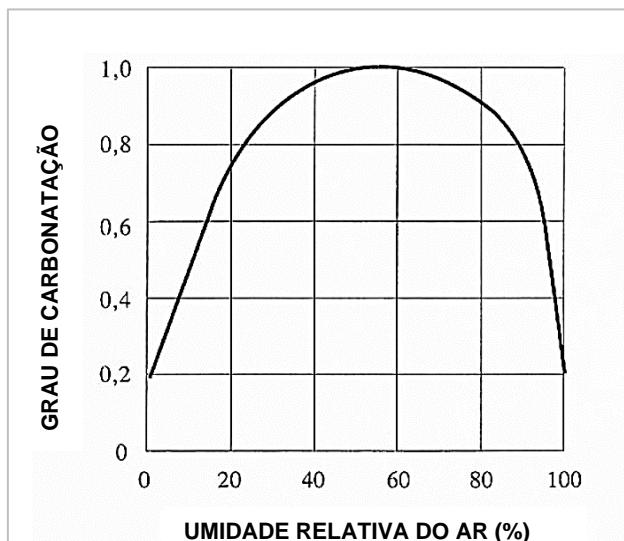


Figura 19 – Representação do grau de carbonatação em função da umidade relativa.
Fonte: FIGUEIREDO & MEIRA (2013); RIBEIRO *et al.* (2021), adaptado de VERBECK (1958).

Conforme Pauletti (1988; 2004 e 2009) e Ribeiro *et al.* (2021), cada estudo refere-se a um intervalo de umidade relativa ideal para a ocorrência das reações de carbonatação, mas em geral quase todos os pesquisadores apontam para valores compreendidos entre 40 - 85% de UR, que é o intervalo onde a velocidade carbonatação assume valor máximo. Saldanha (2013) ressalta que a difusão do CO₂ se processa mais dificilmente no ambiente mais úmido UR=90 ± 3% do que no ambiente mais seco UR=32 ± 3%.

e) Temperatura

A velocidade com que ocorre o processo de carbonatação também é afetada diretamente pelas variações de temperatura, já que esta influência tanto na saturação dos poros capilares quanto na existência/produção de vapor d'água, aumentando também a velocidade de difusão (KAZMIERCZAK, 1995). Segundo Helene (1986), o aumento da temperatura geralmente funciona como acelerador das reações químicas, dessa forma climas equatoriais e tropicais (mais quentes) são piores que temperados (mais frios).

Andrade (1992) e Cascudo (1997) explicam que os dois extremos na temperatura podem ser ambos prejudiciais, no qual um incremento na temperatura promove um aumento da velocidade de corrosão e da mobilidade iônica, já uma diminuição pode propiciar condensações, as quais produzem incrementos locais no teor de umidade.

De acordo com Papadakis (1991), para faixa de temperatura entre 20 - 40 °C a mesma não exerce influência significativa na carbonatação, sendo controlada por outros fatores tais como, a concentração de CO₂ e UR. Conforme estudos Peter *et al.* (2008), em relação à influência da temperatura na carbonatação, o meio científico em maior parcela concorda que para valores entre 20-40°C a temperatura não influencia de maneira significativa na carbonatação do concreto, uma vez que nestes níveis o processo ainda é controlado pela difusão, como já foi mencionado.

f) Porosidade

A durabilidade do concreto possui uma relação direta com a facilidade que os fluidos (líquidos ou gasosos) possuem de permear e se deslocar em seu interior, podendo ser esse ingresso através do escoamento, difusão ou adsorção. Considerando-se o mesmo tipo de cimento, a relação a/c do concreto é tida como principal variável responsável pela variação da porosidade no concreto (HELENE, 1986; PAPADAKIS, 1991; NEVILLE, 1997; FUSCO, 2008; MEDEIROS *et al.*, 2011).

Papadakis *et al.* (1991), Branca *et al.* (1993) e Jiang *et al.* (2000) defendem que porosidade e distribuição dos poros exercem uma grande influência sobre o processo de carbonatação, uma vez que o aumento da relação a/c aumenta a porosidade, aumentando a difusão e por fim a velocidade do fenômeno. Pauletti (2004) ressalta que, se os poros forem interligados os mesmos contribuem para o deslocamento dos fluidos, caso contrário, uma porosidade alta não significa elevada permeabilidade do concreto.

Segundo Neville (1997) é importante salientar que há uma distinção entre porosidade e permeabilidade, já que apenas alguns poros contribuem para a permeabilidade.

Autores como Ying-Yu & Qui-Dong (1987); Papadakis *et al.* (1989) e Houst *et al.* (1993), chegaram à conclusão que, por consequência da carbonatação, há uma redução na porosidade no concreto e juntamente com redução no diâmetro médio de poros ao longo do tempo.

A variação da porosidade pode ser expressa por uma curva (Figura 20), que correlaciona a porosidade do concreto aos 28 dias com a relação a/c, considerando uma condição de cura ao ar livre, umidade relativa de 65% e o mesmo tipo de cimento empregado (NEVILLE, 1997).

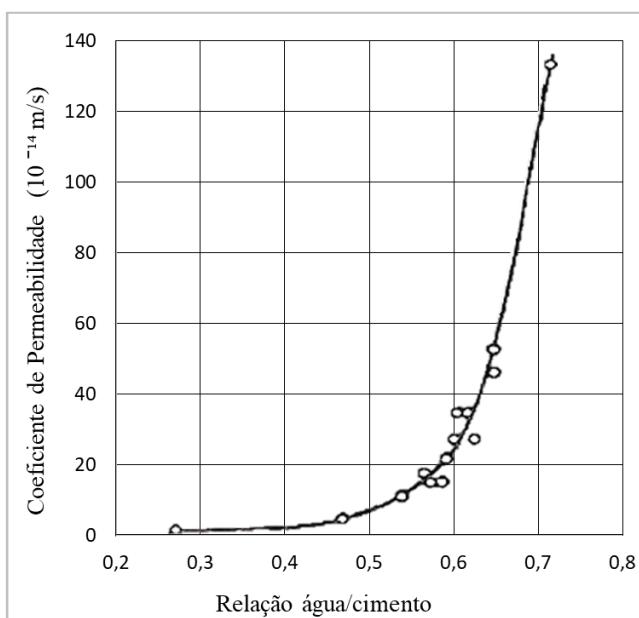


Figura 20 – Variação do coeficiente de permeabilidade do concreto com a relação a/c.
Fonte: NEVILLE (1997).

g) Cura

A cura é elencada como um dos fatores internos também muito influentes no processo de carbonatação no concreto (RIBEIRO *et al.*, 2021). A hidratação do cimento é diretamente proporcional ao tempo de cura, assim um maior período influenciará em uma menor porosidade e permeabilidade, desse modo reduzindo o processo de carbonatação (NEVILLE, 1997). Helene (1993) também ressalta que a profundidade de carbonatação é dependente da cura, uma vez que esta afeta as condições de hidratação dos primeiros milímetros superficiais no concreto. Segundo o mesmo autor, cimentos com adições, aliados à uma cura prolongada, podem minimizar a profundidade de carbonatação.

Segundo o ACI (1991), no comitê 201, a permeabilidade do concreto diminui por conta do processo crescente hidratação do cimento, e para tanto recomenda uma cura mínima de 7 dias para amenizar os efeitos negativos na durabilidade das estruturas de concreto armado. Smolczyk (1976) destaca que os efeitos de uma cura insuficiente podem se tornar desastrosos principalmente para baixas resistências nas primeiras idades. Em outro estudo, Monteiro (1996) e Lopes (1999) evidenciam que passando a cura de 7 para 28 dias se obtém uma redução na profundidade de carbonatação entre 20 e 30%.

Thomas e Mathews (1992) *apud* Possan (2010), avaliaram a influência do período de cura na profundidade de carbonatação do concreto e constataram que para maiores tempos de cura havia uma redução significativa da respectiva profundidade (Figura 21).

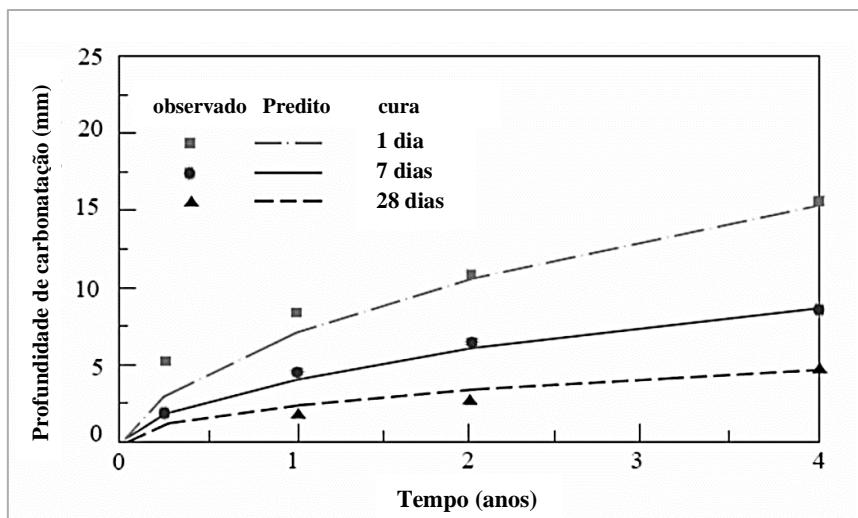


Figura 21 – Influência da cura na profundidade de carbonatação no concreto.
Fonte: RIBEIRO *et al.* (2021), adaptado de VISSER (2014).

2.6.8 Avaliação da resistência à carbonatação do concreto

Com relação aos ensaios de medida da profundidade de carbonatação, Possan (2010) em seu estudo afirma que análises da carbonatação por meio de métodos naturais são poucos utilizados em pesquisas, já que as reações decorrentes do CO₂ nos poros do concreto são bem mais lentas ao ar livre. O autor também explica que isso é decorrente da baixa concentração de CO₂ presente no ar (aproximadamente 0,04% em atmosferas normais), desse modo acarretando em um processo que, geralmente, torna inviável o período de espera para a determinação da velocidade e profundidade de carbonatação, podendo este levar até 20 anos.

Segundo Pauletti (2009), os resultados provenientes de ensaios naturais são em sua maioria utilizados para correlacionar com resultados advindos de ensaios acelerados, dessa forma se definindo os coeficientes de aceleração e prever a velocidade e profundidade de carbonatação. Pauletti (2009) também afirma que muito já se foi estudado acerca da carbonatação, porém os padrões empregados em cada estudo são os mais variados possíveis na maioria das ocasiões. Desse modo, tornando a definição de variáveis “ideais” e facilmente comparáveis, algo ainda a se almejar.

Ensaios acelerados de carbonatação surgiram como uma alternativa geralmente adotada para estudos de durabilidade dos materiais, em especial o concreto, para reduzir o tempo análise. Conforme o IBRACON (2009), ensaios de carbonatação acelerados simulam o fenômeno de deterioração natural, porém com intensidade superior à esperada em condições normais de serviço. Com relação a ensaio carbonatação, após um processo de pré-condicionamento (sazonamento), as amostras de concreto são expostas à elevados teores de CO₂ (1-100%), em atmosfera fechada, com condições de umidade relativa e temperatura controladas, normalmente com duração de ensaio variando entre 30 a 180 dias dependendo da metodologia adotada (RIBEIRO *et al.*, 2021). O percentual de CO₂, temperatura e umidade relativa são as variáveis ambientais de ensaio que mais influenciam nos ensaios de carbonatação acelerada (IBRACON, 2009); já os fatores internos de maior influência são: relação água/cimento, tipo de cimento, adições e agregados (PAULLETI, 2007).

Com relação a UR, Saldanha (2013) constatou que as maiores profundidades de carbonatação foram encontradas quando se submeteram os corpos de prova analisados a um ambiente com UR= 65 ± 3%, na qual encontra-se dentro do intervalo que a grande maioria dos estudos defende como o intervalo ideal para ensaios de difusão do CO₂ no concreto.

Dados apresentados no estudo de Chi (2002) demonstraram que uma exposição de um concreto a um teor de CO₂ de 4 %, durante uma semana, é equivalente a uma exposição durante um ano em um ambiente natural. Ho e Lewis (1987) também chegam ao mesmo valor, e ainda sugerem para ensaios acelerados com 4% de CO₂, uma UR do ambiente de 50% e cura prévia de 7-23 dias. Werle (2011) em seu estudo aponta que a profundidade de carbonatação cresce com o aumento do tempo de exposição e que esse incremento na profundidade é mais acentuado nas primeiras idades de exposição ao CO₂, principalmente com relação a/c mais elevada (0,70).

A Tabela 6 resume as características adotadas e sugeridas para estudos de carbonatação, realizados por diversos autores, ao longo dos anos.

Tabela 6 - Características dos estudos de carbonatação em concretos, realizados por diversos autores.

Pesquisador	Ano	Amostras forma/dim (mm)	relação a/agl	Tipo e tempo de cura (dias)	Sazonamento Tempo/Local	UR (%)	Temp. (°C)	CO2 (%)	Tempo de exposição (dias)
Cunha e Helene	2001	prismas 279x152x114	0,35 - 0,65	úmida (28)	15 dias (lab.)	65	23,5	100	2h/2h (a/c = 0,35) 4h/4h (a/c = 0,65)
Johannesson e Utgenannt	2001	cilíndros φx3	-	-	-	65	20	1	120
Sanjuán e Olmo	2002	cilíndros 75x150	-	submersa (28)	-	70	-	5; 20 e 100	-
Venquieruto	2002	cilíndros 100x70	0,35 - 0,65	úmida (7)	35 dias (lab.) / estufa RILEM	75	23	5	28; 56 e 84
Kulakowski	2002	prismas 100x100x300	0,30 - 0,80	úmida - cps embalados (14)	14 dias (câmara) ¹	70	25	5	35; 56; 91 e 126
Lo e Lee	2002	cilíndros 100x200	0,38 - 0,54	submersa/ao ar (28)	-	-	21	2	30; 60 e 90
Coelho <i>et al.</i>	2002	cilíndros 100x200	-	úmida (28)	35 dias (lab.)	60 - 70	26	100	77 e 91
Kulakowski	2002	prismas 40x40x160	0,30 - 0,80	úmida amostras embaladas (14)	14 dias (câmara) ¹	70	25	5	35; 56; 91; 126
Kirchheim	2003	prismas 60x60x180	0,40 - 0,60	úmida (28)	até constância (câmara) ¹	70	25	100	-
Abreu	2004	prismas 100x100x60	0,44 - 0,65	úmida (28)	32 dias (câmara) ¹	70	25	5 e <50	63 e 195
Van Gerven <i>et al.</i>	2004	cubos 40	-	úmida (28)	nota ²	>90	37	5 e 20	72h e 360h
Gervais <i>et al.</i>	2004	cubos 40	-	-	-	23; 48; 98	-	100	-
Thiery	2005	cilíndros 50x100x110	0,48 - 0,84	úmida (91)	estufa a 45°C por 30 dias	53	21	50	30; 60 e 90
Werle <i>et al.</i>	2011	prismas 60x60x180	0,64	submersa (63)	28 dias (lab.)/estufa RILEM	70 ± 5	21 ± 2	1	147
Ribeiro <i>et al.</i>	2021	prismas 80x80x300	0,45 - 0,65	-	14 dias (laboratório)	65 ± 5	27 ± 2	3 ± 0,5	35; 56; 49; 63; 70 e 91

¹ Câmara de sazonamento isenta de CO₂.

² A etapa de sazonamento não foi realizada. Depois da cura, as amostras seguiram diretamente para o ensaio de carbonatação.

Fonte: PAULLETTI (2004 e 2009); WERLE *et al.* (2011); RIBEIRO *et al.* (2021).

Conforme Pauletti (2004), as diferentes formas de sazonamento também influenciam no processo de carbonatação acelerada, uma vez que nessa etapa que serão desenvolvidas as propriedades que interferem nos resultados dos ensaios, como mencionado anteriormente.

O Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON) em conjunto à Associação Brasileira de Patologia das Construções (ALCONPAT) no ano de 2021, visando nortear a obtenção de dados da carbonatação concretos, publicou um guia recomendativo para execução de ensaios acelerados de carbonatação. O guia em questão toma como referência, além da norma norte americana ISO 1920-12 (ISO, 2015), diversos estudos sobre a durabilidade do concreto realizados ao longo dos anos, incluindo a contribuição de autores como Ribeiro, Dias, Helene, Magalhães, Cascudo, Ferreira dentre outros, trazendo consigo todos os parâmetros necessários para a análise.

Segundo Ribeiro *et al.* (2021), baseando-se em modelos propostos por Tuutti (1982), a profundidade de carbonatação (d) é proporcional à raiz quadrada do tempo de exposição e ao se traçar um gráfico utilizando estas variáveis obtém-se uma reta cujo coeficiente angular (K_{a0}) representa o coeficiente de carbonatação acelerada (K_{acel}) segundo a Figura 22 e Equação 3.

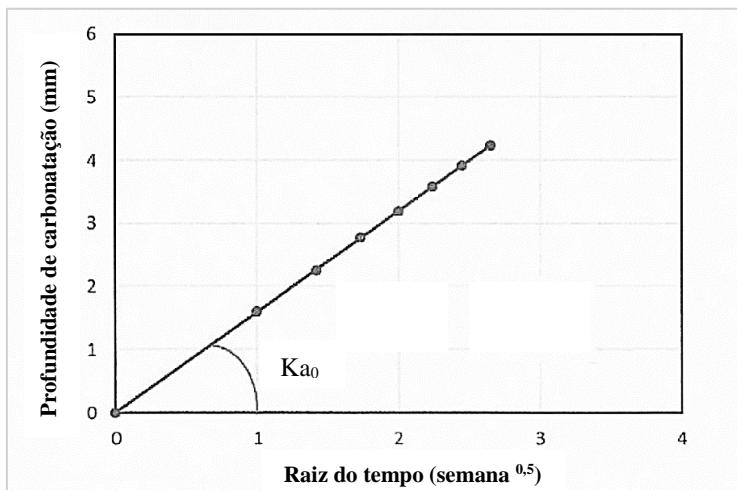


Figura 22 – Correlação entre a profundidade de carbonatação e a raiz quadrada do tempo, visando a determinação do coeficiente de velocidade de carbonatação acelerada de referência, K_{a0} , para o concreto/argamassa analisada. Fonte: RIBEIRO *et al.* (2021).

$$K_{acel} = \frac{\Delta d}{\Delta \sqrt{t}} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

K_{acel} = coeficiente de carbonatação acelerada, em mm.semana^{-0,5} ou mm.ano^{-0,5};

d = profundidade média de carbonatação, em milímetros (mm).

t = tempo de exposição ao CO₂, em semanas ou anos.

Δ = variação positiva entre dois pontos da reta, no respectivo eixo.

Com base na ISO 1920-12 (ISO, 2015) e um extenso conjunto de dados e análises numéricas, Ribeiro *et al.* (2021) propõe uma classificação quanto a resistência à carbonatação para diferentes ambientes de exposição (Tabela 7). A mesma traz consigo faixas do valor do coeficiente de carbonatação acelerada (K_{acel}), expressos em mm.sem^{-0,5} e mm.ano^{-0,5}, e a respectiva resistência ao fenômeno.

Tabela 7 – Classificação simplificada quanto a resistência à carbonatação acelerada nos concretos.

Resistência à carbonatação do concreto	Rural, Urbano ou Industrial leve		Industrial Pesado	
	Coeficiente de carbonatação acelerada, Kacel			
	(mm.ano) ^{0,5}	(mm.sem) ^{0,5}	(mm.ano) ^{0,5}	(mm.sem) ^{0,5}
Excepcional	< 18,5	< 2,55	< 15,5	< 2,15
Muito alta	18,5 - 20,0	2,55 - 2,75	15,5 - 17,0	2,15 - 2,35
Alta	20,0 - 22,5	2,75 - 3,10	17,0 - 19,0	2,35 - 2,65
Moderada	22,5 - 27,0	3,10 - 3,75	19,0 - 23,0	2,65 - 3,20
Baixa	27,0 - 36,0	3,75 - 5,00	23,0 - 30,0	3,20 - 4,15
Muito baixa	36,0 - 50,5	5,00 - 7,00	30,0 - 42,5	4,15 - 5,90
Insignificante	≥ 50,5	≥ 7,00	≥ 42,5	≥ 5,90

Fonte: RIBEIRO *et al.* (2021), adaptado de ISO 1920-12 (ISO, 2015).

Conforme Ribeiro *et al.* (2012) baseando-se em alguns estudos (BERTOS *et al.*, 2004; YADAV *et al.*, 2010), o RB quando utilizado como adição em matrizes cimentícias, devido às suas características químicas associadas à sua acentuada alcalinidade, possui uma elevada capacidade de assimilar o dióxido de carbono e assim dando origem à produtos de reação termodinamicamente estáveis que favorecem o fenômeno de carbonatação. Todavia quando se trata de agregados graúdos sintéticos produzidos a partir do RB, o concreto pode ou não se comportar de modo semelhante ao mencionado, necessitando dessa forma de análises mais aprofundadas sobre tal aspecto.

Estudos acerca da influência dos agregados sintéticos de RB na carbonatação do concreto, assim como o ataque por cloreto, ainda estão em andamento no Brasil e no mundo. E de modo semelhante ao que se vê na literatura científica da construção civil também há certa carência de dados a respeito, até então.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Materiais primários

Os materiais primários utilizados na pesquisa estão descritos a seguir junto com as referências adotadas para suas respectivas caracterizações conforme mostra a Tabela 8.

- Cimento Portland: CP IV-32-RS, comercialmente encontrado nas distribuidoras da cidade de Belém-PA. Utilizado na produção de todos dos concretos. Escolhido por conta do seu potencial mitigador da reação álcali-sílica.
- Areia média quartzosa: Oriunda dos leitos de corpos hídricos localizado no município de Tracuateua-PA (nordeste do estado). Utilizada na produção de todos os concretos.
- Seixo: Oriundo dos leitos de corpos hídricos localizado no município de Tracuateua-PA (nordeste do estado). Utilizado apenas na produção do concreto com agregado natural.
- Resíduo da bauxita (*dry-disposal*): Cedido pela empresa Hydro Alunorte, com refinaria localizada no município de Barcarena-PA, interior do estado. Utilizado na produção do agregado graúdo sintético pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PPGEQ).
- Argila caulinítica: Oriunda dos leitos do rio Guamá localizado na região de Belém-PA. Utilizada na produção dos agregados graúdos sintéticos com o objetivo de proporcionar maior plasticidade à mistura, além de manter o material coeso na secagem e no início do processo de sinterização (SOUZA, 2010).
- Sílica: Obtida em comércio da região metropolitana de Belém-PA. Objetivo de reduzir a porosidade, conferir dureza e proporcionar um certo controle da massa específica dos agregados sintéticos (SOUZA, 2010; ROSÁRIO, 2013; REIS, 2014).

Tabela 8 – Ensaios de caracterização dos materiais primários.

Material	Ensaio	Normatização
Cimento Portland	Massa específica	ABNT NBR 16605 (2017)
	Tempo de pega	ABNT NBR 16607 (2018)
	Índice de finura	ABNT NBR 11579 (2012)
Areia ¹ Sílica	Massa específica	ABNT NBR 16916 (2021)
	Massa unitária	ABNT NBR 16972 (2021)
	Granulometria	ABNT NBR NM 248 (2003)
¹ Resíduo da bauxita	Mineralogia (DRX)	-
	Composição química (FRX)	ABNT NBR 14656 (2001)
	Massa específica	ABNT NBR 16605 (2017)
	Área superficial	Método B.E.T.
Seixo	Granulometria	ABNT NBR NM 248 (2003)
	Reação álcali-agregado (RAA)	ABNT NBR 15577 (2018)
	Massa específica	ABNT NBR 16917 (2021)
	Absorção de água	ABNT NBR 16917 (2021)
	Granulometria	ABNT NBR NM 248 (2003)
	Índice de forma	ABNT NBR 7809 (2019)
	Abrasão "Los Angeles"	ABNT NBR 16974 (2021)
	Perda de massa ao choque	DNER-ME NR 399/99

¹ Ensaios realizados pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Química (PPGEQ-UFPA), no pré-estudo para obtenção do agregado graúdo sintético. Os mesmos, com exceção do FRX, não foram abordados no presente estudo.

Fonte: AUTOR (2022).

A caracterização detalhada do RB utilizado não foi abordada no presente estudo, uma vez que pretendeu-se focar apenas nas características do agregado graúdo sintético e seus possíveis efeitos na durabilidade do concreto estrutural.

3.1.2 Agregado graúdo sintético

Os agregados graúdos sintéticos utilizados no presente estudo tiveram como componentes os materiais apresentados na Figura 23. Os mesmos após a produção foram caracterizados conforme os ensaios evidenciados na Tabela 9, de modo semelhante ao agregado natural (seixo).



Figura 23 – Matérias primas de composição do agregado graúdo sintético.

Fonte: AUTOR (2022), adaptado de REIS (2014).

Tabela 9 – Ensaios de caracterização do agregado graúdo sintético.

Material	Ensaios	Normatização
Agregado graúdo sintético	Reação álcali-agregado (RAA)	ABNT NBR 15577 (2018)
	Massa específica	ABNT NBR 16917 (2021)
	Absorção de água	ABNT NBR 16917 (2021)
	Granulometria	ABNT NBR NM 248 (2003)
	Índice de forma	ABNT NBR 7809 (2019)
	Abrasão “Los Angeles”	ABNT NBR 16974 (2021)
	Perda de massa ao choque	DNER-ME NR 399/99

Fonte: AUTOR (2022).

Os componentes do agregado graúdo sintético e dos concretos, precisaram antes serem tratados conforme descrito na Tabela 10. De forma que os mesmos pudessem ser utilizados devidamente como matéria prima para suas respectivas finalidades (SOUZA, 2021a).

Tabela 10 – Pré-tratamento das matérias primas (agregados naturais e argila).

Material	Emprego	Pré-tratamento		
		Secagem	Moagem	Peneiramento
¹ Sílica				
² Argila	Agregado graúdo sintético	Estufa com recirculação de ar à temperatura de 105°C por 24h. (modelo MARCONI MA 035)	Moinho de bolas (aço) durante 30 min, para desagregação das partículas.	Utilização apenas do material passante na #150 µm.
RB				
Seixo				
Areia	Concreto Estrutural	Estufa por 24h à temperatura de 100°C.	-	-

Nota 1: Etapas necessárias para um melhor ajuste da granulometria do material, já que sílica apresenta uma morfologia esférica e uma elevada superfície específica quando o diâmetro das partículas é menor que 150 µm, resultando em um aumento na eficiência das reações de sinterização (SOUZA, 2010).

Nota 2: Tratamento realizado com o objetivo de evitar a formação de trincas no agregado, as quais poderiam ocorrer com a utilização da matéria-prima úmida, afetando o rendimento e a qualidade do material produzido (SOUZA, 2021a).

Fonte: AUTOR (2022), adaptado de SOUZA (2021a).

3.2 METODOLOGIA

3.2.1 Síntese do programa experimental

O programa experimental do presente trabalho, Figura 24, contou com 5 etapas distintas e sucessivas, no qual por meio delas foi possível o desenvolvimento da pesquisa.

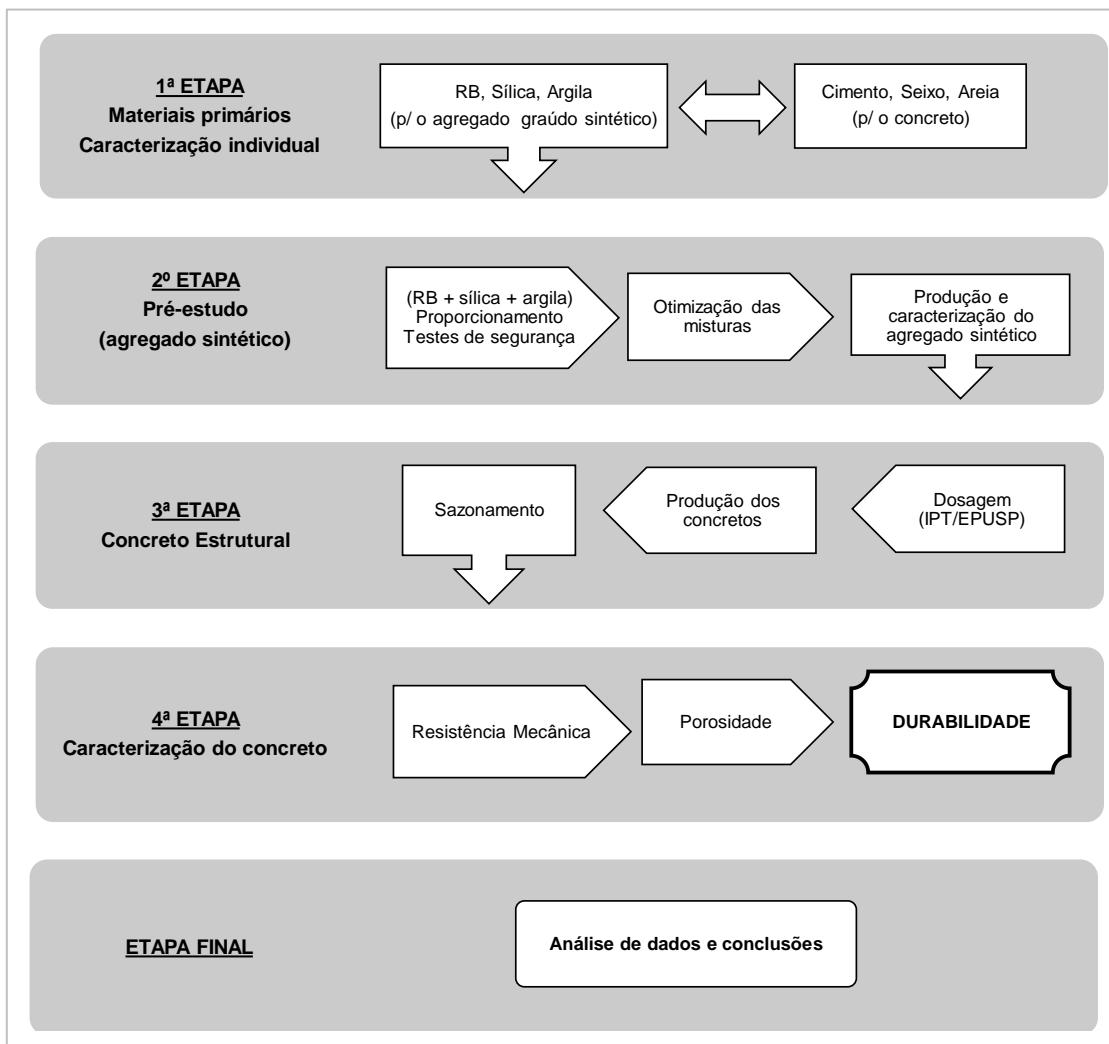


Figura 24 - Organograma resumido do programa experimental.

Fonte: AUTOR (2022).

A primeira etapa consistiu na obtenção, tratamento prévio, caracterização físico-químico-mineralógica do (RB), assim como a caracterização apenas física dos outros materiais (cimento, seixo e areia), conforme o item 3.1.1 e 3.1.2.

Na segunda etapa houve um extenso pré-estudo, realizado pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UFPA, sobre o proporcionamento, critérios de segurança, caracterização físico-mineralógica e posterior otimização de um conjunto

de misturas calcinadas (RB + argila + sílica), para a sinterização dos agregados graúdos.

A terceira etapa resumiu-se na dosagem e produção dos concretos utilizando os agregados sintéticos escolhidos no pré-estudo, como substituto total apenas do agregado graúdo natural (seixo). A título de informação, também foi produzido concreto convencional utilizando o seixo. Os concretos foram moldados e sazonados conforme o item 3.3 (adiante). A dosagem dos concretos foi abordada de maneira resumida no presente estudo por ser foco de outra pesquisa interna da UFPA, a respeito dos mesmos agregados sintéticos.

Na quarta etapa, os concretos produzidos foram submetidos a análises de resistência mecânica, porosidade e durabilidade segundo item 3.3 (adiante).

A etapa final teve como objetivo o processamento e análises dos dados obtidos, em especial os relacionados à durabilidade. Dessa forma constatando o desempenho dos concretos estruturais, produzidos com os agregados graúdos sintéticos, em relação aos agentes agressivos responsáveis pelo processo deterioração, e a influência do respectivo agregado utilizado.

Devido à algumas limitações de técnicas, apenas os ensaios de caracterização física dos agregados naturais (exceção: sílica), sintéticos e aglomerantes, foram realizados no laboratório de engenharia civil (LEC-UFPA). Já a caracterização físico-químico-mineralógica do RB, pré-estudo, produção e caracterização mineralógica dos agregados sintéticos foram realizadas pelo laboratório de engenharia química (LEQ-UFPA) por intermédio exclusivo do PPGEQ.

3.2.2 Pré-estudo para sinterização do agregado graúdo (resumo)

Como ponto de partida metodológico, primeiramente foi realizado um pré-estudo de proporcionamento por parte do PPGEQ (UFPA), valendo-se de uma série de estudos (RASHAD, 2018; GAO, 2021; ROCES-ALONSO *et al.*, 2021) a respeito do processo de produção de agregados sintéticos. O estudo inicial envolveu 26 misturas distintas calcinadas (Tabela 11), das matérias-primas (RB, sílica e argila) junto à aditivos (cal e carvão/biomassa), em algumas pré-composições. Antes da sinterização, as matérias-primas foram de antemão submetidas ao pré-tratamento descrito no item 3.1.2.

Os aditivos empregados tiveram o intuito de facilitar a obtenção da temperatura de sinterização (biomassa) e surgimento das fases cristalinas na mistura (cal), segundo Souza (2021a). Porém, posteriormente os mesmos deixaram de ser utilizados no processo produtivo uma vez que se pode atingir a temperatura desejada apenas controlando-se os parâmetros de funcionamento do forno calcinador.

Tabela 11 - Composição, temperatura e tempo de sinterização de cada amostra no pré-estudo composicional do agregado graúdo sintético. Fatores controláveis.

Amostra	RB (%)	Sílica (%)	Argila (%)	Biomassa (%)	Cal (%)	Temp. (°C)	Tempo (h)
C1	60	15	25	-	-	1250	3
C2	60	15	15	10	-	1250	3
C3	70	-	25	5	-	1250	3
C4	60	15	25	-	-	1250	3
C5	70	10	15	-	5	1250	3
C6	60	20	15	-	5	1250	3
C7	80	15	5	-	-	1250	3
C8	70	-	30	-	-	1250	3
C10	60	15	20	-	5	1250	3
C11	75	15	5	-	5	1250	3
C12	75	15	5	-	5	1250	0,5
C13	75	15	5	-	5	1200	3
C14	75	15	5	-	5	1250	3
C15	60	15	25	-	-	1225	3
C16	70	10	15	5	-	1250	3
C17	70	30	-	-	-	1200	3
C18	70	15	10	-	5	1250	3
C19	70	15	10	-	5	1225	3
C20	70	15	10	-	5	1200	3
C21	70	15	10	-	5	1150	3
C22	80	10	5	-	5	1200	3
C23	85	5	5	-	5	1150	3
C24	80	5	5	-	10	1150	3
C25	77,5	15	5	-	2,5	1150	3
C26	70 - 75	20 - 25	5	-	-	1050 - 1250	3

Fonte: AUTOR (2022), adaptado de SOUZA (2021a).

Tomando como base os limites normativos exigidos para lixiviação (NBR 10005:2004) e solubilização (NBR 10006:2004) de resíduos sólidos (presendo a segurança por conta do Na(OH) residual presente no RB), todas as misturas calcinadas foram analisadas e avaliadas segundo estes critérios. As mesmas também foram submetidas a análises físico-mineralógicas de DRX, MEV, massa específica, porosidade aparente, absorção de água e principalmente de potencial reativo (RAA).

Dentre as misturas realizadas foram selecionadas a princípio 5 amostras que passaram nos testes de lixiviação e solubilização, para produção inicial do agregado sintético (via extrusão e pelotização), sendo nomeadas como A1, A2, A3 A4 e A5 respectivamente. A escolha destas amostras, segundo Souza (2021a), teve o como intuito avaliar a influência teor de 60-95% de RB na sinterização dos agregados,

utilizando o máximo de resíduo ao mesmo tempo que se mantem os critérios de segurança quanto ao Na(OH) residual.

Após as análises físico-mineralógicas dos agregados iniciais verificou-se que, embora atendessem aos critérios normativos de segurança, os mesmos não atendiam aos limites máximos de potencialidade reativa (RAA), dessa forma inviabilizando seu uso em concretos estruturais (SOUZA, 2021a). Por conta deste fato, estes agregados iniciais não foram contemplados no presente estudo.

Com base no desempenho dos agregados sintéticos iniciais, foram formulados 3 novos agregados graúdos (via extrusão), otimizados no processo produtivo, denominados respectivamente AGS 70, AGS 80 e AGS 90 (Tabela 12). Os mesmos foram abordados no presente estudo para caracterização físico-mecânica e análise de durabilidade dos concretos com eles produzidos.

Tabela 12 - Composição, temperatura e período de sinterização das amostras otimizadas para produção dos agregados graúdos sintéticos.

Amostra	RB (%)	Sílica (%)	Argila (%)	Temperatura (°C)	Tempo (h)
AGS 70	70 - 75	20 - 25	5	1200	3
AGS 80	80 - 85	10 - 15	5	1200	3
AGS 90	90 - 95	0 - 5	5	1200	3

Fonte: AUTOR (2022), adaptado de SOUZA (2021a).

Por conta do processo de patenteamento, pela UFGA, dos agregados graúdos sintéticos otimizados, as proporções exatas de matéria-prima e outros detalhes técnicos específicos para a produção dos mesmos não foram divulgadas. Deixando-se assim apenas os intervalos composticionais do RB e sílica a título de identificação e análise dos agregados, além da síntese do processo de produção.

3.2.3 Produção dos agregados graúdos sintéticos

A produção dos agregados otimizados, realizada pelo PPGEQ, seguiu o roteiro apresentado de forma simplificada no organograma da Figura 25. Ao final do processo, adquiriram aparência conforme mostrado na Figura 26.

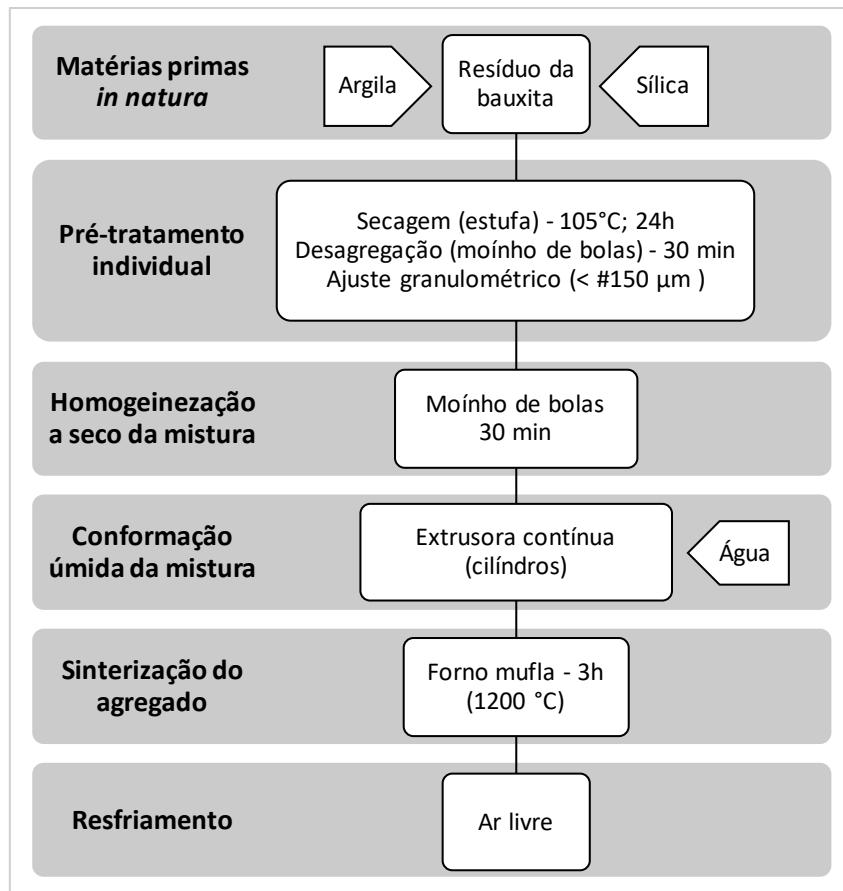


Figura 25 – Organograma de produção dos agregados graúdos sintéticos, otimizados.
Fonte: AUTOR (2022), adaptado de SOUZA (2021a).



Figura 26 – Amostras dos agregados graúdos sintéticos, otimizados.
Fonte: AUTOR (2022).

Os agregados graúdos sintetizados possuíam formato em maior parcela alongado com grande presença de grãos irregulares, decorrente do método de conformação (extrusão) do processo produtivo. A superfície externa apresentou textura medianamente áspera com rugosidade acentuada em parte dos grãos. O diâmetro máximo característico de todas as amostras produzidas, também por conta do processo produtivo, assumiu valor na ordem de 19mm.

3.3 DOSAGEM E PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

Para a produção dos concretos estruturais utilizou-se o método do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT/EPUSP explanado pelo Manual de Dosagem e Controle do Concreto, desenvolvido por Helene & Terzian (1992). A princípio por meio de tentativa e erro, iniciou-se com o teor de argamassa em 51% referente ao traço de 1:5,0 (cimento, areia + pedra; em massa); manteve-se a relação a/c ≤ 65 (classe de agressividade I) e consistência classe S100 com abatimento de tronco de cone em 100 ± 20 mm, com base no método de dosagem explanado. Além do concreto com agregado natural (seixo), respectivamente para cada uma das 3 amostras de agregado graúdo sintético foram produzidos outros concretos utilizando a mesma massa desses agregados no traço, segundo o método.

Através desse estudo experimental de dosagem, verificou-se que por conta das características individuais de cada agregado graúdo sintético (porosidade; absorção de água; massa específica) os mesmos não se comportavam de maneira semelhante sob às mesmas condições, no concreto fresco. Dessa forma para que o critério de consistência (abatimento=100 \pm 20mm) fosse atendido, resguardando-se também os demais, os concretos produzidos demandaram diferentes teores de argamassa respectivamente. A coesão, segregação e trabalhabilidade dos concretos também foram levadas em consideração durante os testes de consistência, até que os critérios fossem devidamente alcançados. A Tabela 13 resume os parâmetros finais na dosagem dos concretos produzidos.

Tabela 13 - Traço (em massa), teor de argamassa, relação a/c, consistência e teor de agregados graúdos dos concretos produzidos.

ID	Traço unitário (cimento : agregados)	¹α (%)	Relação a/c	Agregado graúdo (%)		Abatim. (mm)
				natural	sintético	
REF	1 : 5,0	51	0,55	100	0	
AGS 70	1 : 5,0	55	0,65	0	100	
AGS 80	1 : 5,0	59	0,65	0	100	≈ 90
AGS 90	1 : 5,0	61	0,65	0	100	

^¹ Teor de argamassa.

Fonte: AUTOR (2022).

A ordem dos materiais foi estabelecida com base na ABNT NBR 7212 (ABNT, 2021) e estudos realizados por Helene (2010). Realizou-se a substituição de 100% do agregado graúdo natural por agregado sintético de RB, nos concretos produzidos com o intuito de se analisar a influência nas características físico-mecânicas e principalmente na durabilidade. A ordem dos materiais constituintes do traço na produção dos concretos

iniciou-se primeiramente com a imprimação das paredes internas da betoneira (400L) utilizando 3,6 kg de argamassa na proporção mássica de 1 : 2 : 0,6 (cimento CP IV-32, areia, água); posteriormente a deposição do agregado graúdo (natural ou sintético, dependendo do traço); deposição de 75% da água de amassamento para saturação do agregado graúdo; deposição do cimento Portland CP IV - 32; deposição do agregado miúdo; e ao fim, a deposição dos 25% da água de amassamento restante.

A Figura 27 exemplifica os aspectos visuais apresentados pelos concretos durante a etapa de dosagem e testes de consistência, por abatimento do tronco de cone.



Figura 27 – Aspectos visuais apresentados pelos concretos durante a dosagem.
Fonte: AUTOR (2022).

Os corpos de prova de concreto para o presente estudo foram moldados e sazonados segundo as recomendações da ABNT NBR 5738 (2015) e Ribeiro *et al.* (2021). A Tabela 14 apresenta um resumo dos ensaios realizados no concreto, a disposição dos corpos de prova e as respectivas normas utilizadas como referenciais metodológicos.

Tabela 14 - Resumo de gerenciamento dos corpos de provas para os ensaios nos concretos.

	Ensaios	Metodologia	Cura (dias)	Tempo de ensaio (dias)	Nº de CPs por idade	*Nº total CPs	Geometria (mm)
Físico-Mecânico	Resistência à compressão axial	ABNT NBR 5739 (2018)	7; 14 e 28	-	3	36	Cilindro (100x200)
	Resistência à tração por compressão diametral	ABNT NBR 7222 (2011)	28	-	2	24	Cilindro (100x200)
	Módulo de elasticidade estático	ABNT NBR 8522 (2021)	28	-	2	24	Cilindro (100x200)
	Absorção de água por capilaridade	ABNT NBR 9779 (2012)	90	3	3	12	Cilindro (100x200)
Durabilidade	** Carbonatação acelerada	ISO 1920-12 (ISO 2015); Ribeiro <i>et al.</i> (2021)	90	42; 63; 84 e 112	2	6	Prisma (80x80x300)
	Penetração de íons cloreto	NT BUILD 443 (1995); Júnior (2019); Ribeiro <i>et al.</i> (2021)	90	28 e 60	2	8	Prisma (80x80x150)

* Total de CPs considerando cada agregado utilizado (Seixo, AGS 70; 80 e 90), exceto carbonatação, que não utilizou o AGS 90.

** Utilizou-se os mesmos corpos de prova no decorrer do ensaio.

Fonte: AUTOR (2022).

As limitações em relação à disponibilidade do agregado graúdo sintético de RB impossibilitaram a produção e emprego de mais exemplares de concreto por cada ensaio realizado. Em virtude desse fato não foi possível um estudo estatístico sobre os resultados obtidos. Contudo, os corpos de prova foram gerenciados de forma que se pudesse realizar todos os ensaios especificados.

3.4 ANÁLISE DE INFLUÊNCIA DO AGREGADO GRAÚDO SINTÉTICO NAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÂNICAS DO CONCRETO

3.4.1 Características mecânicas

Os concretos produzidos com agregados sintéticos e o natural foram analisados quanto a resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade estático, conforme exemplificado na Figura 28.

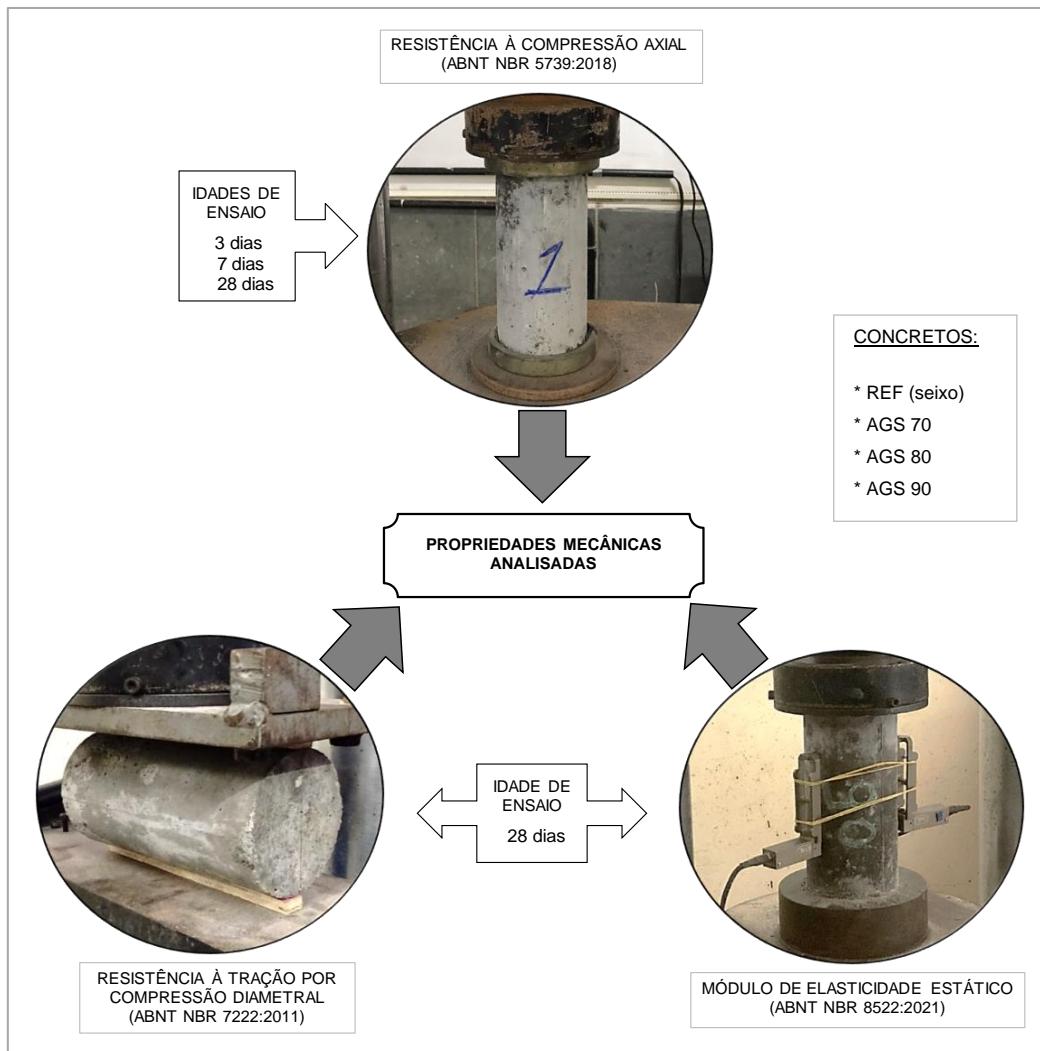


Figura 28 – Infográfico ilustrativo dos ensaios mecânicos realizados nos concretos.
Fonte: AUTOR (2022).

Para o ensaio de compressão axial foram utilizados 3 corpos de prova cilíndricos de dimensões 100x200mm (diâmetro x altura), moldados segundo a ABNT NBR 5738 (2015), para cada concreto analisado com seu respectivo agregado graúdo. Ainda na etapa de sazonamento logo após a desmoldagem, os corpos de prova foram submetidos a cura úmida (submersa) por períodos de 3; 7 e 28 dias respectivamente, sendo estes períodos correspondentes às idades de análise. Ao final do processo de cura foram dispostos ao ar livre, a temperatura e umidade ambientais, por 24h, antes da realização do ensaio. O resultado final da análise foi obtido fazendo-se uso da média de resistência dos 3 corpos de prova empregados, respectivamente para cada tipo de concreto produzido, sendo expresso em Mpa.

Na determinação da resistência à tração por compressão diametral e o módulo de elasticidade estático foram moldados, segundo a ABNT NBR 5738 (2015), 2 corpos de prova cilíndricos (100x200mm) para cada tipo de concreto analisado. Ambos os ensaios ocorreram após 28 dias de cura úmida (submersa) dos corpos de prova, e secagem prévia ao ar livre por 24h (temperatura e umidade ambientais). Os resultados de tração foram expressos em MPa, já os de módulo de elasticidade, em GPa.

É importante destacar que as análises das propriedades mecânicas dos concretos com agregados sintéticos e o natural foram realizadas de maneira individual, uma vez que devido ao comportamento distinto durante a dosagem os mesmos encontraram-se em diferentes famílias por conta do teor de argamassa requerido.

3.4.2 Absorção de água por capilaridade (porosidade)

Para a análise da permeabilidade dos concretos utilizou-se o ensaio de absorção de água por capilaridade especificado pela ABNT NBR 9779 (2012). A escolha desta metodologia foi baseada no estudo de Raisdorfer (2015) e Ribeiro *et al.* (2021), no qual afirmam que a absorção por capilaridade é um bom indicativo das condições da porosidade da superfície do concreto, sendo essa porosidade o caminho preferencial de gases e líquidos que afetam a durabilidade do mesmo.

No ensaio, fez uso de 3 corpos de prova cilíndricos 100x200mm (diâmetro, altura) para cada concreto analisado com seu respectivo agregado (natural e sintético), conforme apresentado na Figura 29. Como etapa de sazonamento, os corpos de prova após moldados, permaneceram em cura úmida submersa durante um período de 90 dias para que a ação pozolânica do cimento (CP IV) utilizado se desenvolve-se significativamente durante o processo de hidratação (YANG & WANG, 2004; PARK *et al.*, 2016). Após esse período os mesmos permaneceram em estufa por 24h e deixados posteriormente à temperatura ambiente para equilíbrio térmico.

Os corpos de provas, já com a massa inicial seca e dimensões determinadas, foram submetidos a imersão parcial em uma lâmina d'água de 5 ± 1 mm, durante períodos correntes de 3h, 6h, 24h, 48h e 72h. Onde no final de cada período fazia-se a leitura da massa do respectivo corpo de prova e o retornando a imersão até que se completassem todas as determinações. Ao final do ensaio os corpos de provas foram rompidos diametralmente para verificar-se a ascensão média de água em seu interior, sendo esta medida em milímetros.

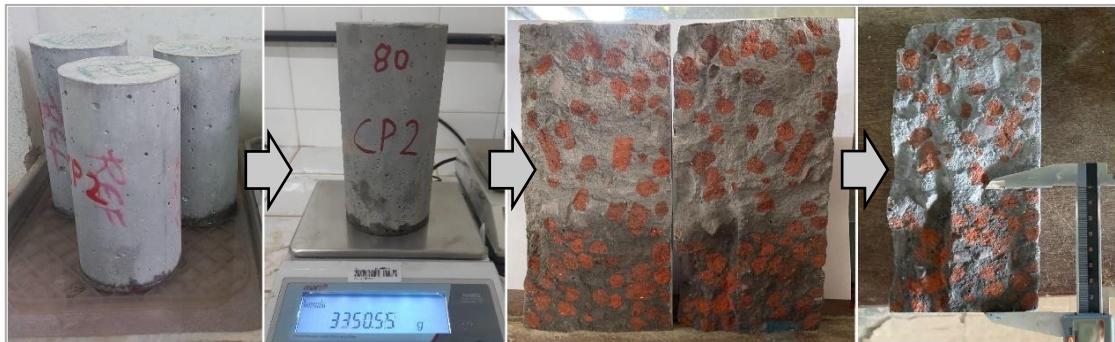


Figura 29 - Esquematização do ensaio de absorção por capilaridade, realizado nos concretos.
Fonte: AUTOR (2022).

O coeficiente de absorção por capilaridade foi calculado segundo a ABNT NBR 9779 (2012) utilizando-se a variação de massa do corpo de prova (gramas) em cada respectivo período de imersão, a partir da massa inicial seca e área da face em contato com a água (cm^2); sendo o resultado final expresso em g/cm^2 .

3.5 ANÁLISE DE INFLUÊNCIA DO AGREGADO GRAÚDO SINTÉTICO NA DURABILIDADE DO CONCRETO

3.5.1 Carbonatação

O ensaio de carbonatação acelerada foi realizado utilizando a metodologia proposta por Ribeiro *et al.* (2021) baseada na norma europeia ISO 1920-12 (ISO, 2015) de durabilidade, fornecendo parâmetros que norteiam a moldagem das amostras, sazonamento e as condições da câmara de carbonatação. Devido à algumas limitações técnicas, o procedimento de carbonatação acelerada em câmara foi conduzido nas instalações do Instituto Federal do Maranhão (IFMA) por meio de parcerias externas à UFPA.

Os corpos de prova utilizados no ensaio possuíam formato prismático (Figura 30) de dimensões aproximadas 80x80x300 mm (altura, largura, comprimento), sendo este formato recomendado por conta da possibilidade de obtenção de resultados em

diferentes idades além evitar a sobreposição do fenômeno nas faces laterais, caso cilíndrico (KULAKOWSKI, 2002; PERIM, 2006; FERREIRA, 2013; SILVA *et al.*, 2017; MIRANDA, 2018; SANTOS *et al.*, 2020).



Figura 30 - Corpos de prova prismáticos para ensaio de carbonatação acelerada.
Fonte: AUTOR (2022).

Foram produzidos e moldados 2 exemplares para cada concreto analisado no ensaio de carbonatação acelerada. Os exemplares contendo o AGS 90 não foram abordados nesta análise em específico por conta da indisponibilidade de mais dos mesmos e da capacidade máxima de carga da câmara de carbonatação utilizada. Dessa forma utilizou-se apenas 6 corpos de prova de concreto (REF, AGS 70 e AGS 80).

Para o condicionamento dos corpos de prova até o dia do ensaio em questão, os mesmos, após a desmoldagem, foram mantidos em cura úmida submersa por 90 dias para que a ação pozolânica do cimento (CP IV) utilizado se desenvolve-se significativamente durante o processo de hidratação (YANG & WANG, 2004; PARK *et al.*, 2016). Após este período de cura, as amostras foram retiradas e deixadas para secarem em laboratório durante 24h (sem incidência do sol) à temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ no intuito de equilibrar-se com o ambiente (RIBEIRO *et al.*, 2021).

Visando a padronização do ensaio, definiram-se os parâmetros adotados (Tabela 15) para câmara de carbonatação acelerada (Figura 31), com base em recomendações da norma europeia ISO 1920-12 (ISO, 2015), além de sugestões de outros autores como Ferreira (2013); Cui *et al.* (2015) e Ribeiro *et al.* (2021).

Tabela 15 - Parâmetros adotados na câmara de carbonatação acelerada.

Umidade Relativa (%)	Temperatura ($^\circ\text{C}$)	CO_2 (%)	Tempo de exposição (dias)
65 ± 5	27 ± 2	$3 \pm 0,5$	42; 63; 84 e 112

Fonte: AUTOR (2022).

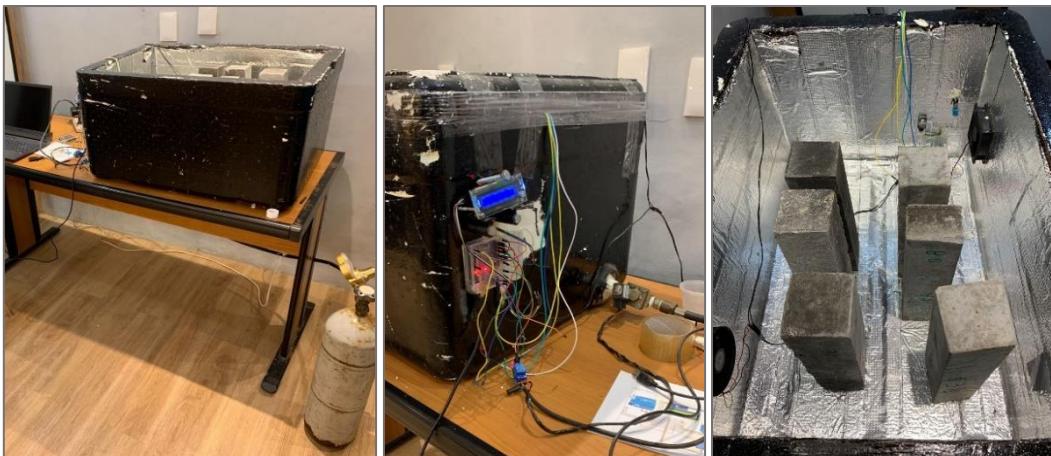


Figura 31 – Câmara de carbonatação acelerada utilizada na análise.

Fonte: AUTOR (2022).

A câmara de carbonatação acelerada do presente estudo foi construída de forma simplificada, apenas com os componentes necessários para uma exposição homogênea dos corpos de prova ao CO₂ e com o respectivo monitoramento de ambiente interno. A mesma era constituída pelos seguintes itens principais: caixa de isopor de dimensões 82,5 x 62 x 45 cm (comprimento, altura, largura); isolante adesivo impermeabilizante (interno); membrana asfáltica impermeabilizante (externa); coolers para circulação de gás (120mm); cilindro de CO₂; regulador de pressão analógico; válvula solenoide para gás (1 Mpa); conexões de cobre; tubo para CO₂; sensor digital de temperatura e umidade DHT11; sensor digital de CO₂ MG811; arduino UNO com visor LCD 16x2 (módulo 12C).

Após cada respectivo período de exposição na câmara, a determinação da profundidade de carbonatação foi realizada primeiramente retirando-se uma fatia (seção transversal), com espessura aproximada de 50mm. Sendo esta fatia obtida por meio do corte com serra circular diamantada e o restante do corpo de prova previamente selado com adesivo epóxi (Araldite®) na seção remanescente, retornando para a câmara até a posterior medição.

Nas fatias obtidas foi pulverizada uma fina névoa, por borrifador manual, de solução aquosa-alcoólica indicadora de pH. A solução foi preparada utilizando-se 30% de água destilada e 70% de álcool etílico, com posterior adição em massa de 1% do indicador (fenolftaleína), segundo a norma europeia DIN EN 14630 (2007). Após o contato da solução com a amostra analisada, esperou-se a mesma secar para firmar a coloração e distinguir-se melhor a área carbonatada (sem cor; pH < 8,5) da área não carbonatada (rosa carmesim; pH > 8,5) conforme a Figura 32.

A profundidade de carbonatação nas fatias dos prismas foram obtidas utilizando-se um paquímetro digital (resolução 0,01mm), medindo-se 5 pontos aproximadamente

equidistantes para cada lado da seção conforme a Figura 32. Sendo o resultado (d) representado pela média das 20 medições individuais (em milímetros) de cada fatia analisada, de um mesmo concreto, na respectiva idade.

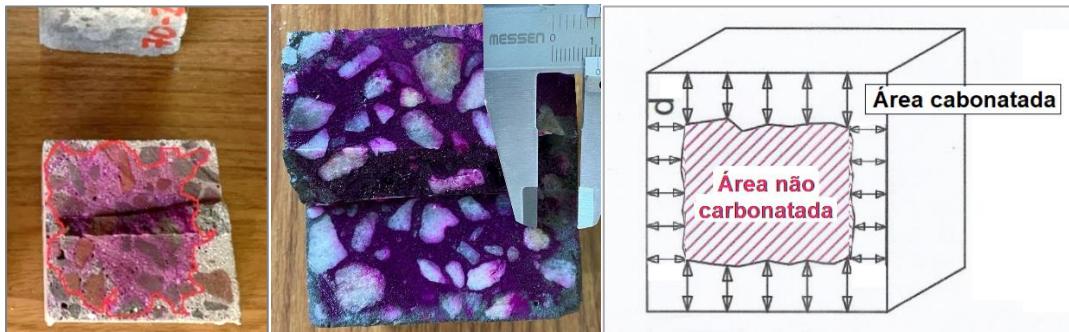


Figura 32 - Esquema de medições nas fatias retiradas dos prismas, através de corte com cerra circular.
Fonte: RIBEIRO *et al.* (2021); AUTOR (2022).

Para cada um dos concretos analisados foi gerada uma curva da profundidade média de carbonatação (milímetros) ao longo do tempo (semana), conforme ISO 1920-12 (ISO, 2015) e Ribeiro *et al.* (2021), e classificados segundo a metodologia proposta pelo conjunto de norma e autores anteriormente citados.

3.5.2 Penetração de íons cloreto

Em relação ao método de ensaio, devido à algumas limitações técnicas, optou-se por realizar uma análise mais simples e próxima da realidade, todavia um pouco mais demorada, utilizando a difusão (regime não-estacionário) como mecanismo de transporte principal já que o mesmo predomina no fenômeno natural de ingresso dos agentes agressivos (AASHTO, 1980; NT BUILD 443, 1995; JÚNIOR, 2019; RIBEIRO *et al.*, 2021).

Os corpos de prova utilizados no ensaio possuíam formato prismático (Figura 33) de dimensões aproximadas de 80x80x150 mm. A escolha deste formato em questão deveu-se por conta da disponibilidade do mesmo durante a pesquisa, a ausência do efeito de sobreposição do fenômeno na superfície lateral (KULAKOWSKI, 2002; PERIM, 2006, FERREIRA, 2013; SILVA *et al.*, 2017; MIRANDA, 2018; SANTOS *et al.*, 2020), juntamente à quantidade limitada de agregado graúdo sintético produzido para produção de outros exemplares.



Figura 33 - Corpos de prova prismáticos para ensaio de penetração de íons cloreto.
Fonte: AUTOR (2022).

Para o condicionamento das amostras até o dia do ensaio em questão, as mesmas após a desmoldagem, foram mantidas em cura úmida submersa por 90 dias para que a ação pozolânica do cimento (CP IV) utilizado se desenvolve-se significativamente durante o processo de hidratação (YANG & WANG, 2004; PARK *et al.*, 2016), também por recomendação de Júnior (2019) baseado na norma europeia NT BUILD 443 (1995) da qual a metodologia de ensaio foi adotada. Após este período de cura, as amostras foram retiradas e deixadas para secarem em estufa durante 48 horas à temperatura ($50 \pm 5^\circ\text{C}$), até obter-se a constância de massa.

Baseando-se na norma europeia e Ribeiro *et al.* (2021), foram adotados os parâmetros de ensaio descritos na Tabela 16. A Figura 34 apresenta o condicionamento e disposição das amostras durante o ensaio.

Tabela 16 – Principais parâmetros adotados durante o ensaio de penetração de íons cloreto.

Corpo de prova geometria (mm)	Temperatura (°C)	¹ NaCl (%)	Condição das amostras	Umidade Relativa (%)	Tempo de exposição (dias)
prismático (80x80x150)	27 ± 2	3,0	submersa (recip. fechado)	100	28 e 60

¹ Solução de cloreto de sódio, com concentração especificada.
Fonte: NT BUILD 443 (1995); JÚNIOR (2019); RIBEIRO *et al.* (2021).



Figura 34 - Corpos de prova prismáticos após o preenchimento do recipiente com solução de NaCl (3%).
Fonte: AUTOR (2022).

A adoção de uma concentração de 3% na solução de NaCl teve como justificativa: assemelhar-se com as das águas marinhas; seu uso recorrente nos procedimentos internacionais normatizados; e a disponibilidade da mesma em fornecedores, para a realização do ensaio. A escolha de 2 idades para o ensaio teve o intuito de presenciar o desenvolvimento do fenômeno ao longo do tempo, apesar de ser utilizada apenas a final para classificação da resistência dos concretos aos cloretos. O tempo total de ensaio foi adotado levando em conta a disponibilidade de tempo restante para o desenvolvimento do estudo de durabilidade, mas o mesmo atendeu ao período mínimo recomendado por norma (>35 dias).

Após as respectivas idades de ensaio, os corpos de prova foram retirados do recipiente com a solução de NaCl, deixados para secar ao ar livre por 24h equilibrando a umidade com o ambiente; depois rompidos longitudinalmente por tração na compressão de modo a dividi-los em 2 partes iguais tomando como base a maior seção (Figura 35).



Figura 35 - Esquematização do corpo de prova prismático rompido por tração na compressão.
Fonte: AUTOR (2022).

Com as seções longitudinais expostas, aspergiu-se em ambas uma fina névoa da solução de AgNO₃ - nitrato de prata (0,1%) - por meio de um borrifador manual, segundo recomendações de Ribeiro *et al.* (2021). Após a secagem da solução nas seções do prisma e demarcação nítida da coloração “esbranquiçada” (área contaminada por cloretos) e “amarronzada” (área livre de cloretos), as mesmas foram fotografadas em alta resolução (Figura 36).

Fazendo-se uso de um paquímetro digital (Digimess® - resolução 0,01mm), em cada lado da seção exposta foi realizado medições em 6 pontos distintos aproximadamente equidistantes entre si conforme a Figura 37, totalizando 24 medições para cada metade do prisma rompido (semelhante ao realizado na carbonatação).

Baseado nestes dados foi então calculada a profundidade de penetração dos íons cloreto, fazendo-se uma média entre as medições das metades de mesmo um mesmo prisma.



Figura 36 - Esquematização das seções longitudinais aspergidas com solução de AgNO_3 .
Fonte: AUTOR (2022).



Figura 37 - Esquematização das medições nas seções dos prismas fraturados.
Fonte: AUTOR (2022).

A resistência à penetração aos íons cloretos foi avaliada individualmente nos concretos com as amostras AGS 70, AGS 80, AGS 90 e REF (seixo), tomando como embasamento a recente classificação proposta por Júnior (2019), fruto de uma extensa análise de dados sobre o fenômeno. A classificação correlaciona vários intervalos de penetração, obtidos de diferentes procedimentos normativos (naturais e acelerados), inclusive o utilizado no presente estudo (NT BUILD 443, 1995).

Como informações complementares, também foram geradas curvas da média de penetração dos cloretos (milímetros) ao longo do tempo de ensaio (dias).

Evidenciando assim o desenvolvimento do fenômeno para cada concreto com agregado graúdo sintético, e do modo semelhante para o com agregado natural.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Materiais primários

O cimento Portland e areia foram caracterizados segundo o item 3.1.1, apresentando os resultados mostrados nas Tabela 17 e 18. Apenas à título de eventuais comparações entre estudos futuros, a composição química (FRX) do RB cedido pela Hydro Alunorte, é evidenciada na Tabela 19.

Tabela 17 - Caracterização do cimento Portland.

Tipo	Massa específica (g/cm³)	Índice de finura (%)	Tempo de pega (h : min.)	
			início	fim
CP IV - 32	2,83	3,17	2:56	5:31

Fonte: AUTOR (2022).

Tabela 18 - Síntese da caracterização do agregado miúdo natural (areia).

Amostra	Massa específica (g/cm³)	Massa unitária (g/cm³)	Módulo de finura	Diâmetro máx. característico (mm)
Areia	2,59	1,68	1,86	1,18

Fonte: AUTOR (2022).

Tabela 19 - Composição química do RB, *in natura*, utilizado na produção dos agregados sintéticos.

Composto	Al₂O₃	SiO₂	Fe₂O₃	TiO₂	Na₂O	CaO	LOI ¹
%	21,27	17,72	34,31	6,89	9,25	1,22	8,11

¹ Perdas por ignição

Fonte: AUTOR (2022), adaptado de SOUZA (2021a).

4.1.2 Agregado graúdo sintético de RB

Os agregados graúdos sintéticos otimizados, nos quais as misturas de componentes atenderam previamente aos critérios de segurança no pré-estudo, foram submetidos aos ensaios descritos no item 3.1.2. Os resultados obtidos estão evidenciados na Figuras 38, 39, 40, 41 e 42.

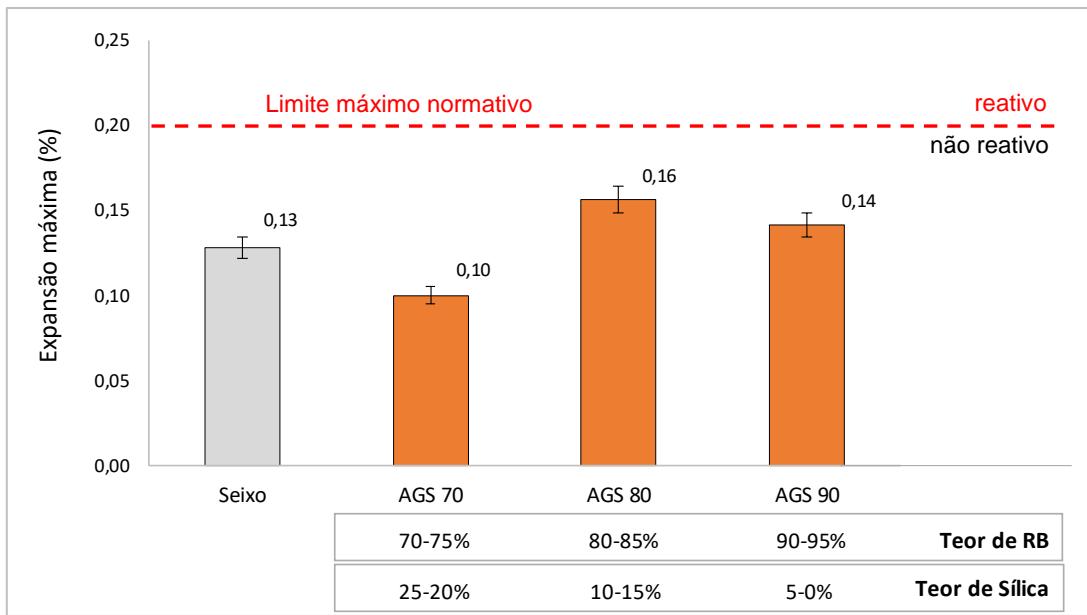


Figura 38 – Potencial reativo dos agregados graúdos, obtido no ensaio de RAA.
Fonte: AUTOR (2022).

Como apresentado na Figura 38, a potencialidade reativa das amostras otimizadas de agregados sintéticos atendeu aos critérios da ABNT NBR 15577 (2018) com relação à reação álcali-agregado (RAA). Todos os agregados graúdos analisados permaneceram abaixo do limite de expansão máxima normativa (0,20%), sendo os mesmos classificados como inóculos. Dessa forma, os agregados graúdos sintéticos analisados tornam-se potencialmente viáveis para serem empregados em concretos estruturais sem o risco de possível deterioração pela RAA.

Segundo Ribeiro *et al.* (2012) há uma certa preocupação quando se expõe o RB às matrizes cimentícias uma vez que o resíduo apresenta elevado teor de álcalis, principalmente o sódio, podendo favorecer a ocorrência da reação álcali-sílica. García-Lodeiro *et al.* (2007) e Munhoz *et al.* (2008) afirmam que a adição pozolânica na matriz cimentícia configura-se como umas das alternativas eficazes de se reduzir significativamente o fenômeno. Ribeiro *et al.* (2012) ainda destaca que a inibição da reação álcali-sílica também está ligada à um teor mínimo de adição pozolânica no cimento utilizado, podendo este teor ser ou não suficiente para tal dependendo da reatividade do agregado analisado.

Segundo Bickóz (1972) e Hoobs (1988), para a ocorrência das expansões (reação álcali-sílica), os agregados necessitam conter sílica suficiente capaz de reagir. Os autores sugerem que há um teor desse mineral no agregado graúdo que leva à expansão máxima durante a reação, correspondendo dessa forma a um pico definido como “conteúdo péssimo”. Os mesmos autores ainda afirmam que a ocorrência da

reação também está ligada à quantidade de agregado reativo contido na matriz cimentícia, dessa forma não se comportando de maneira linear.

Pode-se destacar que, apesar de inóculos, a tendência de reatividade dos agregados graúdos sintéticos adotou comportamento ligeiramente crescente com o aumento do teor de RB junto à diminuição da sílica nas composições. A amostra AGS 70 demonstrou a menor tendência de expansão dentre os agregados sintéticos analisados, sendo esta a que possuía menor proporção composicional de RB e a maior de sílica. As amostras de agregados AGS 80 e AGS 90 obtiveram resultados um tanto semelhantes, considerando as faixas de erro, e os mesmos detinham teores de RB maiores que o AGS 70 (assim como menores teores de sílica).

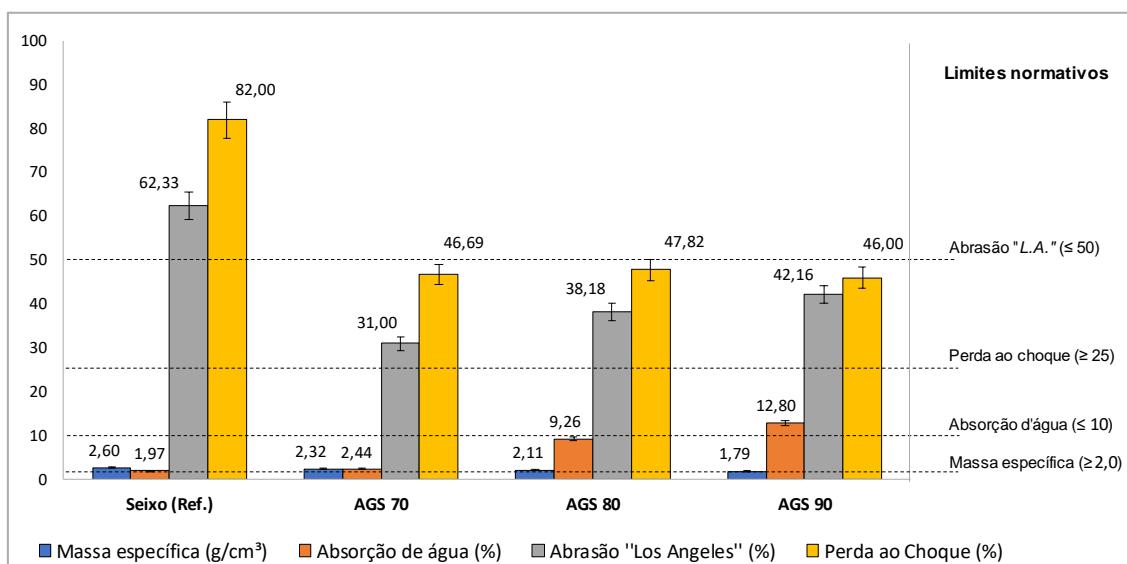


Figura 39 – Resumo da caracterização do agregado graúdo natural e sintético, características intrínsecas.
Fonte: AUTOR (2022), adaptado de RIBEIRO (2022).

A ANBT NBR 16974 (2021) especifica que a perda de massa por abrasão dos agregados graúdos deve ser menor que 50%, como requisito para utilização em concretos estruturais. De acordo com os resultados evidenciados (Figura 39) e limites normativos vigentes para abrasão, os agregados graúdos sintéticos analisados atenderam a especificação requerida e obtiveram desempenho mecânico superior ao agregado natural (seixo).

A perda de massa ao choque, também evidenciada na Figura 39, apresentou resultados satisfatórios e condizentes com as especificações normativas para agregados graúdos de utilização em concretos estruturais. É importante destacar que todos os agregados sintéticos analisados (AGS 70, AGS 80 e AGS 90) mostraram comportamento muito semelhante em relação à perda ao choque, isto evidenciado pela proximidade dos resultados obtidos (46,69%; 47,82% e 46,00% respectivamente).

Com relação à absorção de água dos agregados graúdos, as amostras AGS 80 e AGS 90 obtiveram valores um tanto próximos (9,26% e 12,80% respectivamente), porém um tanto distantes das absorções apresentadas pelas amostras AGS 70 e seixo (1,97% e 2,44%, respectivamente) que se mostraram bem semelhantes com uma diferença de 0,47%. Entre as amostras, apenas o AGS 90 ultrapassou a recomendação de 10% para absorção de água de agregados graúdos artificiais voltados ao concreto estrutural, segundo a norma alemã DIN 4226 (2002), chinesa WBTC No.12/2002 e estudos de Rossignolo (2009a). Na literatura científica da construção civil os agregados sintéticos que utilizam o RB como componente principal podem assumir valores de absorção d'água entre 0,33 - 21,67%, sendo este fator dependente das diversas variáveis envolvidas na produção dos mesmos (HUIFEN *et al.*, 2010; OLIVEIRA *et al.*, 2012; AIRES *et al.*, 2013; ISAIAS JR. *et al.*, 2013; ROSÁRIO, 2013; ISAIAS *et al.*, 2014; DO T. *et al.*, 2015; MOLINEUX *et al.*, 2016; SONG *et al.*, 2021; SUN Y. *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2021).

As massas específicas dos agregados, com exceção do AGS 90, mostraram-se acima do limite mínimo para a classificação dos mesmos como de densidade normal ($>2,0\text{g/cm}^3$). Em decorrência deste fato apenas o AGS 90, conforme Souza (2010), foi classificado como agregado graúdo leve.

Como forma de complementação das análises, a Figura 40 correlaciona os teores de matéria prima variável utilizada (RB e sílica) com as propriedades físico-mecânicas dos agregados sintéticos após a caracterização.

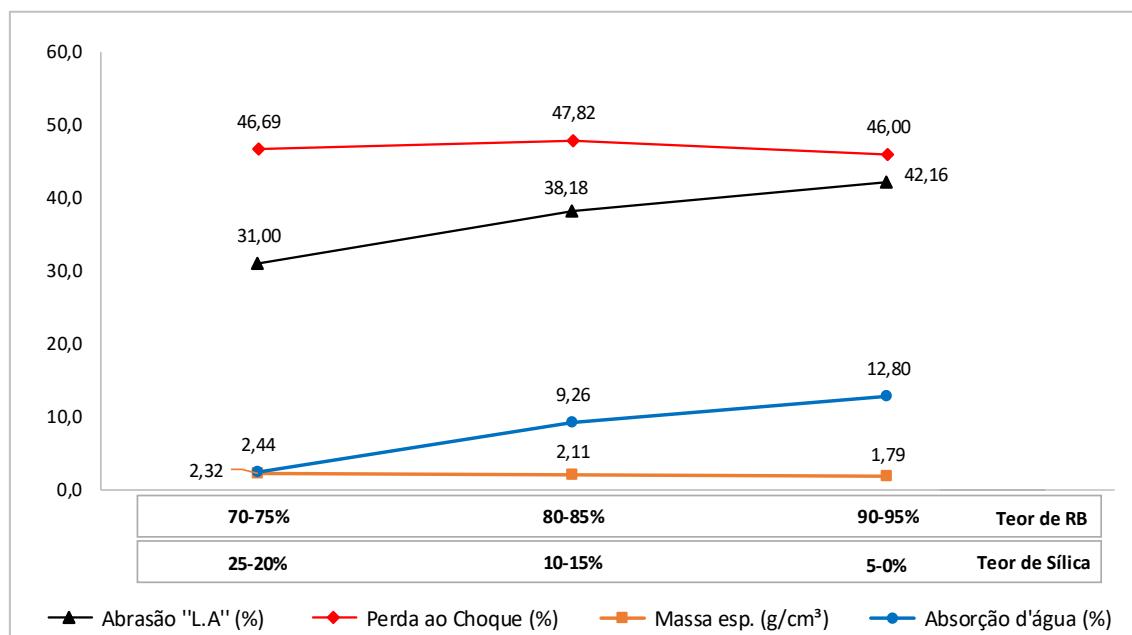


Figura 40 – Correlação do teor composicional (variado) dos agregados sintéticos e suas propriedades físico-mecânicas apresentadas. Fonte: AUTOR (2022), adaptado de RIBEIRO (2022).

Atentando-se primeiramente para as características mecânicas dos agregados sintéticos (perda de massa ao choque), percebe-se que de certa forma a mesma manteve certa constância apesar da variação do teor de RB e sílica destes agregados. Dessa forma evidenciando que as diferenças nos teores de ambos estes materiais nos agregados não chegaram a influenciar significativamente nos resultados de perda ao choque.

Com relação ao desgaste dos agregados sintéticos por abrasão, fica evidente que a variabilidade de composição dos mesmos influenciou de forma nítida nos resultados obtidos. Esta característica mecânica comportou-se de maneira positiva com base na diminuição do teor de RB e aumento do teor de sílica nos agregados, tanto é que a amostra AGS 70 obteve o melhor desempenho mecânico dentre os agregados sintéticos (Figura 40) e natural (Figura 39). Segundo Rosário (2013), a sílica por conta das suas propriedades vítreas, tem papel importante na produção dos agregados sintéticos uma vez que irá conferir maior dureza e resistência mecânica ao mesmo, da mesma forma ao concreto que incorpora tais agregados. Hildebrando (1998) já constatava em seu estudo que o teor de 50-70% de RB (em massa) também contribui com excelentes propriedades mecânicas em misturas calcinadas deste resíduo, para produção de materiais cerâmicos para construção civil.

Conforme evidenciado (Figura 40), a absorção de água também sofreu influência direta da variação do teor de RB e principalmente do teor de sílica nos agregados sintéticos. Segundo Santos *et al.* (2011) e Júnior *et al.* (2022) o aumento do teor de sílica na composição dos agregados sintéticos faz com que a camada vítreia presente nos mesmos se torne mais espessa, diminuindo a quantidade de poros, e resultando no decréscimo da absorção de água. Souza (2010) aponta para uma redução significativa da porosidade do agregado sintético com teores de sílica de até 20%, sendo o desenvolvimento da fase vítreia proporcional a este teor. Os estudos de Tuan *et al.* (2013) e Lau *et al.* (2017) também atestam tal comportamento apresentado, uma vez que os autores demonstram a relevância no controle da morfologia do agregado sintético no controle da absorção de água.

Dentre as características analisadas, e de forma semelhante, a massa específica dos agregados mostrou-se distinta como consequência da sua variabilidade composicional. Conforme evidenciado na correlação (Figura 40), quanto maior o teor de sílica presente na composição do agregado maior se configura a densidade final do mesmo. Souza (2010) constatou que a sílica presente no agregado sintético, durante o processo produtivo, tende a ocasionar o fechamento dos poros ao mesmo tempo que causa um aumento da densidade junto à diminuição da absorção de água.

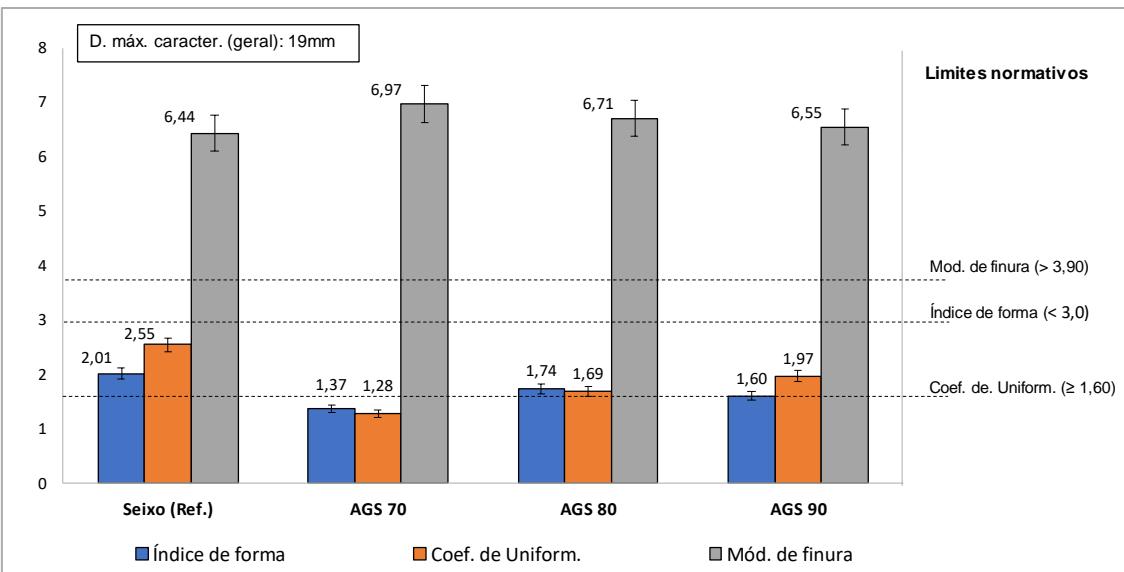


Figura 41 – Resumo da caracterização dos agregados graúdos (natural e sintéticos), características granulométricas. Fonte: AUTOR (2022), adaptado de RIBEIRO (2022).

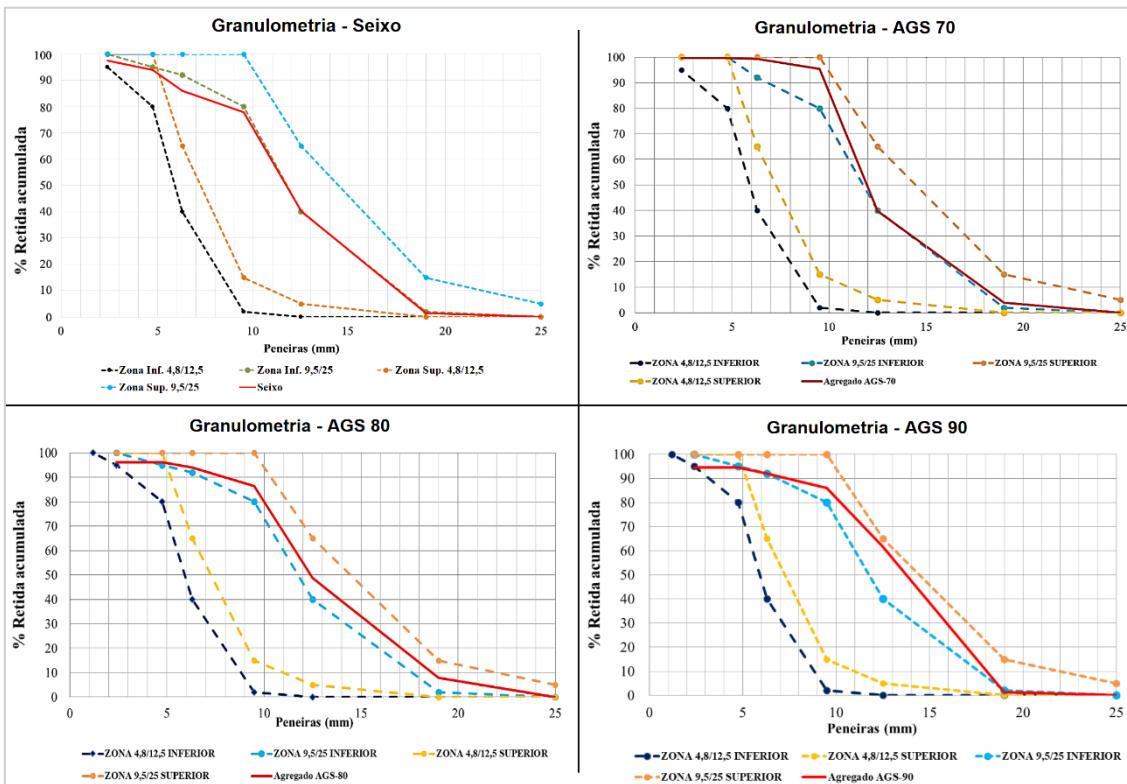


Figura 42 - Curvas granulométricas dos agregados graúdos (natural e sintéticos).
Fonte: AUTOR (2022), adaptado de RIBEIRO (2022).

Erdogan e Fowler (2005) *apud* Souza (2022) afirmam que a forma de uma partícula/grão é expressa com base nas 3 dimensões perpendiculares de um paralelepípedo, sendo determinada através de um paquímetro, o que abrange todos os limites dimensionais de uma partícula. Segundo os resultados de índice de forma (Figura 41), obtidos conforme a ABNT NBR 7809 (2019), todos agregados sintéticos analisados

foram classificados como formato alongado-lamelar uma vez que se encontraram dentro do limite normativo especificado ($< 3,0$). O índice de forma dos agregados graúdos, para determinada trabalhabilidade, também afeta de forma direta a resistência à compressão axial dos concretos uma vez que a mesma se eleva com o aumento do índice (SBRIGHI & FRAZÃO, 1984 *apud* SILVA *et al.*, 2020). Segundo Mehta & Monteiro (2008) as partículas lamelares/ alongadas são mais frágeis, dessa forma prejudicando a obtenção de maiores resistências mecânicas no concreto além do aumento no consumo de água para uma trabalhabilidade adequada. Em relação ao coeficiente de uniformidade das amostras (Figura 41), com leve exceção do AGS 70, todas se apresentaram com granulometria desuniforme (preferível para concreto) segundo Souza (2010).

Conforme o evidenciado pelas curvas granulométricas (Figura 42), os agregados sintéticos foram classificados em sua maioria na zona 9,5/25mm, apresentando uma certa continuidade dos grãos e mesmo diâmetro máximo característico (19mm), dessa forma sendo aptos para a utilização em concretos como agregado graúdo segundo a ABNT NBR 7211 (2022). Como consequência deste fato, e de forma semelhante, os resultados de módulo de finura dos agregados (Figura 41) seguiram-se também condizentes com os critérios normativos da NBR NM 248 (2003) que indica um valor ($> 3,90$); sendo este o limite mínimo do agregado graúdo dentro da “zona utilizável inferior” de granulometria pode assumir segundo a mesma.

4.2 CARACTERIZAÇÃO FISICO-MECÂNICA DO CONCRETO

4.2.1 Propriedades mecânicas

Os concretos produzidos foram submetidos aos ensaios de avaliação das características mecânicas conforme o item 3.4.1. As médias de resultados estão evidenciadas nas Figuras 43 e 44.

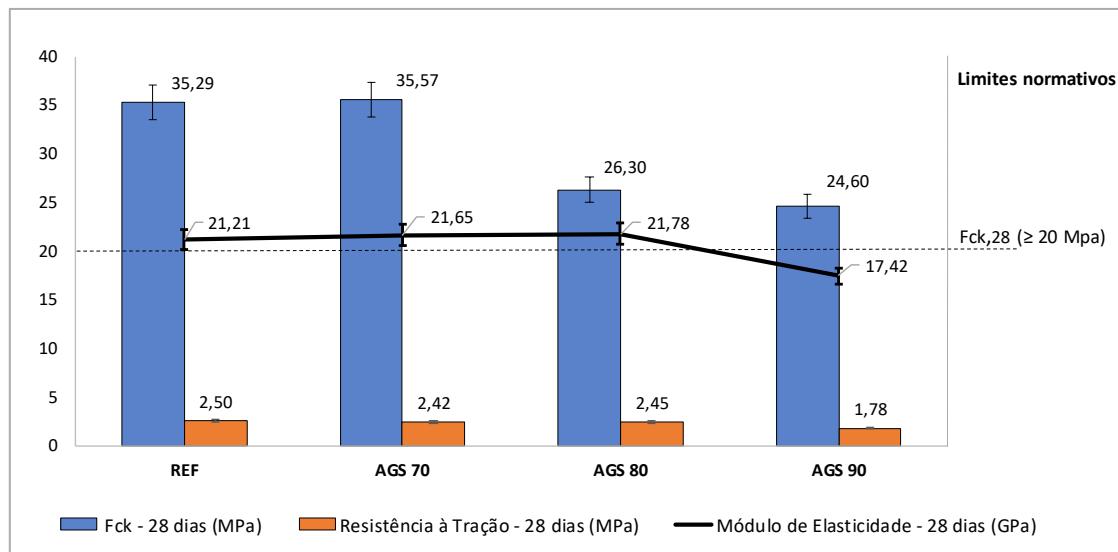


Figura 43 – Resumo da caracterização mecânica dos concretos.

Fonte: AUTOR (2022), adaptado de RIBEIRO (2022).

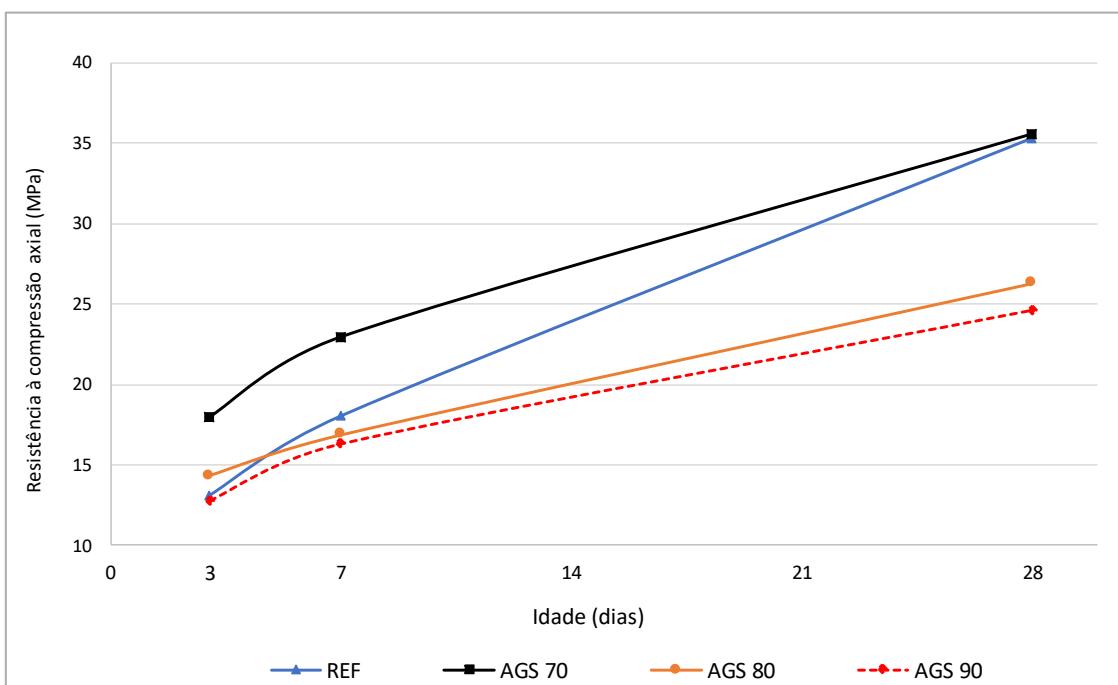


Figura 44 – Estimativa do desenvolvimento da resistência média à compressão ao longo do tempo.

Fonte: AUTOR (2022), adaptado de RIBEIRO (2022).

Conforme os resultados da caracterização mecânica dos concretos, primeiramente tratando-se da resistência à compressão axial, todos atenderam ao critério normativo da ABNT NBR 6118 (2014) para idade de 28 dias (≥ 20 MPa) e dessa forma podendo ser classificados como estruturais. Dentre os concretos analisados o que possuía a amostra AGS 70 obteve a maior resistência a compressão axial, sendo semelhante ao concreto com agregado natural (REF), apesar das diferenças no teor de argamassa. O desenvolvimento inicial da resistência dos concretos REF, AGS 80 e AGS 90 (3 e 7 dias) se deu de maneira semelhante, já o AGS 70 para as mesmas idades foi superior. Contudo, o REF e AGS 70 aos 28 dias assumiram valores muito próximos e maiores aos outros concretos (c/ AGS 80 e AGS 90) que por sua vez findaram a mesma idade com valores também semelhantes entre eles, porém menores.

A resistência a tração indireta dos concretos assumiu valores muito próximos, com exceção do AGS 90 que foi o menor dentre os 3 concretos com agregados sintéticos. A mesma variou, proporcionalmente, entre 6,80 - 9,32% da resistência a compressão axial.

Com relação ao módulo de elasticidade estático dos concretos, apesar das diferenças no teor de argamassa, o mesmo também assumiu valores muito semelhantes, exceto o com AGS 90 no qual foi menor dentre os demais e coincidindo ao ocorrido com a resistência à compressão axial e tração indireta do mesmo.

Segundo Rosário (2013) que também produziu concretos utilizando agregados graúdos de RB, a elevação da resistência a compressão axial pela utilização do agregado sintético (AGS 70) em comparação ao natural (seixo), possivelmente deve-se ao menor desgaste por abrasão apresentado pelo mesmo dentre os agregados analisados. Como já evidenciado anteriormente, a autora também aponta para um incremento nas propriedades mecânicas do concreto a partir da elevação do teor de sílica utilizada no agregado sintético.

4.2.2 Absorção de água por capilaridade (porosidade)

Conforme o item 3.4.2, os concretos foram submetidos a análises de absorção por capilaridade para avaliação indireta da sua porosidade, fator este de extrema importância ao se tratar da durabilidade dos mesmos uma vez que pode levar a condução de substâncias deletérias para seu interior, que resultam na corrosão das armaduras nas estruturas (PAPADAKIS *et al.*, 1991; HOUST *et al.*, 1993; BRANCA *et al.*, 1993; JIANG *et al.*, 2000; SAETA & VITALIANI, 2004). As Figuras 45 e 46 evidenciam as médias dos resultados obtidos no respectivo ensaio.

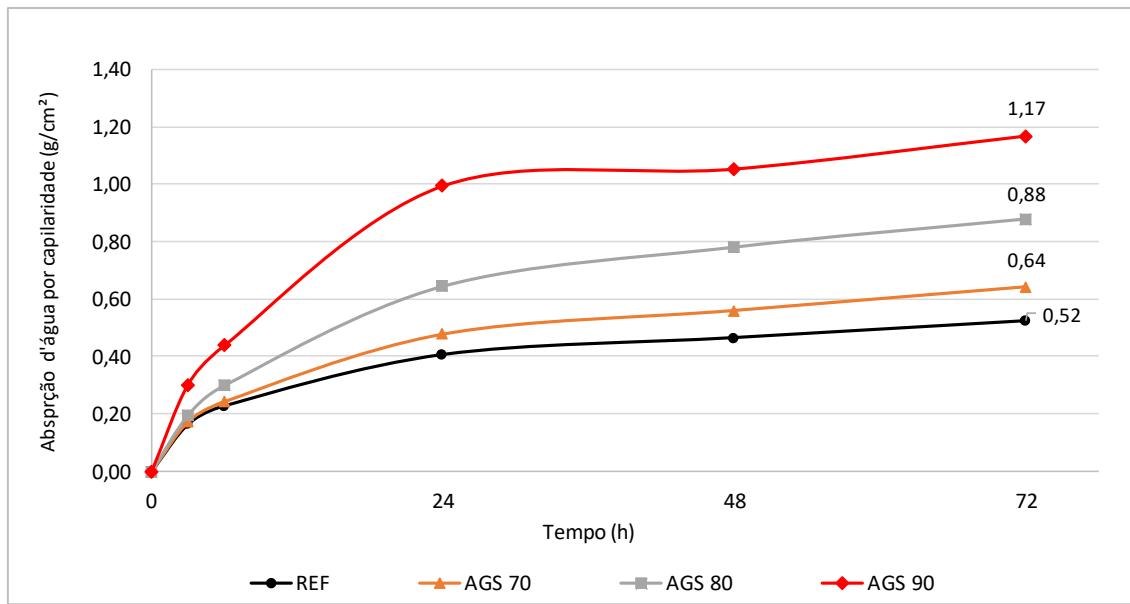


Figura 45 - Estimativa da absorção média de água por capilaridade dos concretos, ao longo do tempo.
Fonte: AUTOR (2022).

Como evidenciado pelos resultados, a absorção de água por capilaridade apresentou-se de forma crescente a partir do concreto com agregado natural (REF) seguido do AGS 70, AGS 80 e AGS 90 respectivamente (Figura 45). Destaca-se que logo nas primeiras 24h de ensaio já havia um diferencia nítida entre as absorções apresentadas pelos concretos, sendo o AGS 90 que assumiu os maiores valores ao longo do tempo de ensaio como previsto. A absorção final de água por capilaridade do concreto com o AGS 70 foi a menor dentre os com agregados sintéticos. O concreto com AGS 80 assumiu um valor intermediário ($0,88 \text{ g/cm}^2$) entre os que continham o AGS 70 e AGS 90 respectivamente.



Figura 46 - Média da ascensão de água nos corpos de prova cilíndricos, rompidos diametralmente após o término do ensaio de absorção por capilaridade.
Fonte: AUTOR (2022).

Tratando-se da ascensão de água por capilaridade (Figura 46) determinada após o rompimento diametral dos corpos de prova, a mesma seguiu-se de maneira semelhante ao evidenciado na absorção de água capilar, onde mostrou crescimento a partir do concreto REF seguido dos que continham o AGS 70; 80 e 90 respectivamente, sendo o AGS 70 e AGS 80 os com valores mais próximos. De forma geral tanto a absorção por capilaridade quanto a ascensão de água mostraram comportamentos semelhantes ao ocorrido na absorção individual apresentada pelos agregados graúdos (sintéticos e natural), a despeito da diferença no teor de argamassa dos concretos analisados.

Segundo Neville (1997), apesar da absorção capilar não ser oficialmente parâmetro da qualidade de durabilidade dos concretos, a maioria dos “bons” concretos possuem absorção bem abaixo de 10% em massa e sendo os de alta qualidade usualmente menores que 5% (KOSMATKA *et al.*, 2002 *apud* SAFIUDDIN *et al.*, 2010). Apenas a título de informação, caso os concretos fossem analisados segundo a observação feita por Neville (1997), todos seriam classificados como de boa qualidade uma vez que obtiveram absorção em massa entre 1-3%.

É importante destacar que os agregados graúdos sintéticos possuíam porosidades distintas por conta dos diferentes teores de sílica empregados nas composições, sendo esse fato evidenciado pelos resultados de absorção d’água já analisados. Isto aliado ao formato lamelo-angular e as pequenas diferenças no índice de forma e coeficiente de uniformidade dos mesmos, pode ter influenciado na necessidade adicional de argamassa para os concretos atenderem aos critérios pré-fixados que por sua vez contribuiu com as divergências nas absorções de água por capilaridade (TROIAN, 2010; SILVA *et al.*, 2020).

4.3 DURABILIDADE DO CONCRETO

4.3.1 Resistência à carbonatação

A análise de durabilidade dos concretos com agregados sintéticos, por meio do ensaio de carbonatação acelerada, foi conduzido no Instituto Federal do Maranhão (Campus São Luís - MA) conforme as recomendações de Ribeiro *et al.* (2021), baseadas na ISO 1920-12 (ISO, 2015), vistas no item 3.5.1. As médias dos resultados obtidos nesta análise estão expostas nas Figuras 47, 48, 49, 50 e 51 e Tabela 20.

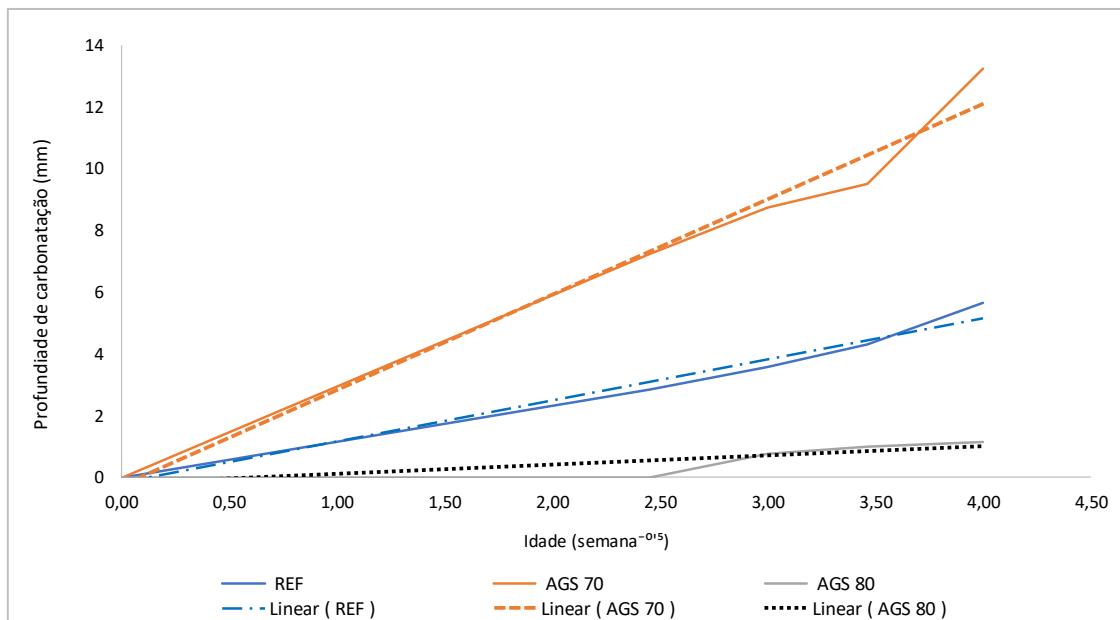


Figura 47 - Estimativa do desenvolvimento da profundidade de carbonatação nos concretos ao longo da raiz do tempo, em semanas (com linhas de tendência). Fonte: AUTOR (2022).

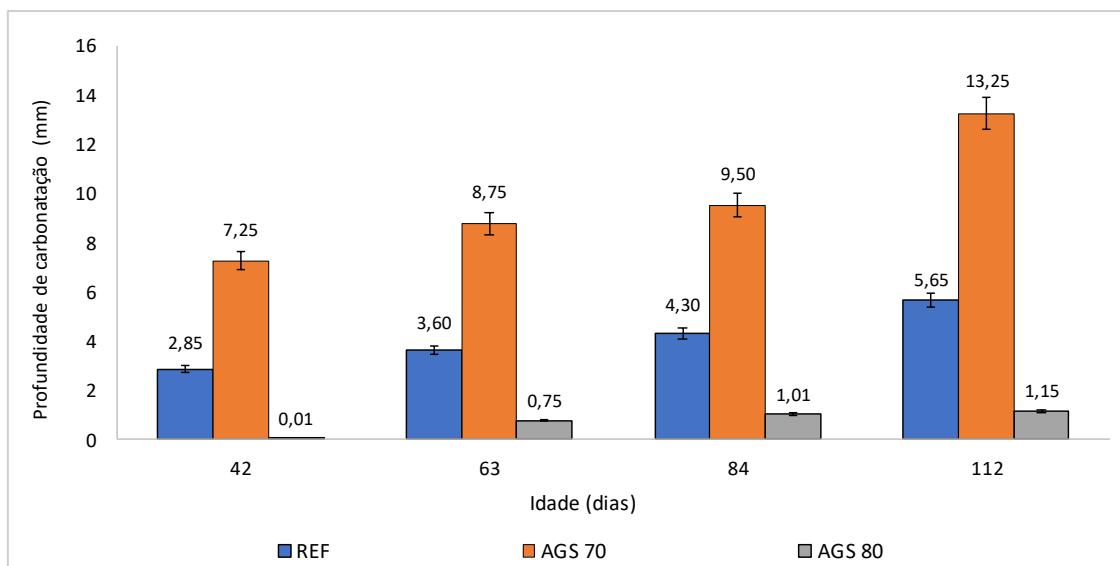


Figura 48 - Profundidade média de carbonatação nos concretos nas idades de análise (dias).
Fonte: AUTOR (2022).

Conforme evidenciado nos resultados de carbonatação acelerada, o fenômeno tomou proporções distintas nos concretos analisados durante seu desenvolvimento (Figura 47), tanto na idade inicial (42 dias) quanto final (112 dias) segundo a Figura 48. O concreto com o AGS 80 assumiu a menor profundidade de carbonatação (1,15 mm) ao final do ensaio, os demais REF e AGS 70 apresentaram 5,65 mm e 13,25 mm respectivamente.

A Figura 49 mostra, de forma real, as diferenças nos avanços do fenômeno de carbonatação nos concretos, após 42 dias de ensaio.



Figura 49 - Visualização da diferença de carbonatação nas faces dos prismas seccionados, aos 42 dias de ensaio. Fonte: AUTOR (2022).

Novamente, cabe certo destaque ao concreto com AGS 80 pelo fato do mesmo após a averiguação da primeira leitura (42 dias), apresentar um avanço quase nulo do fenômeno (0,01mm) e menor susceptibilidade ao ingresso de CO₂. De forma contrária, o concreto com AGS 70 foi o menos resistente à carbonatação, sendo este 2,34 e 11,52 vezes maior que do concreto com agregado graúdo natural (REF) e AGS 80 respectivamente, na última leitura aos 112 dias.

Embora este comportamento tenha sido contrário ao esperado, levando em conta as diferentes porosidades dos agregados e teores de argamassa dos concretos (REF < AGS 70 < AGS 80), supõe-se que o maior ingresso de CO₂ apresentado pelo concreto com a amostra AGS 70 pode ter sido atribuído ao coeficiente de uniformidade

desta que ficou abaixo do recomendado e resultou em um menor empacotamento da matriz cimentícia. Outra hipótese para explicar tal comportamento pode vir de possíveis falhas de adensamento durante a moldagem dos corpos de prova, e uma vez que haviam poucos exemplares para a realização do ensaio, a variabilidade de resultados não pode ser compensada pelo número de amostras de concreto utilizadas. Já a elevada dificuldade de ingresso do CO₂ no concreto com o AGS 80 pode estar ligada à um maior empacotamento dos grãos junto à um melhor adensamento durante a moldagem, gerando dessa forma uma maior densificação com à matriz cimentícia.

Conforme Rossignolo (2009), o equilíbrio na distribuição granulométrica do agregado resulta em concretos mais compactos e por consequência, mais duráveis, uma vez que dificultaria o ingresso dos agentes agressivos como o CO₂. Dessa forma, segundo o autor, são preferíveis granulometrias desuniformes para produção de concretos estruturais; sendo fator evidenciado pelo coeficiente de uniformidade dos agregados. Castro (2009) ressalta que um arranjo granulométrico bem graduado em uma matriz cimentícia é necessário para poder atuar positivamente nas características finais do concreto endurecido, como a resistência à carbonatação.

Baseando-se nos resultados individuais de carbonatação, também se tentou correlacioná-los com as características mecânicas individuais dos concretos produzidos e a absorção dos agregados graúdos respectivamente utilizados (Figura 50). Cabe ressaltar que as análises foram realizadas de maneira individual para cada tipo de concreto e seus respectivos ensaios, visto que houve a variação no teor de argamassa dos mesmos.

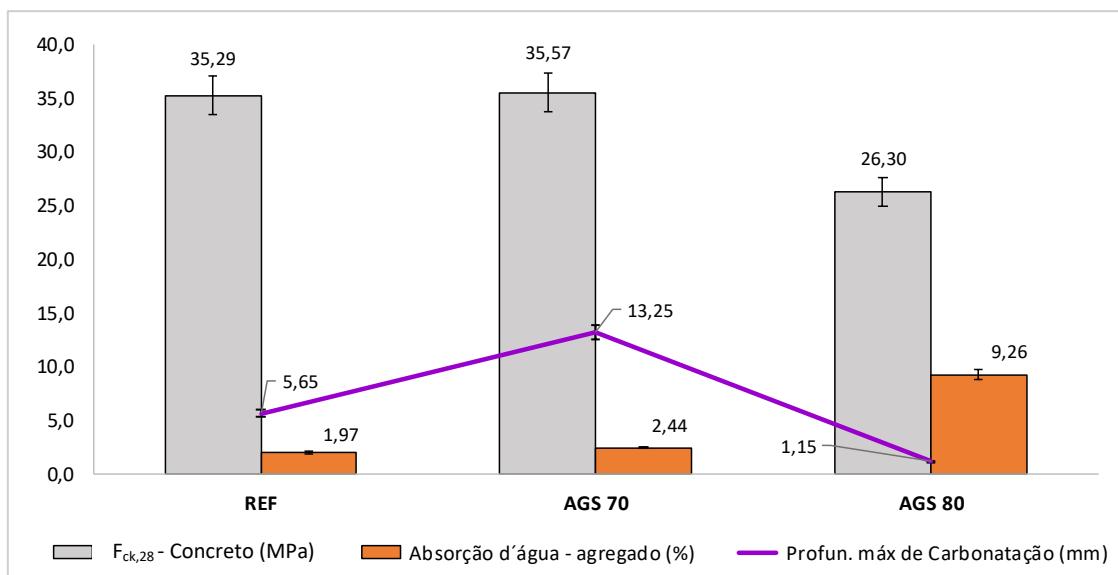


Figura 50 - Correlação individual dos ensaios de carbonatação acelerada, absorção de água dos agregados graúdos e $F_{ck,28}$ dos concretos.

Fonte: AUTOR (2022).

Como evidenciado, o avanço da frente de carbonatação seguiu um comportamento destoante quando se olha para os resultados individuais de resistência à compressão ($F_{ck,28}$) dos concretos e absorção dos agregados graúdos. O concreto com AGS 80, de menor $F_{ck,28}$ e maior absorção d'água para o agregado, apresentou a menor profundidade de carbonatação ao findar da análise aos 112 dias. Por sua vez o concreto AGS 70 obteve os maiores resultados quanto ao ingresso de CO_2 , sendo também o de maior resistência à compressão e com absorção de agregado graúdo próxima ao seixo utilizado no concreto REF.

De forma semelhante, a Figura 51 tenta correlacionar individualmente o avanço do fenômeno com outras propriedades isoladas do concreto (absorção capilar) e agregados graúdos (massa específica; absorção d'água).

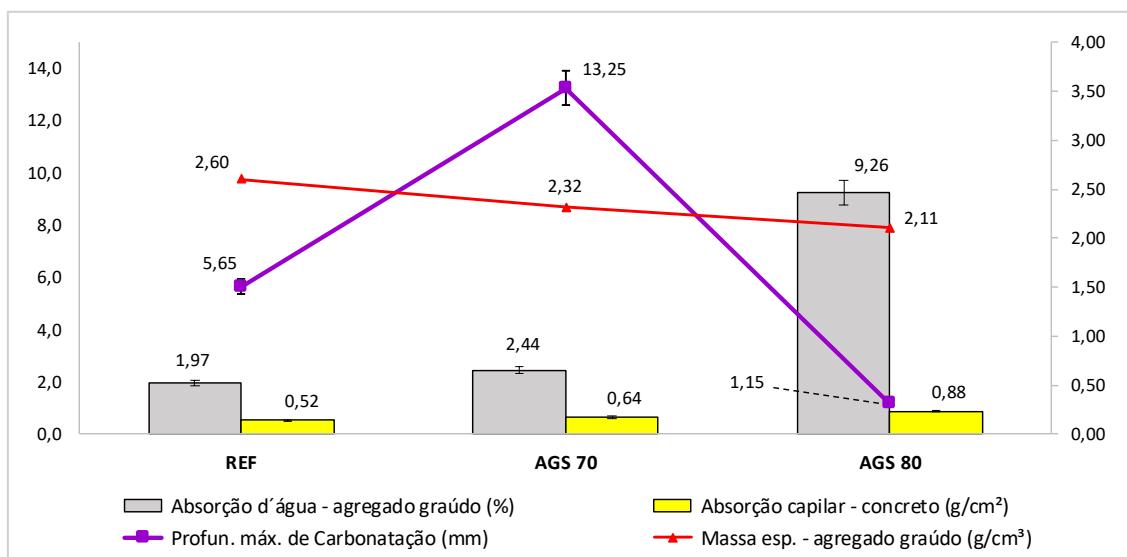


Figura 51 - Correlação individual dos ensaios de carbonatação acelerada, massa específica dos agregados e absorções dos agregados e concreto.

Fonte: AUTOR (2022).

Conforme ao evidenciado, pode-se perceber que de forma semelhante aos resultados anteriores, o concreto com menor avanço do fenômeno de carbonatação (AGS 80) por ventura possuía a maior absorção capilar e maior absorção d'água do respectivo agregado (que também detinha a menor massa específica).

Segundo Pauletti (2007), os agregados graúdos naturais como o seixo e brita, fazem parte dos fatores de menor influência direta para o desenvolvimento do fenômeno uma vez que são considerados inertes em relação à carbonatação; além de gerar por conta disso uma maior dispersão de resultados dependendo do critério adotado (KAZMIERCZAK, 1995; MONTEIRO, 1996; KULAKOWSKI, 2002). Contudo, tratando-se de agregados artificiais, Werle *et al.* (2011) afirmam que a utilização de agregados artificiais porosos com absorção de água superior à da matriz cimentícia podem resultar

em um acréscimo na susceptibilidade do concreto ao ingresso de CO₂, como visto nos resultados.

Tomando como base os resultados evidenciados e a classificação proposta por Ribeiro *et al.* (2021), referenciada pela ISO 1920-12 (ISO, 2015), os concretos produzidos com agregados graúdos (sintéticos e natural) foram classificados em relação às suas respectivas resistências à carbonatação, conforme mostrado na Tabela 20.

Tabela 20 – Classificação dos concretos analisados quanto a resistência à carbonatação.

Identificação (concreto)	Zona de exposição	Coeficiente de carbonatação acelerada (mm.sem ^{-0,5})	Coeficiente de variação (%)	Resistência à carbonatação
				112 dias de ensaio
REF (seixo)		1,81	13,2	Excepcional
AGS 70	Rural, Urbano ou Industrial leve	3,87	6,25	Baixa
AGS 80		0,74	34,9	Excepcional

Fonte: AUTOR (2022).

4.3.2 Resistência à penetração de íons cloreto

A determinação da resistência à penetração de íons cloreto nos concretos produzidos com o agregado sintético, realizada conforme a NT BUILD 443 (1995) e Ribeiro *et al.* (2021), visto no item 3.5.2, obtiveram os resultados evidenciados nas Figuras 52, 53, 54, 55, 56 e Tabela 21. Vale ressaltar que devido as diferenças no teor de argamassa, as análises foram realizadas de forma individual para cada tipo de concreto e seus respectivos ensaios.

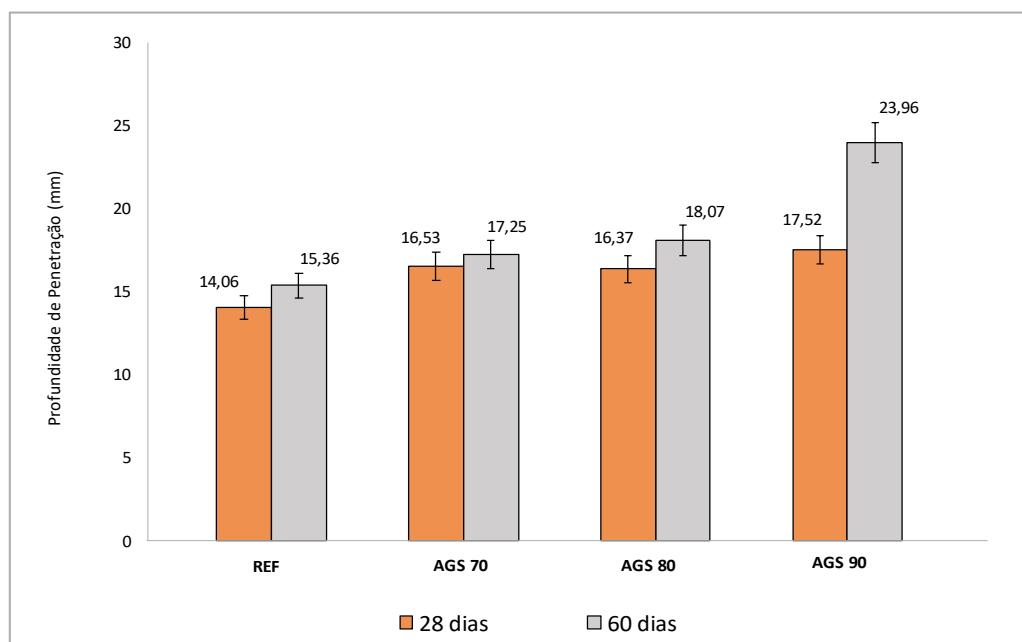


Figura 52 - Penetração média dos cloreto nos concretos após 28 e 60 dias de ensaio.
Fonte: AUTOR (2022).

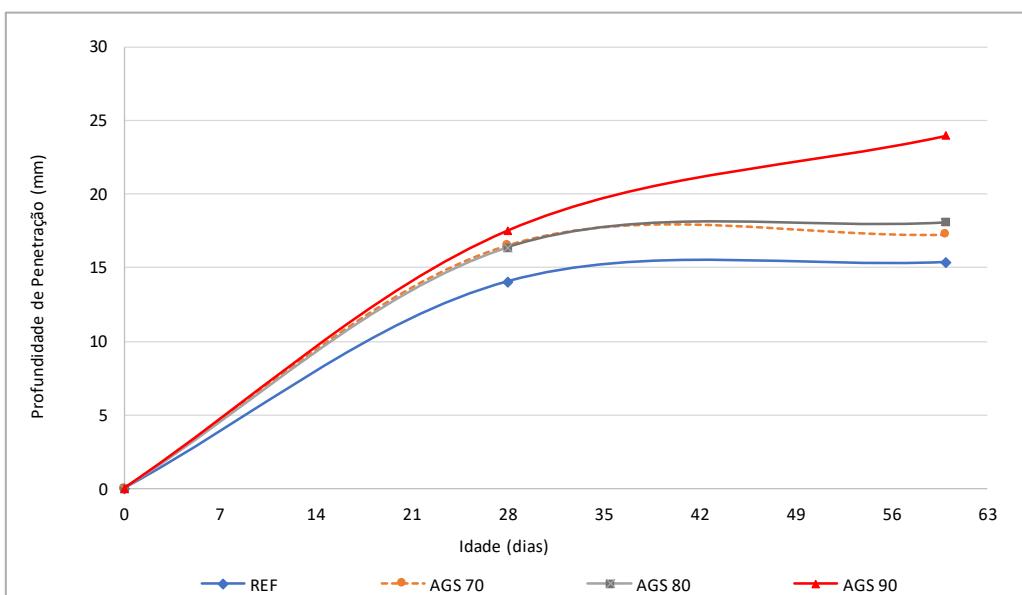


Figura 53 - Estimativa da penetração média dos cloreto nos concretos, ao longo do tempo de ensaio.
Fonte: AUTOR (2022).

Segundo os resultados evidenciados da penetração de íons cloreto (Figura 52 e 53), o fenômeno se deu de maneira distinta nos concretos analisados, salvo algumas semelhanças. De forma final houve um aumento do ingresso desse agente agressivo a partir do concreto com seixo (REF), desenvolvendo-se de maneira crescente aos concretos com agregados sintéticos AGS 70, AGS 80 e AGS 90 respectivamente. Destaca-se que o concreto com o AGS 70 e AGS 80 obtiveram resultados muito próximos, tanto aos 28 dias quanto na idade final do ensaio ao 60º dia.

Analizando de forma individual, o concreto com AGS 90 mostrou-se mais suscetível à penetração de cloretos com uma diferença aproximada de +36%; +28%; +25% dos demais (REF, AGS 70 e AGS 80, respectivamente). A Figura 54 mostra de maneira real uma parcela do desenvolvimento do fenômeno durante o período de ensaio.

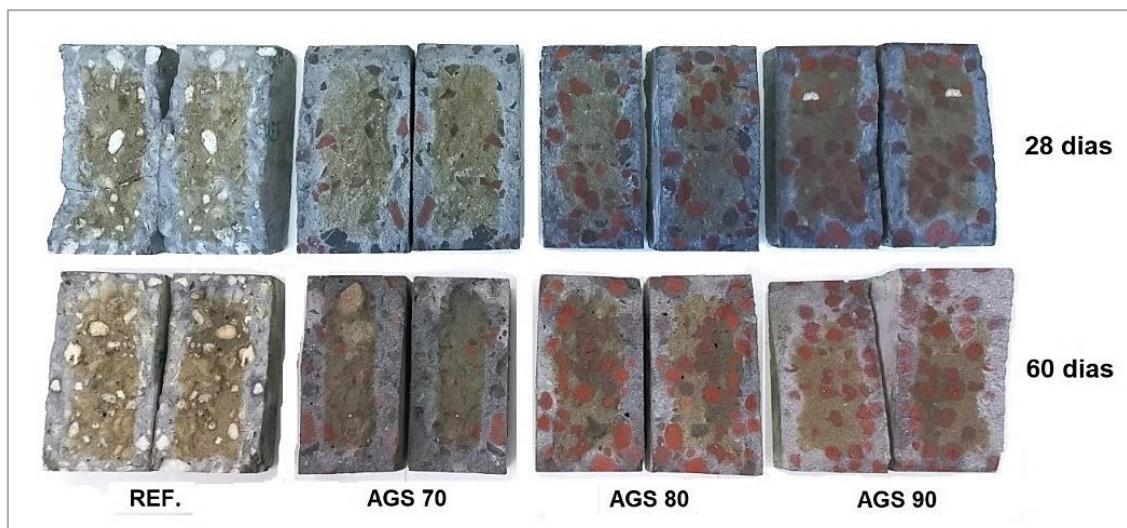


Figura 54 - Visualização da penetração dos cloretos nas faces dos prismas, rompidos aos 28 e 60 dias.
Fonte: AUTOR (2022).

Nota-se que apesar das ligeiras semelhanças entre as extensões das áreas “esbranquiçadas”, contaminadas por cloretos, logo após às medições finais ficaram evidentes as diferenças de penetração dos cloretos junto ao comportamento da durabilidade para cada concreto, quando exposto a esse agente agressivo.

Segundo ao evidenciado na Figura 55, houve uma possível correlação entre a capacidade dos concretos resistirem ao ingresso de cloretos, a resistência à compressão axial ($F_{ck,28}$) e a absorção de água do respectivo agregado graúdo utilizado.

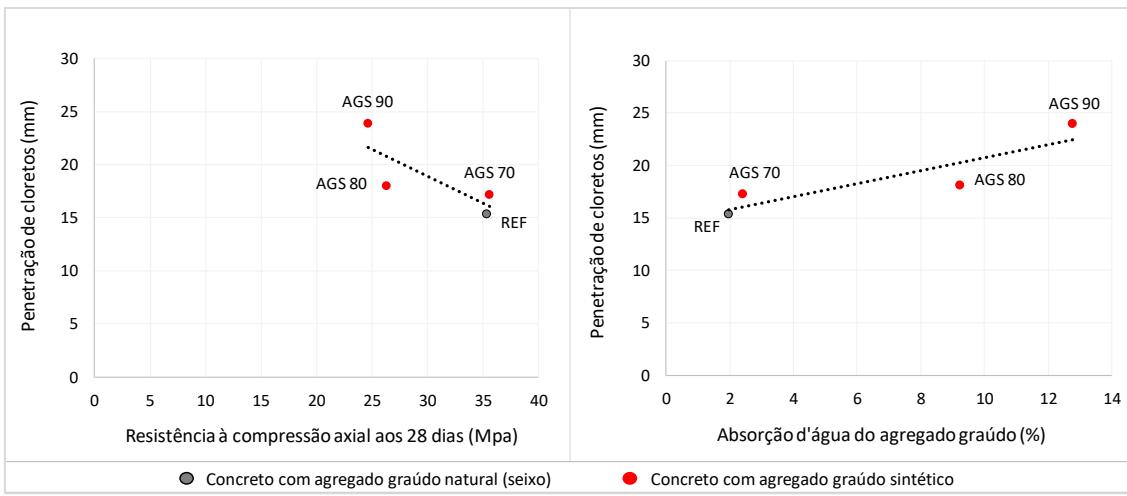


Figura 55 - Correlação individual da penetração final de cloreto com a resistência à compressão axial do concreto ($F_{ck,28}$) e absorção de água dos agregados graúdos. Tendência linear.

Fonte: AUTOR (2022).

Segundo Alencar *et al.* (2016), apesar da resistência à compressão não ser uma característica diretamente ligada à penetração de cloreto no concreto, a mesma pode ser utilizada como indicativo da facilidade ao ataque por esses íons, devido a densificação da matriz cimentícia. Conforme os critérios da ABNT NBR 6118 (2014) em relação a durabilidade, há resistências mínimas exigidas de acordo com a classe de agressividade ambiental e tipo de estrutura; sendo que para um concreto exposto à um ambiente rural ou urbano de agressividade baixa, a norma recomenda uma relação a/c $\leq 0,65$.

Ainda atentando-se na Figura 55 também se percebe que a penetração de cloreto nos concretos manteve características semelhantes à variação da absorção dos agregados graúdos, onde os mesmos apresentaram aumento a partir de REF seguido do AGS 70, AGS 80 e AGS 90 respectivamente. Segundo Troian (2010) a porosidade do agregado, e como consequência a sua absorção, influencia também na absorção do concreto afetando assim a demanda de água para adquirir determinada trabalhabilidade. E como já se sabe, a proporção de água no concreto é um dos fatores de extrema importância, que ditam sua permeabilidade aos agentes agressivos (HELENE, 1993; CASCUDO, 1997; NEPOMUCENO, 2005; MEHTA & MONTEIRO, 2008). Uma vez que houve constância na relação a/c (0,65) dos concretos com agregados sintéticos, a absorção dos agregados graúdos, como visto, pareceu ser mais influente nos resultados, junto também ao teor de argamassa.

De modo semelhante, também é possível correlacionar a facilidade do ingresso dos íons cloreto com a absorção de água apresentada pelos concretos e os agregados graúdos utilizados, junto à massa específica do último (Figura 56).

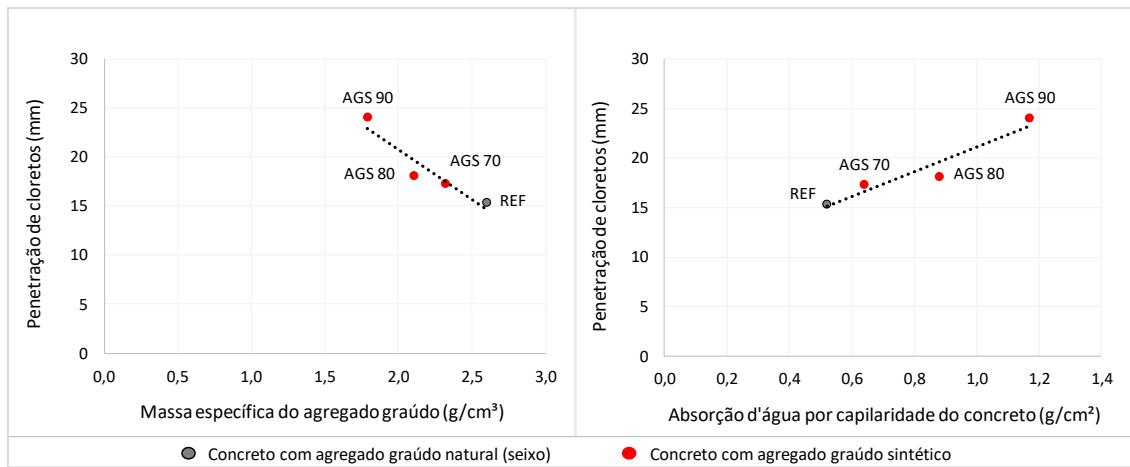


Figura 56 – Correlação individual da penetração final de cloreto com a massa específica dos agregados graúdos e absorção de água capilar do concreto. Tendência linear.

Fonte: AUTOR (2022).

Ribeiro *et al.* (2021) afirma que a inserção de agregados graúdos na pasta de cimento contribui para o aumento da permeabilidade do concreto, devido a presença das zonas de transição e às microfissuras. O mesmo também afirma que permeabilidade do concreto de cobrimento para misturas preparadas com agregados mais densos (baixa absorção) é fortemente determinada pela permeabilidade da pasta, que por sua vez depende da relação a/c e tempo de cura do mesmo. Conforme os dados já apresentados na Figura 56, também pode-se ver que esse comportamento acaba se tornando também dependente da massa específica e absorção do agregado graúdo sintético.

Souza (2022) demonstra que a massa específica do agregado tem ligação direta com a porosidade do mesmo e do concreto no qual é inserido, uma vez que o tanto o índice de vazios quanto a absorção de água para concretos produzidos com agregados sintéticos mostram valores superiores quando comparados aos com agregados naturais em seu estudo. Como a absorção capilar é um fator de grande influência no ingresso de cloreto como já visto, logo a massa específica do agregado também irá ter influência na durabilidade.

Tendo em vista os resultados de penetração de cloreto percebe-se uma certa tendência linear dos mesmos, e ao contrário da carbonatação, os fatores como coeficiente de uniformidade dos agregados e/ou o adensamento dos concretos não interferiu neste comportamento, que já era esperado por conta das diferentes absorções de água dos agregados graúdos e teores de argamassa dos traços.

Segundo os resultados expostos e a classificação proposta por Júnior (2019), os concretos produzidos com agregados graúdos (sintéticos e natural) foram classificados

quanto a suas respectivas resistências ao ingresso de cloretos, conforme evidencia a Tabela 21.

Tabela 21 - Classificação dos concretos produzidos quanto a resistência ao ingresso de íons cloreto, com base na profundidade média de penetração.

Identificação (concreto)	Penetração média (mm)	Coeficiente de variação (%)	Resistência à penetração de cloretos
REF (seixo)	15,36	17,37	Alta
AGS 70	17,25	15,93	Moderada
AGS 80	18,07	18,60	Moderada
AGS 90	23,96	41,16	Baixa

Fonte: AUTOR (2022).

De uma forma geral, apesar da diferença no teor de argamassas dos concretos, a penetração de cloretos seguiu um comportamento semelhante à absorção individual dos agregados. Dessa forma, percebe-se que em relação a este fenômeno no concreto, a porosidade dos agregados parece ter sido mais influente que os demais fatores evidenciados.

5. CONCLUSÕES

Mediante as análises dos resultados de durabilidade se pode concluir que os agregados sintéticos de RB (AGS 70 e AGS 80) atenderam às especificações normativas e mostraram-se duráveis para concretos de fins estruturais. Além disso também se conclui que:

- a) Agregados graúdos sintéticos
 - Os agregados graúdos sintéticos (otimizados), primeiramente em relação ao potencial reativo, mostraram-se inóculos não favorecendo a RAA e dessa forma atendendo aos critérios normativos quanto à reatividade;
 - As características intrínsecas apresentaram bons resultados quando se contrasta as mesmas com as especificações normativas vigentes para uso no concreto estrutural, com exceção dos critérios relacionados à absorção de água do agregado para a amostra AGS 90.

b) Concretos

- O comportamento reológico dos concretos apresentou-se de forma distinta entre si, necessitando de ajustes no teor de argamassa para adquirirem uma trabalhabilidade, coesão e consistência normativa condizentes ao seu eventual propósito (vigas, pilares, lajes). Fato este decorrente da diferença na absorção de água dos agregados sintéticos utilizados;
- A resistência mecânica dos concretos apresentou valores que atendem ao requisito da NBR 6118 (2014) com relação à compressão axial aos 28 dias (≥ 20 MPa), dessa forma os classificando como estruturais. A resistência à tração e módulo de elasticidade apresentaram pouca variabilidade dentre os resultados.
- Com relação à carbonatação o concreto com AGS 80 apresentou a melhor resistência ao fenômeno, sendo classificado como excepcional segundo Ribeiro *et al.* (2021) e a ISO 1920-12 (ISO, 2015). Dessa forma o mesmo configura-se como um concreto bastante durável à carbonatação, tão quanto ao concreto convencional com agregado graúdo natural (seixo).
- A resistência à penetração de cloretos, dos concretos com agregados sintéticos, mostrou resultados semelhantes para os que utilizavam o AGS 70 e AGS 80 sendo os mesmos classificados como medianamente resistentes ao fenômeno segundo a metodologia de Júnior (2019). Baseado nisso assume-se que os concretos com tais agregados possuem uma durabilidade adequada ao ataque por cloretos.
- A durabilidade conjunta, quanto à carbonatação e penetração de cloretos, mostrou resistência distinta para um mesmo tipo de concreto (ex.: c/ AGS 70 e c/ AGS 80). Contudo, ambos de uma forma geral mostraram boa durabilidade com base em seus respectivos melhores resultados e classificações.

Em resumo, o agregado graúdo sintético por desempenhar influência semelhante ao que um agregado natural contribui à durabilidade do concreto estrutural, logo torna-se uma potencial proposta de produto alternativo para a indústria civil advindo da indústria mineradora para mútuo benefício.

É importante destacar que as conclusões expostas se referem aos parâmetros específicos utilizados e as particularidades, no programa experimental, da presente dissertação. Dessa forma, os mesmos não devem ser considerados de maneira absoluta, uma vez que há a necessidade de realização de mais pesquisas de mesmo âmbito para complementação do assunto e maior representatividade dos resultados.

6. SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS

Durante o estudo realizado, foram identificados aspectos relevantes para contribuição com o assunto abordado, nos quais viu-se a possibilidade e necessidade de aprofundamento dos mesmos para uma maior elucidação sobre o tema desta dissertação de mestrado. Com base neste fato, algumas sugestões para desenvolvimento de futuras pesquisas estão evidenciadas a seguir:

- a) Utilização de outras metodologias para a análise de carbonatação acelerada e penetração de íons cloreto em concretos, produzidos com agregados graúdos sintéticos de RB, junto a um estudo estatístico dos mesmos;
- b) Realização de estudos sobre durabilidade de estruturas de concreto armado com agregados graúdos sintéticos de RB, por meio de ensaios de longa duração em ambientes naturais de exposição;
- c) Análise de viabilidade econômica junto à logística, para produção industrial do agregado graúdo sintético de RB.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16917 (2021): **Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.**
- _____. NBR 9779 (2013): **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade.**
- _____. NBR 11579 (2012): **Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200).**
- _____. NBR 15577 (2018): **Agregados - Reatividade álcali-agregado - Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto.**
- _____. NBR 16605 (2017): **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.**
- _____. NBR 16607 (2018): **Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega.**
- _____. NBR 16916 (2021): **Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água.**
- _____. NBR 16917 (2021): **Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água.**
- _____. NBR 16972 (2021): **Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios.**
- _____. NBR 16974 (2021): **Agregado graúdo - Ensaio de abrasão Los Angeles.**
- _____. NBR 5738 (2015): **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.**
- _____. NBR 5739 (2018): **Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.**
- _____. NBR 6118 (2014): **Projeto de estruturas de concreto — Procedimento.**
- _____. NBR 7211 (2022): **Agregados para concreto – Requisitos.**
- _____. NBR 7212 (2021): **Concreto dosado em central - Preparo, fornecimento e controle.**
- _____. NBR 7222 (2011): **Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.**
- _____. NBR 7809 (2019): **Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio.**
- _____. NBR 8522 (2021): **Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 1: Módulos estáticos à compressão.**
- _____. NBR 9779 (2012): **Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade.**
- _____. NBR 5738 (2015): **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.**
- _____. NBR 10004 (2004): **Resíduos sólidos – Classificação.**
- _____. NBR 10005 (2004): **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido.**
- _____. NBR 10006 (2004): **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.**

_____. NBR 14656 (2001): **Cimento Portland e matérias-primas - Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio.**

_____. NBR NM 248 (2003): **Agregados - Determinação da composição granulométrica.**

_____. NBR NM 67 (2012): **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.**

AASHTO T259: **Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration.** Washington, 2017.

AASHTO T260: Standard Method of Test for Sampling and Testing for Chloride Ion in Concrete and Concrete Raw Materials. Washington, 2009.

ASTM C 1202 (2021): **Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.**

Agência Nacional de Mineração - **AMN. Anuário Mineral Brasileiro: Principais substâncias metálicas**, v. 1. Brasília - DF, 2020.

Agência Nacional de Mineração - ANM. **Sumário Mineral**, v. 37. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario_mineral/sumariomineral_2017. Brasília - DF, 2017.

AHMAD, A.; KUMAR, A. **Chloride ion migration/diffusion through concrete and test methods.** International Journal of Advanced Scientific and Technical Research, v. 6, p. 151-180, 2013.

AIRES, M. F & PAIVA E. M. - **Incorporação de resíduos de lama vermelha em argilas para a produção de agregados.** 57º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão. São Luís – MA, 2013.

AIRES, M. F. M. & PAIVA A. E. M. - **Utilização de agregados graúdos sintéticos de lama vermelha e argila em concretos.** 58º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Bento Gonsalves - RS, 2014.

ALCOA. Site institucional. Disponível em www.alcoa.com.br (acesso: 05/08/2021).

ALENCAR, R. T. RODRIGUES, R. L. OLIVEIRA, K.M.D. VASCONCELOS, N. R. DIÓGENES, A. G. **Análise comparativa entre ensaios da penetração de água e da resistência do concreto.** In: Congresso Brasileiro de Patologia das Construções – CBPAT, 2, Belém do Pará - PA. Anais, 2016.

ALVES, T. L. **Estudo da formação de incrustações inorgânicas em membranas de nanofiltração utilizadas em processos de dessulfatação.** Tese (Doutorado) – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2006.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. Designation: American Concrete Institute. **Guide to Durable Concrete: reported by ACI Committee 201.** ACI Materials Journal, v. 88, n. 5, p. 544-82, 1991.

ANDRADE, C. **Calculation of diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements.** Cement and Concrete Research, v.23, n. 3, p. 724-742, 1993.

ANDRADE, C. “**Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**”. São Paulo - SP, 1992.

ANDRADE, C.; ALONSO, C. **On-site measurements of corrosion rate of reinforcements.** Construction and Building Materials, v. 15, p. 141-145, 2001.

ANDRADE, C. CASTELLOTE, M.; ALONSO, C.; GONZÁLEZ, C. **Non-steady-state chloride diffusion coefficients obtained from migration and natural diffusion tests – Part I: Comparison between several methods of calculation.** Materials and Structures, v. 33, p. 21-28, 2000.

ANDRADE, J. J. O. **Contribuição à Previsão da Vida Útil das Estruturas de Concreto Armado Atacadas pela Corrosão das Armaduras: Iniciação por Cloretos.** Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal, Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

ANDRIOLI, F. R. **Agregado Deletério - Possibilidade(S) Segura(S) de Uso.** In: II Simpósio sobre reação álcali-agregado em estruturas de concreto. 2006, Rio de Janeiro. Anais. São Paulo - SP: IBRACON, 2006.

ANGST, U. M. et al., "Chloride Induced Reinforcement Corrosion: electrochemical monitoring of initiation stage and chloride threshold values". Corrosion Science, v. 53, n. 4, p. 1451-1464, 2011.

ANTUNES, M. L. P.; CONCEIÇÃO, F. T.; NAVARRO, G. R. B. **Caracterização da Lama Vermelha Brasileira (Resíduo do Refino da Bauxita) e Avaliação de suas Propriedades para Futuras Aplicações.** In: 3rd International Workshop - Advances in Cleaner Production. São Paulo, 2011.

AQUINO, Thiago Fernandes de. **Beneficiamento químico da bauxita de Santa Catarina.** Dissertação de Mestrado (Engenharia Química). Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, SC. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO - ABAL. **Alumínio Brasileiro: Soluções para uma vida sustentável.** Publicação. São Paulo - SP, 2017.

AZEVEDO, T.F. **Caracterização de rejeitos de bauxita (Porto Trombetas, Pará) para produção de cimento ambientalmente sustentável e de baixo custo.** VI Jornada Acadêmica da Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém - PA, 2017.

AÏTCIN, P.C. **The durability characteristics of High-Performance Concrete: a review.** Cement & Concrete Composites, Elsevier Science, v.25, p.409-420, 2003.

BABISK, Michelle Pereira. **Incorporação de lama vermelha em cerâmica vermelha.** Dissertação de mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes-RJ, 2015.

BAKKER, R.F.M. "Initiation period"; SCHIESSL, P. (Ed.) **Corrosion of Steel in Concrete: report of technical committee 60CSC RILEM**, London, 1988.

BALBO, F.A.N., et al. "An application to the diffusion equation in a model for the damage in concrete due to alkali-silica reaction". Applied Mathematical Sciences (Ruse), 2015.

BARIN, D. S. **Carbonatação e absorção capilar em concretos de cimento Portland branco com altos teores de adição de escoria de alto forno e ativador químico.** – Dissertação de Mestrado – Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

BASHEER, L.; KROOP, J.; CLELAND, D. J. **Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review.** Construction and Building Materials, 2001.

BEHERA, M., SK BHATTACHARYYA, AK MINOCHA, R. DEOLIYA, S. MAITI. **Agregado reciclado de resíduos da C&D e seu uso em concreto - um avanço para a sustentabilidade no setor de construção: uma revisão.** Constr. Construir. Mater. 68 (2014) 501–516.

BERTOLINI, Luca, et al. "Corrosion of Steel in Concrete". Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co HGaA, 2004.

BICZÓK, I. **Corrosión y Protección del Hormigón.** 6. ed. Bilbao: Urmo, 1972.

BITENCOURT, C. S. - **A geopolimerização como técnica para a aplicação do resíduo de bauxita.** Cerâmica 58, 2012.

BRANCA, C.; FRATESI, R.; MORICONI, G.; SIMONCINI, S.; “**Influence of fly ash on concrete carbonation and rebar corrosion**”. Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, ACI, Istanbul, 1993.

BRANDÃO, R. M. L. **Levantamento das manifestações patológicas nas edificações, com até cinco anos de idade, executadas no estado de Goiás**. Goiás, 2007. 224 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, 2007.

CAFANGE, Daniele M. P. J. **Estudo de métodos e medidas auxiliares para controle da resistência à carbonatação de concretos estruturais de cimento Portland**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo - SP, 2011.

CALAZANS, R. **Carbonatação do Concreto**. Disponível em: <https://www.docsity.com/pt/carbonatacao-do-concreto/4758834/> (acesso: 30/12/2019).

CBIC - Câmara Brasileira da Indústria da Construção (2020). <https://blueprint.apto.vc/entendendo-a-participacao-da-construcao-civil-no-pib-brasileiro-ao-longo-dos-anos> (acesso: 05/01/2021).

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. Goiânia, Editora UFG/ São Paulo - SP, 1997.

CASTALDI, P., MIIVETTI, M., MANTONA, M., MNZO, M., MELIS, M. XRD, FTIR. **Thermal analysis of bauxite ore-processing waste (red mud) exchanged with heavy metal**. Clays and Clay Minerals, v. 56, n. 4, p. 461-469. 2008.

CASTRO, A. L. de; PANDOLFELLI, V. C. **Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil**. Cerâmica, v. 55, n. 333, p. 18-32, 2009.

CASTRO, R.J.S., SOARES, R.A.L., NASCIMENTO, R.M. “**Produção de revestimento cerâmico semi-poroso com adição de chamote de telhas**”. Revista Matéria, v. 17, n. 4, pp. 1166 –1175, 2012.

CBA - Companhia Brasileira do Alumínio. Disponível em: <http://www.cia-brasileira-aluminio.com.br/pt/default.php?acao=nao>. (acesso: 05/10/2020).

CHANDRA, S. **Waste materials used in concrete manufacturing** (2013). Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=b63emZxZJ9EC&hl=pt-BR> (acesso em: 10/10/2019).

CHI, J. M.; HUANG, R. YANG, C. C. “**Effects of carbonation on mechanical properties and durability of concrete using accelerated testing method**”. Journal of Marine Science and Technology, Vol. 10, No. 1, 2002.

CICINELLI, G. C. **Álcali agregado: reação perigosa**. Disponível em: <http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/125/artigo59011-5.asp> (acesso em: 28/12/2022).

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON and FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAINTE – CEB-FIP. **Lightweight aggregate concrete – Manual of design and technology**. The Construction Press, 169p. 1977.

Conselho Brasileiro de Construção Sustentável - CBCS. Disponível em: http://www.cbcs.org.br/_5dotSystem/userFiles/posicionamentos/CBCS_CTMateriais_Posicionamento_Materiais%20componentes.pdf (acesso: 02/03/2022).

CONSTANTINO, V. R. L.; ARAKI, K.; SILVA, D. O.; OLIVEIRA, W. **Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático**. Quim. Nova, v.25, n.3, p490-498, 2002.

COSTA, A. "Anomalias e Mecanismos de deterioração", **Módulo 2, Apontamentos da Cadeira de Reabilitação e Reforço Estrutural**. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1999.

COSTA, Diogo H. P. e. **Desempenho estrutural de blocos, primas, mini-paredes e paredes de alvenaria estrutural confeccionadas com blocos cerâmicos produzidos a partir da mistura de lama vermelha com argila**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Pará. Belém-PA, 2014.

COUTINHO, A. S.; "Fabrico e propriedades do betão". LNEC, Lisboa, 2006.

CRAUS, Camila. **Penetração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial**. Dissertação de mestrado. Universidade federal de santa maria. Santa Maria - RS, 2010.

CUI, H.; TANG, W.; LIU, W.; DONG, Z; XING, F. **Experimental study on effects of CO₂ concentrations on concrete carbonation and diffusion machanisms**. Constructions and Building Materials, v. 93, p. 522-527, 2015.

DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 4226-100: **Aggregates for Concrete and Mortar, Part 100: Recycled Aggregates**. Germany, 2002.

DIN - DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG. DIN EN 14630: **Products and systems for the protection and repair of concrete, structures – Test methods – determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method**. English version, DIN. Berlin, 2007. 10 p.

DNER-ME 399. MT - Departamento nacional de estradas de rodagem. Diretoria de desenvolvimento tecnológico – IPR. **Agregados - determinação da perda ao choque no aparelho Treton** (1999).

DO, T.; KIM, Y.; RYU, B. **International Journal of Geo-Engineering**, 6 (2015) 8.

DOLAR-MANTUANI, L. M. M. **Undulatory extinction in quartz used for identifying alkali aggregate reactivities rocks**. In: OBERHOLSTER, R. E. (Ed.). Proceedings of the 5. International Conference on Alkali Reaction in Concrete. Cape Town: [s.n.], 1981. p. 252.

DYLER, Thomas – **Durabilidade do Concreto**. Editora Ciência Moderna Ltda. Rio de Janeiro, 2015.

EPA, United States Environmental Protection Agency. Solidification/Stabilization: Resource Guide. Disponível em: <<http://www.epa.gov/tio/download/remed/solidstab.pdf>>. Acesso: 05/02/2019.

European Aluminium Association. Disponível em: <http://european-aluminium.eu/media/1329/environmental-profile-report-for-the-european-aluminium-industry.pdf>. (acesso em: 03/06/2019).

EVANS, K., NORDHEIM, E., TSESMELIS, K., "Bauxite Residue Management ". Light Metals 2012, pp63-66, TMS, Wiley, Orlando, 2012.

FAHEY, M.; NEWSON, T. A.; FUJIYASU, Y. **Engineering with tailings**. Environmental Geotechnics. Rio de Janeiro, v. 2, p. 947-973, 2002.

FERREIRA, ALINE R. L. - **Impactos ambientais e econômicos dos agregados naturais e reciclados na construção civil**. PIBIC/CETEM, 2013.

FERREIRA, P. A. **Caracterização tecnológica do rejeito da planta de beneficiamento de bauxita em Juruti-Pará**. Programa de Pós-graduação em recursos naturais da Amazônia. Santarém - PA; 2016.

FERREIRA, P. R. Rodrigues. **Modelagem probabilística para previsão do tempo de iniciação da corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado expostas em zonas de atmosfera marinha**. Tese de Doutorado. João Pessoa - Paraíba, 2022.

FERREIRA, R. B. **Influência das adições minerais nas características do concreto de cobrimento e seu efeito na corrosão de Armaduras Induzidas por Cloretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás. Goiânia-GO, 2003.

FIGUEIREDO, C. R. **Estudo da carbonatação em estruturas de concreto armado em Brasília: avaliação de pilares**. 2004, 222f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2004.

FILHO, SILVA E. B.; ALVES, M. C. M.; MOTTA, M. **Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas**. Revista Matéria, v. 12, n. 2, p. 322-338, 2007.

FOURNIER, B.; BERUBÉ, A. **Alkali-Aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications**. Paper, Ottawa, 2000.

FUSCO, P. B. **Tecnologia do concreto estrutural**, 1^a edição. Editora Pini. São Paulo-SP, 2008.

GARCÍA-LODEIRO, I.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. Cement and Concrete Research. 37, 2 (2007) 175.

GAO, H.; XIA, S.; CHEN, F.; STUEDLEIN A., W.; LI, X.; WANG, Z.; SHEN, Z.; CHEN, X. **Dynamic shear modulus and damping of cemented and uncemented lightweight expanded clay aggregate (LECA) at low strains**. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 142, p.1-11, January, 2021.

GENTIL, V. **Corrosão**. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

GJØRV, O. E. **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade**. Revisão técnica FIGUEIREDO, E. J. P. e HELENE, P. R. L. Oficina de Textos, São Paulo, 2009.

GJØRV, O. E.; “**High-strength concrete**”. Advances in Concrete Technology, Athens, 1992.

GJØRV, ODD. E. et al. “**Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade**”. Editora Oficina de Textos, São Paulo - SP (2015).

GOMES NETO, D. P. **Dosagem de microconcretos leves de alto desempenho para produção de pré-fabricados de pequena espessura: estudo de caso**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 1998.

GOMES, Márcio P.; OLLALA, Mônica B.; SOUZA, Tiago M. de.; VILLEGRAS, Tereza A.; PINZÓN, Fernando M. **Análise da eficiência energética em segmentos industriais selecionados**. Publicação v.3, 16/11/2017. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-314/topico-407/PRODUTO%203_Vpublicacao.pdf (acesso: 07/12/2021).

GORDON, J.N.; PINNOCK, W.R.; MOORE, M.M. **A preliminary investigation of strength development in Jamaican red mud Composites**. Cement and Concrete Composites, v. 18, n. 6, p. 371-379, 1996.

GOUVEIA, Rui M.; “**Avaliação de ensaios de durabilidade do betão**”. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães, 2000.

GUIMARÃES, A. T. da C. “**Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos**”. 2000. 241 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

GUO, T., Yang, H., Liu, Q., Hannian, G., Wang, N., Yu, W., & Dai, Y. (2018). **Adsorptive removal of phosphate from aqueous solutions using different types of red mud**. Water Sci. Technol. 2017, 570-577.

HABASHI, F. "A short history of hydrometallurgy". *Hydrometallurgy*, n.79, pp. 15-22, 2005.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 2005. 326 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: PINI, 1986.

HELENE, P. R. L.. "Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado". Tese (Livre docência), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. **Manual de estruturas de concreto. Reparo, reforço e proteção**. São Paulo-SP, 2003.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini; Brasília - DF: SENAI, 1993.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. Capítulo 29: Concreto de Cimento Portland, p. 905-944. IBRACON, 2010.

HILDEBRANDO, E. A. **Aplicação do Rejeito do processo bayer (lama vermelha) como matéria-prima na indústria de cerâmica estrutural**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós- Graduação em Engenharia Química – UFPA, 1998.

HIND, R. A., BHARGAVA, S. K., GROCOTT, S. C., "The surface chemistry of Bayer process solids: a review". *Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects*, n. 146, pp.359-374, 1999.

HO, D. W. S.; LEWIS, R. K. **Carbonation of concrete and its prediction**. *Cement and Concrete Research*, v. 17, n. 3, p. 489-504, 1987.

HOBBS, D.W. **Alkali-silica reaction in concrete**. London: Thomas Telford, 1988.

HOUST, Y. F. **Diffusion de gaz, carbonatation et retrait de la pâte de ciment durcie**. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, 1993.

IAI, International Aluminium Institute (2013). Disponível em: <<http://www.world-aluminium.org/>> (acesso: 15/09 2020).

Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/setor-mineral-valores-de-producao-de-exportacoes-e-de-tributos-quase-dobram-no-1o-semestre-de-2021/> (acesso: 11/12/2021).

Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON. **Concreto: Material construtivo mais consumido no mundo**. Revista Concreto & Construções, ano XXXVII, n. 53, 2009.

Instituto de Engenharia do Brasil - IEB. *Revista Engenharia*, nº. 641, ano 76; 07/2019. Disponível em: <https://www.institutodeengenharia.org.br/site/2019/09/24/edicao-641/> (acesso: 20/12/2022). São Paulo - SP, 2019.

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas**. Relatório de pesquisa, 2012.

ISAIA, G. C.. "Carbonatação do concreto - uma revisão". Departamento de Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.

ISAIA, G. **O concreto: da era clássica à contemporânea**. In: ISAIA, G. *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*, v.1. São Paulo - SP: IBRACON, 2005, p. 1-43.

ISAIAS, JR. L. F. et al. "Obtenção de agregados graúdos a partir de lama vermelha via processo de pelotização". Universidade do Extremo Sul Catarinense, Departamento de Engenharia Química. Natal, RN; 2013.

ISO 1920-12:2015. International organization for standardization. Testing of concrete - Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete - Accelerated carbonation method.

JEN, G.; STOMPINIS, N.; JONES, R. Chloride ingress in a belite-calcium sulfoaluminate cement matrix. Cement and Concrete Research, v. 98, p. 130-135, 2017.

JIANG, L.; LIN, B.; CAI, Y. A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete. Cement and Concrete Research, v. 30, p. 699-702, 2000.

JÚNIOR, Adiel J. P. da Cunha; COSTA, Dênis Carlos Lima; MACÊDO, Alcebíades Negrão. Análise sistemática da literatura sobre o uso do rejeito de lama vermelha para a produção de agregados sintéticos leves. Research, Society and Development, v. 11, n.5, 2022.

JÚNIOR, José R. H. Penetração de cloreto em concretos de diferentes resistências e teores de adição pozolânica a partir da comparação de diferentes normas. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba - SC, 2019.

JÚNIOR, Roberto S.; MORENO, Rodrigo A.; FRANCO, Thiago T.; FREITAS, Alexandre R. de; ESCOBAR, Eduardo M. Aumento da vida útil da área de disposição de resíduo de bauxita. 35º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 29º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 35º Seminário de Energia & Utilidades. São Paulo – SP, 2014.

KALSING, Felipe Schneider. Causas e efeitos da carbonatação na durabilidade do concreto armado. Monografia de especialização. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte - MG, 2020.

KANASHIRO, Mariana Kayoko - Resíduo de bauxita: mapeamento da produção científica e tecnológica de sua aplicação em materiais cimentícios. Universidade Federal de São Carlos. Programa de Pós-graduação em ciência e engenharia de Materiais. São Carlos - SP, 2018.

KAZMIERCZAK, C. S. Análise e fatores que influenciam a velocidade de carbonatação em estruturas de concreto armado. IBRACON – Reunião Anual. Controle de qualidade do concreto. Processos construtivos em obras de concreto. Brasília-DF, 1993.

KAZMIERCZAK, C. S. Contribuição para a análise da eficiência de películas aplicadas sobre estruturas de concreto armado com o objetivo de proteção contra a carbonatação. 168f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

KIHARA, Y. Reação álcali-agregado: aspectos mineralógicos. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE AGREGADOS, 1., 1986, São Paulo. Anais... São Paulo: USP/Escuela Politécnica, 1986. p. 132.

KIRKPATRICK, D.B. "Red mud product development". The Minerals, Metals & Materials Society, 1996.

KRIVENKO, P. Why Alkaline Activation – 60 Years of the Theory and Practice of Alkali Activated Materials. Journal of Ceramic Science and Technology, v. 8, 2017.

KROPP, J.; HILSDORF, H. K.; GRUBE, H.; ANDRADE, C.; NILSSON. Transport mechanisms and definitions. In: KROPP, J.; HILSDORF, H. K. Performance Criteria for Concrete Durability. Capítulo 2, p. 4-14. Londres: E & FN Spon, 1995.

KULAKOWSKI, M. P. "Contribuição ao estudo da carbonatação de concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa". Tese (Doutorado em Engenharia), Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

LAU, P. C.; TEO, D. C. L.; MANNAN, M. A. **Characteristics of lightweight aggregate produced from lime-treated sewage sludge and palm oil fuel ash**. Construction and Building Materials, 152, 558-567, (2017).

LI, L. Y. "A study of iron mineral transformation to reduce red mud tailings". Waste management, n. 21, pp. 525-534, 2001.

LI, N., HANB. R., LU. X. "Bibliometric analysis of research trends on solid waste reuse and recycling during". pp. 1992–2016, Resources, Conservation & Recycling 130, pp. 109–117, 2018.

LIMA, Mayara S. Siverio. **Avaliação do emprego de lama vermelha no desempenho à deformação permanente de misturas asfálticas a quente**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis-SC, 2015.

LOPES, A. N. M. **Avaliação comparativa de concretos com e sem sílica ativa para resistências entre 50 e 65 MPa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 1999.

LOURENÇO, R. R. **Aplicação do resíduo de bauxita como fonte de Al₂O₃ e Fe₂O₃ na preparação de clínqueres de cimentos Portland**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos - SP, 2013.

LUCENA, C. M. **Avaliação da eficiência de uma câmara de carbonatação acelerada projetada e montada em laboratório**. 155f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

MANFROI, Eliz Paula. **Avaliação da lama vermelha como material pozolânico em substituição ao cimento para produção de argamassas**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis-SC, 2009.

MARGON, P. V. **Influência do uso das cinzas de carvão mineral de termelétricas em argamassas de revestimento: dosagem por curvas granulométricas**. 4p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

McCONCHIE, D., CLARK, M., DAVIES-McCONCHIE, F. "New strategies for the management of bauxite refinery residues (red mud)". In: Proceedings of the 6th international alumina quality workshop, Brisbane, Australia, pp. 327-332, 2002.

MEDEIROS, G. **Métodos de ensaios não destrutivos para estruturas de concreto** (2019). Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/metodos-de-ensaios-nao-destrutivos-para-estruturas-de-concreto/> (acesso: 30/08/2020).

MEDEIROS, M. H. F., Real, L. V., Richter, K., Souza, W. B., Klein, N. S. **Ensaios de migração de cloreto em estado estacionário para avaliação de sistemas de proteção de superfície**. REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 8, p. 54-63, 2014.

MEDEIROS, M.H.F.; HELENE, P. **Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption**. Construction and Building Materials, v. 23, n. 3, p. 1476–1484, 2009.

MEDEIROS, MARCELO H. F. "Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloreto". Universidade de São Paulo, Escola Politécnica. São Paulo, 2008.

MEDEIROS, MARCELO H. F. "Ensaios de migração de cloreto para concreto: Influência do número de fatias extraídas". Universidade Federal de São Paulo. Revista Escola de Minas, volume 65, 2012.

MEDEIROS, Marcelo H. F. de; ANDRADE, Jairo J. de Oliveira; HELENE, Paulo. **Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto**. Instituto Brasileiro do Concreto, 2011. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc55.pdf> (acesso: 10/02/2020).

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1994, 573p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON. 674 p, 2008.

MERCURY, J. M. R. et al. “**Estudo do comportamento térmico e propriedades físico-mecânicas da lama vermelha**”. Revista Matéria, v. 15, n. 3, p. 445-460, 2010.

MILANI, C. J.; KRIPKA, M. **Subsídios para o Diagnóstico de Pontes Rodoviárias**. Engenharia (São Paulo), v. 612, p. 98-100, 2012. MILANI, C. J.; KRIPKA, M.; Chamberlain. Monitoramento de Pontes. Infraestrutura urbana, v. 16, p. 58-62, 2012.

MIZUMOTO, Camila. **Investigação da Reação Álcali-Agregado (RAA) em Testemunhos de Concreto**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira - SP, 2009.

MONTEIRO, E. C. B. **Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras sob a ação conjunta de CO₂ e íons cloretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília - DF, 1996.

MONTEIRO, Isabel F. G. “**Modelação da evolução da carbonatação em elementos de betão armado**”. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2010.

MUDGAL, M.; CHOUHAN, R.; VERMA, S.; AMRITPHALE, S.; DAS, S.; SHRIVASTVA, A. Radiochemical Acta, 106 (2018) 59.

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 (2008) 166 p.

NEPOMUCENO, A.A. **Mecanismo de Transporte de Fluidos no Concreto**. In: ISAIA, G.C. (Ed.) **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: Ibracon, cap.26, vol. 2, 2005, p. 793 - 827.

NETO, CARLOS Z. M. **Absorção capilar e resistividade elétrica de concretos compostos com cinza de casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico**. Dissertação de mestrado. Santa Maria - RS, 2011.

NEVILLE, A M. “**Propriedades do concreto**”; 2^a edição São Paulo: Pini, São Paulo - SP, 1997.

NEVILLE, A.M. “**Propriedades do concreto**”; 5^a ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NGUYEN, Q. D., BOGER, D. V. “**Application of rheology to solving tailings disposal problems**”. International journal of Mineral Processing, n. 54, pp. 217-233, 1998.

NOGUEIRA, Kelso Antunes. “**Reação álcali-agregado: diretrizes e requisitos da ABNT NBR 15577/2008**”. Monografia. Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Belo Horizonte - MG, 2010.

NORDTEST. NT BUILD 443, **Concrete, hardened: accelerated chloride penetration**. Nordtest, Espoo, 1995.

NORDTEST. NT BUILD 492, **Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady state migration experiments**. Nordtest, Espoo, 1999.

Norsk HYDRO Brasil - Relatório de sustentabilidade das operações da Hydro no Brasil. Disponível em: <https://www.hydro.com/globalassets/07-media/news/2020/relatorio-de-sustentabilidade-das-operacoes-da-hydro-no-brasil-2019.pdf> (acesso: 03/02/2020).

Norsk HYDRO Brasil (2022). Site institucional. Disponível em: <https://www.hydro.com/pt-BR/imprensa/nova-agenda/situacao-na-alunorte/linha-do-tempo-dos-principais-eventos/mapas-e-ilustracoes/> (acesso: 20/12/2022).

Norsk HYDRO Brasil (2022). Site institucional. Disponível em: <https://www.hydro.com/pt-BR/imprensa/noticias/2022/hydro-alunorte-e-mineracao-paragominas-recebem-recertificacao-asi/> (acesso: 15/12/2022).

Norsk HYDRO Brasil (2021). Site institucional. Disponível em: <https://www.hydro.com/pt-BR/sobre-a-hydro/a-hydro-no-mundo/north-america/brasil/barcarena/> (acesso: 21/11/2021).

OLIVEIRA, D. R. C.; ROSSI, C. R. C. **Concretes with red mud coarse aggregates**. Materials Research. n.3, v.15. 2012.

OLIVEIRA, Lidiane S.; ÂNGULO, Sérgio. **Entrevista - Agregados, meio ambiente e o desafio da economia circular (2020)**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://cics.prp.usp.br/wp-content/uploads/2020/07/entrevista-Agregado-e-Meio-Ambiente-diagramado-.pdf> (acesso: 20/12/2022).

PAN, Z., LI, D., YU, J., YANG, N. **Properties and microstructure of the hardened alkali-activated red mud-slag cementitious material**. Cement and Concrete Research, v. 33, pp. 1437–1441, 2003.

PAPADAKIS, V. G. VAYENAS, C. G., FARDIS, M. **Fundamental concrete carbonation model and application to durability of reinforced concrete**. Durability of Building Materials and Components, Brighton, 1990p.

PAPADAKIS, V. G. **Hydration and carbonation of pozzolanic cements**. ACI Materials Journal. n. 89, Mar/Apr 1992.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. **Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation**. ACI Materials Journal, n. 88, Jul. /Aug., 1991b.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. **Reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation**. AIChE Journal. v. 35, n. 10, October 1989.

PAPADAKIS, V.G. **Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and choride ingress**. Cement and concrete research, v. 30, p. 291-299, 2000.

PAPADAKIS, V.G.; VAYENAS, C.G.; FARDIS, M.N. **Fundamental concrete carbonation model and application to durability of reinforced concrete**. In: DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS. Proceedings.... p.27-38. London, 1991a.

PARK, J.; LEE, K. M.; KWON, S.O.; BAE, S.O.; JUNG, S.W.; YOO, S.W. **Diffusion Decay Coefficient for Chloride Ions of Concrete Containing Mineral Admixtures**. Advances in Materials Science and Engineering, v. 2016, s/n, p. 1-11, 2016.

PARROTT, L. J. **A review of carbonation in reinforced concrete**. Wexham Springs, Cement and Concrete Association, 1987.

PAULETTI, C. **“Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de Carbonatação”**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PAULETTI, C. Revista Concreto & Construções. **Degradação do concreto por carbonatação: execução do ensaio**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

PAULETTI, C. “**Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição**”. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PAULETTI, C.; N, E.; DAL MOLIN, D. **Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil**. Ambiente Construído, v. 7, n. 4, p.7-20. Porto Alegre - RS, 2007.

PELLIZZER, Giovanni Pais. **Análise mecânica e probabilística da corrosão de armaduras de estruturas de concreto armado submetidas à penetração de cloretos**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Carlos – SP, 2015.

PERIM, J. R. **Influência do metacaulim na durabilidade de concretos usuais de mercado sujeitos à carbonatação acelerada**. Dissertação (Mestrado Geotecnia, Estruturas e Construção Civil). Universidade de Goiás, Goiânia-GO, 2006.

PETER, M. A. et al. “**Competition of several carbonation reactions in concrete: a parametric study**”. Cement and Concrete Research, v. 38, n. 12, p. 1385-1393, 2008.

POLITO, G. **Principais sistemas de pinturas e suas patologias**. Dissertação de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais-MG, 2006.

POSSAN, E. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado**. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre - RS, 2004.

POSSAN, Edna. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS, 2010.

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

POWER, G.; GRÄFE, M.; KLAUBER, C. **Review of current bauxite residue management, disposal and storage: Practices**. Engineering & Science. The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO). CSIRO document DMR-3608. Austrália, p. 44. 2009.

POWER, Greg; Joanne S.C. Loh, Johannes E. Wajon, Francesco Busetti, Cynthia Joll. **A review of the determination of organic compounds in Bayer process liquors**. Analytica Chimica Acta, Volume 689, Issue 1, 2011.

PRADO, C. M. R., ALVES, M. I. R., LELES, M. I. G., OTTO, C. R. N., DAMASCENO, F. C., BRAIT, C. H. H., FRANCO, P. I. B. M., ANTONIOSI, N. R. **Estudo da ativação ácida e tratamento térmico de bauxita extraída de jazidas em Minas Gerais, Brasil**. Cerâmica 58, 2012.

QUARESMA, Luiz F. **Projeto de Assistência ao Setor de Energia: Cadeia do Alumínio**. Disponível em: http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256652/P37_RT62_Perfil_do_Alumxnio.pdf/0714cb96-3c40-413c-8091-817ce96aa7c7 (Acesso em 02/08/2020).

RAISDORFER, J.W. “**Influência da adição ou substituição de adições minerais ao cimento portland: Efeito na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos**”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2015.

RASHAD, A.M. **Lightweight expanded clay aggregate as a building material – An overview**. Construction and Building Materials, 170, p. 757–775, March, 2018.

REESE, K. M., CUNDIFF, W. H. "In Aluminum production the first stage is Alumina". Industrial and Engineering Chemistry. v. 47. n. 9, pp. 1672-1680, 1955.

REIS, André W. C. **Caracterização mineralógica do agregado obtido a partir da lama vermelha do processo Bayer**. Programa de Pós-graduação em engenharia química. Belém-PA, 2014.

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

RIBEIRO D. V. et al. "Análise da difusão de cloretos no concreto contendo lama vermelha". Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, Volume 5, abril de 2012.

RIBEIRO D. V. et al. - XXIV ENTMME. **Expansibilidade de argamassas de cimento Portland como consequência das reações alcalis-sílica (ras) associadas ao uso da lama vermelha**. Departamento de Ciência e Tecnologia de Materiais. Universidade Federal da Bahia, 2011.

RIBEIRO D. V. et. al. "Efeito da adição da lama vermelha na corrosibilidade do concreto armado avaliado por meio de técnicas eletroquímicas". Departamento de Ciência e Tecnologia de Materiais. Universidade Federal da Bahia, 2011.

RIBEIRO, D.V. et al. "Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise". Rio de Janeiro-RJ, 2014.

RIBEIRO, D.V.; LABRINCHA, J.A.; MORELLI, M.R. "Use of Red Mud as Addition for Portland Cement Mortars". Journal of Materials Science and Engineering, v. 4, n. 8, p. 1-9, 2010.

RIBEIRO, V. D.; DIAS, Cléber M. R.; CASCUDO, Oswaldo; CAPUZZO, Valdirene M. Silva. **Procedimentos de ensaio de carbonatação acelerada (corpos de prova) e natural (testemunhos) do concreto**. CT IBRACON / ALCONPAT 702. Ed. IBRACON, 1ª edição, São Paulo-SP, 2021.

RIBEIRO, V. D.; DIAS, Cléber M. R.; MAGALHÃES, Fábio C.; MEIRA, Gibson R.; FERREIRA, Pablo R.R; PINTO, Silas de Andrade. **Guia para determinação do perfil de concentração e profundidade de penetração de cloretos**. CT IBRACON / ALCONPAT 702. Ed. IBRACON, 1ª edição, São Paulo-SP, 2021.

RIBEIRO, Marcella C. Dias. **Agregado sintético de resíduo de bauxita para produção de concreto**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Pará. Programa de Pós-graduação em engenharia civil. Belém-PA, 2022.

ROCES-ALONSO, E.A.; GONZÁLEZ-GALINDO, J. "Experimental study on grain failure of lightweight expanded clay aggregate under uniaxial and biaxial load conditions". Powder Technology, 383, p. 542–553, January, 2021.

ROMANO, R. C. O. et al. "Acompanhamento da hidratação de cimento Portland simples com resíduo de bauxita". Cerâmica 62, 2016.

ROSÁRIO, Kátia Alrelhia. **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. Programa de Pós-graduação em engenharia civil. Belém, PA, 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-PA, 2009.

ROSSI, C.R.C. RAMOS, M.A. OLIVEIRA, D.R.C. **Agregados de lama vermelha para concretos**. Documento on-line. Disponível em www.cultura.ufpa.br/petcivil/pesquisas/TRABALHO_04.pdf (acesso 11/08/2021).

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para Pré: Fabricados Eobelos: dosagem, produção, propriedades e microestrutura.** Tese. (Doutorado em Interunidade: Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve estrutural: Produção, propriedades, microestrutura e aplicações.** 1ª ed., São Paulo, ed. PINI, 2009a.

SAETTA, A.V.; VITALIANI, R. V. **Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures. Part I: Theoretical formulation.** Cement and Concrete Research, v. 34, p.571-579, 2004.

SAFIUDDIN, Md.; WEST, J. S.; SOUDKI, K. A. "Hardened properties of selfconsolidating high performance concrete including rice husk ash". Cement & Concrete Composites, v. 32, p. 708-17, 2010.

SALDANHA, F. J. M. **Desenvolvimento de um dispositivo de ensaio de carbonatação acelerada com controlo de humidade relativa.** 91f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2013.

SAMPAIO, João A. e NEVES, Carlos H. B. **Bauxita – M S. L. Minerais S.A. in Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil.** Rio de Janeiro: CETEM, 2002. p 307-314.

SAMPAIO, João Alves; ANDRADE, Mônica Calixto; DUTRA, Achilles J. B. **Rochas e Minerais Industriais.** Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, cap. 14. Rio de Janeiro-RJ, 2008.

SANCHEZ, L. F. M. **Contribuição ao estudo dos métodos de ensaio na avaliação das reações álcali-agregado em concretos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. 2008. 168p.

SANTOS, B. S; ALBUQUERQUE, D. D. M.; RIBEIRO, D. V. "Efeito da adição de metacaulim na carbonatação de concretos de cimento Portland". Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 13, p.10-18, 2020.

SANTOS, D. H. **Utilização do rejeito do processo Bayer como matéria prima na produção de agregados leves.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará, Belém-PA, 2011.

SANTOS, J. E. A. et al. "Obtenção de agregado sintético por meio de sinterização em reator de leito fixo". XII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. Universidade Federal de São Carlos. São Paulo, 2017.

SANTOS, M. E. et al. "Argila expandida como agregado para concreto leve". In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON. 1986. São Paulo. Reunião...São Paulo, 1986.

SICHIERI P. E.; PABLOS, J. M.; FERREIRA, O. P.; ROSSIGNOLO, J. A.; CARA, R. **Materiais de construção 1.** Ed. USP, S. Carlos (2008) p. 271.

SILVA, A. P.; SEGADÃES, A. M.; DEVEZAS, T. C. "Relações entre distribuição granulométrica, morfologia e empacotamento de partículas num sistema real: alta-alumina". In: Proceedings of. 2003. p. 150-161.

SILVA, Danillo de A. e; GEYER, André Luiz Bortolacci; PANTOJA, João da Costa. **Porosidade do concreto versus forma do agregado graúdo.** Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 8. Curitiba-PR, 2020.

SILVA, Matheus de S. et al. "Avanço da carbonatação em concretos para idades iniciais. II Simpósio Brasileiro sobre reabilitação das construções". Fortaleza, Ceará; 2019.

SILVA, S. J. H. **Análise de estruturas de concreto armado sujeitas à corrosão de armadura por cloreto através do método dos elementos finitos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia), 171f, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SILVA, Sueli A. da. **Critérios de projeto de sistemas de disposição em pilhas de resíduos de alumina desaguados por filtro prensa**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais-MG, 2016.

SILVA, G.A.O.; AMORIN JÚNIOR, N. S.; RIBEIRO, D. V. “**Avaliação da profundidade de carbonatação em concretos contendo agregado reciclado.**” In: XIII Congresso Internacional sobre Patologias e Reabilitação de Estruturas – CINPAR. Crato - CE, 2017.

SILVESTRO, Laura; ROMANO, Fátima S.; MOLIN, Denise C. C. **Penetração de cloretos em concretos expostos em zona de atmosfera marinha por um período de 9 anos**. Revista Ambiente Construído, v.21, n.1. Porto Alegre-RS, 2020.

SINGH, M, UPADHAYAY, S. N., PRASAD, P. M. **Preparation of iron rich cements using red mud**. Cement and Concrete Research, v. 27, n 7, pp.1037-1046, 1997.

SINGH, M.; UPADHAYAY, S.N.; PRASAD, P.M. **Preparation of special cements from red mud**. Waste Management, v. 16, n. 8, p. 665-670, 1996.

SLAVO, V. M., MAURINA, S., CAMPOSTRINI, R., MONAGHEDDU, M., BUDRONI, G., CARTURAN, G. COCCO, G. “**Bautite “red mud” in the ceramic industry. Part 1: thermal behavior**”. Journal of the European Ceramic Society, n. 20, pp. 325-244, 2000a.

SLAVO, V. M., MAURINA, S., CONCI, A., SALVIATI, A., CARTURAN, G. COCCO, G. “**Bautite “red mud” in the ceramic industry. Part 2: production of clay-based ceramics**”. Journal of the European Ceramic Society, 20, pp. 245-252, 2000b.

SMITH, J. N.; BUCHANAN, V. E.; OLIVER, G. **The potential application of red mud in the production of castings**. Materials Science and Engineering A 420 250–253, 2006.

SMOLCZYK, H. G. **Physical and chemical phenomena of carbonation**. RILEM COLLOQUIUM ON CARBONATION OF CONCRETE. Anais..., Paper 1.1. p.10p. Athènes: [s. ed.], 1976.

SNARS, K.; GILKES, R. J. **Evaluation of bauxite residues (red muds) of different origins for environmental applications**. Applied clay sciente, v. 46, pp. 13-20, 2009.

SOUZA, J. A.; MACÊDO, E. N.; J. N. N. **Reciclagem de Resíduos da Indústria de Alumina**. In: Relatório Final, CONVÊNIO nº 867, UFPA/FADESP/ALUNORTE SUBPROJETO. Belém-PA, 2002.

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

SOUZA, José A. da Silva; RACANELLI, Lêda de Azevedo; QUARESMA, João N. Nazareno. **Estudo da Produção do Agregado Sintético Fabricado com Resíduo do Processo Bayer para indústria da construção civil - Parte I**. Revista Matéria, v. 27, n. 01 (2022).

SOUZA, José A. da Silva; MACÊDO, A. N. **Agregado sintético de resíduo de bauxita para a construção civil: produção e caracterização. Relatório Final 02 - materiais de partida: análises e caracterização**. Não publicado. Programa de pós-graduação em engenharia de processos. UFPA/PROPESP/HYDRO ALUNORTE. Belém-PA, 2021a.

SOUZA, José A. da Silva; MACÊDO, A. N. **Agregado sintético de resíduo de bauxita para a construção civil: produção e caracterização. Relatório Final 03 - Produção e Sinterização - Caracterização do agregado sintético de resíduo de Bauxita**. Não publicado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos. UFPA/PROPESP/HYDRO ALUNORTE. Belém-PA, 2021b.

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

SOUZA, V. C.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.** São Paulo: Pini, 1998. 255 p.

SUN, Y.; LI, J.; CHEN, Z.; XUE, Q.; SUN, Q.; ZHOU, Y.; CHEN, X.; LIU, L.; POON, C. S. "Production of lightweight aggregate ceramsite from red mud and municipal solid waste incineration bottom ash: Mechanism and optimization". Construction and Building Materials, Journal, 287 (2021) 122993.

TASCA, Maisson. **Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolanas: monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura.** Dissertação de mestrado. Santa Maria - RS, 2012.

TERZIAN, P.; HELENE, P.: **Manual da dosagem e controle do concreto**, Pini, São Paulo, 1992.

VILLAIN, G.; THIERY M.; PLATRET, G.: **Measurement methods of carbonation profiles in concrete: Thermogravimetry, chemical analysis and gammadesimetry.** Cement and concrete Research. v. 37, Issue 8, 2007. n. 37, p. 1182-1192, France.

THIÉRY, M. **Modélisation de la carbonatation atmosphérique des bétons – Prose en compte des effets cinétiques et de l'état hydrique.** Thèse (Doctorat). École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2005.

THOMAS, M. et al. "Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali–silica reaction in concrete". Cement and Concrete Research. Jun 2006.

THOMAS, M.; MATTHEWS, J. D. "Carbonation of Fly Ash Concrete". Magazine of Concrete Research, v.44, 1992.

THOMAS, R. J.; ARIYACHANDRA, E.; LEZAMA, D.; PEETHAMPARAN, S. **Comparison of chloride permeability methods for Alkali-Activated concrete.** Construction and Building Materials, v. 165, p. 104-111, 2018.

TIAN, K.; WANG, Y.; HONG S.; ZHANG, J.; HOU, D.; DONG, B.; XING, F. Construction and Building Materials, Journal, 281 (2021) 122552.

TIECHER, F. **Reação álcali-agregado: avaliação do comportamento de agregados do sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. 2006. 182p.

TINOCO, Carla Palomino. **Caracterização geomecânica de um rejeito de mineração de bauxita.** Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo - SP, 2017.

TROIAN, Aline. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloreto.** Dissertação de mestrado. UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS. São Leopoldo-RS, 2010.

TSAKIRIDIS, P.E.; AGATZINI-LEONARDOU, S.; OUSTADAKIS, P. "Red mud addition in the raw meal for the production of Portland cement clinker". Journal of Hazardous Material, v. 116, n. 1-2, p. 103-110, 2004.

TUAN, B. L. A.; HWANG, C. L.; LIN, K. L.; CHEN, Y. Y.; YOUNG, M. P. **Development of lightweight aggregate from sewage sludge and waste glass powder for concrete.** Construction and building materials, 47, 334-339, (2013).

TUUTTI, K. "Corrosion of steel in concrete". Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982. UNESP CIÊNCIA. Revista, ano.2, n.15 (versão digital), 2010. Disponível em: <https://issuu.com/unespciencia/docs/uc15> (acesso: 17/05/2020).

UOMOTO, T.; TAKADA, Y. **Factors affecting concrete carbonation rate**. In: Durability of building materials and components, 6th. Anais. E. & F.N. SPON. S. Nagataki, T. Nireki and F. Tomosawa, 1993.

VALDUGA, L. **Influência das condições de ensaio da ASTM C 1260 na verificação da reação álcali-agregado**. Porto Alegre, Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2007. 208p.

VALVERDE, Fernando Mendes. **Agregados para construção civil**. Balanço Mineral Brasileiro, 2001.

VICK, S. G. "Planning, Design and Analysis of Tailings Dams". United States of America, 1983.

VIEGAS, Bruno Marques *et al.* "Produção de agregados utilizando lama vermelha: o estudo da cinética de secagem". Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia. Belém-PA, 2019.

VIEGAS, Marques Bruno. **Influência da temperatura de calcinação na redução da hematita e na liberação do titânio na lama vermelha (resíduo do processo Bayer)**. Dissertação e mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Belém-PA, 2016.

VILLAR, Lúcio F. de S. **Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita**. Tese de Doutorado (Engenharia Civil). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC. Rio de Janeiro, RJ. 2002.

VILLAREJO, L. P.; IGLESIAS, F. A. C.; MARTÍNEZ, S. M.; ARTIAGA, R.; COSP, J. P. **Manufacturing new ceramic materials from clay and red mud derived from the aluminium industry**. Construction and Building Materials, p. 656–665, 2012

WERLE, Ana Paula; KAZMIERCZAK, Cláudio S.; KULAKOWSKI, Marlova Piva. **Carbonatação em concretos com agregados reciclados de concreto**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio Sinos. São Leopoldo – RS, 2011.

WORKS BUREAU TECHNICAL CIRCULAR. WBTC No.12: **Specifications facilitating the use of recycled aggregates**, Hong-Kong, 2002.

YANG, C. C.; WANG, L. C. **The diffusion characteristic of concrete with mineral admixtures between salt ponding test and accelerated chloride migration test**. Materials Chemistry and Physics, v. 85, n. 2-3, p. 266-272, 2004.

YING-YU, L.; QUI-DONG, W. **The mechanism of carbonation of mortars and the dependence of carbonation on pore structure**. In.: International conference on concrete durability, 1987, Atlanta, USA. Proceedings... Detroit: American Concrete Institute, 1987, 2v. p.1915-1943. (SP-100).

YUAN, Q.; SANTHANAM, M. **Test methods for chloride transport in concrete**. In: Performance of cement-based materials in aggressive aqueous environments, v. 10. Netherlands: SPRINGER, 2012.

ZHANG, J.Z., LIU, S.J., YAO, Z.Y., *et al.* **"Environmental aspects and pavement properties of red mud waste as the replacement of mineral filler in asphalt mixture"**. Constr. Build. Mater. 178, 288–300, 2018.

ZHANG, M.H.; GJØRV, O.E. **Microstructure of the interfacial zone between lightweight concrete and cement paste**. Cement and Concrete Research, v.20, p.610-618, 1990a.

ZHANG, N.; LIU, X.; SUN, H.; LI, L. **"Evaluation of blends bauxite-calcination-method red mud with other industrial wastes as a cementitious material: Properties and hydration characteristics"**. Journal of Hazardous Materials 185 (2011) 329–33.