



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**



**CONCRETO ESTRUTURAL DE CIMENTO PORTLAND COM AGREGADO  
GRAÚDO SINTÉTICO DE RESÍDUO DE BAUXITA: ASPECTOS DE  
DURABILIDADE ATRAVÉS DOS ENSAIOS DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO E  
PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO**

**LUID AUGUSTO LIMA SILVA**

LUID AUGUSTO LIMA SILVA

**CONCRETO ESTRUTURAL DE CIMENTO PORTLAND COM AGREGADO  
GRAÚDO SINTÉTICO DE RESÍDUO DE BAUXITA: ASPECTOS DE  
DURABILIDADE ATRAVÉS DOS ENSAIOS DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO E  
PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço

Coorientador: Dr. Robson da Silva Fernandes

LUID AUGUSTO LIMA SILVA

**CONCRETO ESTRUTURAL DE CIMENTO PORTLAND COM AGREGADO  
GRAÚDO SINTÉTICO DE RESÍDUO DE BAUXITA: ASPECTOS DE  
DURABILIDADE ATRAVÉS DOS ENSAIOS DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO E  
PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço

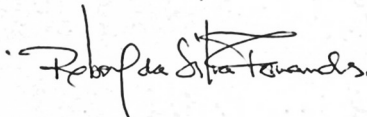
Coorientador: Prof. Dr. Robson da Silva Fernandes

Belém, 11 / 09 / 2025

**Banca examinadora:**

---

Professor Dr. Marcelo de Souza Picanço (UFPA)-  
Orientador



---

Professor: Dr. Robson da Silva Fernandes (Examinador Externo)  
Coorientador

---

Professor: Dr. Helder Mansur Chaves (UFPA)  
Examinador interno

*Aventura-se num labirinto,  
multiplica os mil perigos que a implica a vida;  
se isola e se deixa arrastar por algum Minotauro  
oculto na caverna de sua consciência.*

*(Friedrich Nietzsche)*

## RESUMO

A construção civil é um dos setores que mais consome recursos naturais e gera impactos ambientais significativos, seja pelo elevado uso de matérias-primas, seja pelas emissões de dióxido de carbono associadas à produção de cimento Portland. Em paralelo, a mineração de bauxita no Brasil, uma das maiores do mundo, gera grandes volumes de resíduos, entre eles o resíduo de bauxita (RB) oriundo do processo Bayer. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar um concreto estrutural de resistência normal (C30), no qual o agregado graúdo britado foi substituído por um agregado sintético produzido a partir do resíduo de bauxita, analisando sua durabilidade física e química, além de seu comportamento mecânico.

Foram realizados ensaios de reação álcali-agregado (RAA) acelerada, penetração acelerada de íons cloreto, esclerometria e absorção de água por capilaridade, conforme normas técnicas nacionais e internacionais. Os resultados demonstraram que o concreto com agregado graúdo sintético (CAGS) apresentou desempenho satisfatório frente à RAA, comportamento superior em termos de resistência à penetração de cloretos e manutenção da resistência mecânica, mesmo em ambientes agressivos. Ademais, a porosidade característica do agregado sintético contribuiu para melhor distribuição da umidade e redução da concentração de compostos deletérios, sem comprometer as propriedades estruturais do concreto.

Conclui-se que a substituição parcial ou total da brita convencional pelo agregado sintético de resíduo de bauxita é tecnicamente viável para concretos estruturais de resistência normal, atendendo aos requisitos normativos e proporcionando ganhos em durabilidade. Além disso, o uso desse resíduo representa uma alternativa sustentável para a construção civil, ao mesmo tempo em que agrega valor a um subproduto mineral de alta relevância ambiental.

Palavras-chave: cloreto, resíduo de bauxita, durabilidade do concreto, agregado graúdo sintético.

## **ABSTRACT**

The construction industry is one of the sectors with the highest consumption of natural resources and significant environmental impacts, both due to the intensive use of raw materials and the carbon dioxide emissions associated with Portland cement production. At the same time, bauxite mining in Brazil—one of the largest worldwide—generates large amounts of waste, including bauxite residue (RB) derived from the Bayer process. In this context, the present study aimed to develop and evaluate a normal-strength structural concrete (C30), in which natural crushed coarse aggregate was replaced by a synthetic aggregate produced from bauxite residue, assessing its physical and chemical durability as well as its mechanical performance.

Accelerated alkali-aggregate reaction (AAR) tests, chloride ion penetration tests, rebound hammer tests, and capillary water absorption tests were performed, in accordance with national and international standards. The results showed that the concrete with synthetic coarse aggregate (CAGS) presented satisfactory performance regarding AAR, superior resistance to chloride ion penetration, and maintained adequate mechanical strength even under aggressive environments. Furthermore, the porosity of the synthetic aggregate contributed to a more uniform distribution of moisture and reduced the concentration of deleterious compounds, without compromising the structural properties of the concrete.

It can be concluded that the partial or total replacement of conventional crushed stone with synthetic aggregate from bauxite residue is technically feasible for normal-strength structural concretes, meeting normative requirements and providing improvements in durability. In addition, the use of this residue represents a sustainable alternative for the construction industry, while adding value to a mineral byproduct of high environmental relevance.

Keywords: chloride, bauxite waste, concrete durability, synthetic coarse aggregate.

# 1. INTRODUÇÃO

Entre diversas maneiras do uso de materiais do meio ambiente na construção civil, vem-se tentando encontrar soluções alternativas no aproveitamento de resíduos industriais. Políticas ambientais vêm impulsionando esta ideia. A construção civil é um ramo de alta demanda de matéria prima, com isso seu impacto ambiental é significativamente alto.

Segundo IBRAM (2011), o Brasil é o 2º maior exportador importante de bauxita no mundo. Com esse movimento volumoso de minério, quantidade de rejeitos gerados nessas atividades são enormes. Tratando-se de resíduos industriais, temos como exemplo o resíduo de bauxita (RB) advindo do processo Bayer de refino desse minério. Em paralelo a isto, a indústria da construção civil é um dos maiores emissores de gases de efeito estufa (CO<sub>2</sub>), com a produção do cimento Portland, o que vem gerando significativos impactos ambientais com avanço da construção civil em relação a demanda.

Com isso, será realizado o estudo desses concretos em meios agressivos conciliando os rejeitos produzidos pelo ramo da mineração ao dióxido de carbono emitido na atmosfera (tanto pela mineração, quanto na construção civil). Além da durabilidade em meios agressivos, serão objetos de estudos as propriedades mecânicas desses concretos. Será realizado a caracterização dos materiais, formulação e moldagem dos concretos, ensaios de durabilidade de acordo com a norma NBR 15577-4:2018 (baseando-se também na NT BUILD 443: 1995) e mecânicos de acordo com a norma NBR 7584:2012. A partir desses estudos espera-se que os resultados denotem um concreto com propriedades viáveis para aplicação no uso da construção civil, com menos impacto ambiental, apresentando melhor desempenho nos aspectos citados acima. O estudo contribuirá para a valorização de resíduos mineralógicos como formas alternativas de seu aproveitamento e contribuindo com uma maneira sustentável para a construção civil.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Os concretos com agregados sintéticos com resíduos de bauxita surgem como uma alternativa sustentável tanto ambiental quanto no custo-benefício para a sua

aplicabilidade. Este estudo é de elevada importância pois, além de contribuir para o desenvolvimento e fabricação de outros materiais, utiliza resíduos disponíveis provenientes de grandes mineradoras, tais como os resíduos da bauxita. Dessa forma, têm-se o reaproveitamento de rejeitos industriais, reduzindo assim maneiras menos sustentáveis de extração de matéria prima. O projeto visa estabelecer uma comparação aos concretos clássicos, expondo dados para avaliação e aplicabilidade em diversas estruturas, com o intuito de difundir e contribuir com esta tecnologia no uso da construção civil.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Desenvolver e avaliar um concreto estrutural de cimento Portland de resistência normal de classe C30 com substituição do agregado graúdo britado por um agregado graúdo sintético produzido a partir do resíduo de bauxita, através dos aspectos de análises da durabilidade física por meio do ensaio acelerado de penetração de íons cloreto e durabilidade química por meio do ensaio acelerado de reação álcali agregado.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar qualitativamente a durabilidade química, através do ensaio de RAA pelo método acelerado de 30 dias, do concreto com agregado graúdo sintético de resíduo de bauxita, denominado CAGS em relação ao concreto com agregado graúdo britado, denominado CAGB.
- Comparar qualitativamente a durabilidade física, através da penetração de íons de cloreto pelo método acelerado até a idade de 90 dias, do concreto com agregado graúdo sintético de resíduo de bauxita, denominado CAGS em relação ao concreto com agregado graúdo britado, denominado CAGB.
- Realizar uma análise correlativa entre a resistência mecânicas, através de ensaio de esclerometria dos compósitos CAGS e CAGB submetidos a ação de íons cloreto até a idade de 90 dias.
- Verificar a contribuição da porosidade na durabilidade dos compósitos CAGS e CAGB, através dos ensaios de absorção águas por capilaridade.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 BAUXITA

A bauxita foi descoberta em 1821 por Pierre Berthier, em Les Baux, localizado no sul da França. É uma rocha que tem coloração avermelhada e abundância em alumínio, contendo mais de 40% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (alumina) em sua composição. A bauxita é a matéria prima do alumínio, e está entre os três elementos mais abundantes da crosta terrestre perdendo apenas para os elementos do oxigênio e do silício (CETEM, 2005).

Figura 1 – Minério de Bauxita em sua forma natural



Fonte: MACHADO (2022)

O nome “bauxita” foi batizado pelo químico francês Henry Saint-Claire Deville e foi atribuída ao também francês mineralogista Ours-Pierre-Armand Petit-Dufrénoy que contribuiu para o mapeamento das minas do então minério descoberto (AQUINO, 2007).

A bauxita em sua forma natural, compõe uma mistura de elementos, tais como: Gipsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$  ou hidróxido de alumínio), Diásporo ( $\text{AlO}(\text{OH})$ ) e Boemita ( $\text{AlO}(\text{OH})$ ). Esses minerais são chamados de óxi-hidróxidos de alumínio, e não fixos pois existe uma variabilidade, de porcentagem de cada elemento, em diferentes regiões onde a bauxita se encontra. As bauxitas economicamente viáveis para o processo de refinação, possuem em sua composição cerca de 50 a 55% de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e para que seu aproveitamento seja mais eficiente, esta porcentagem do mesmo elemento deve estar entre 30 e 25% (ANJOS e SILVA, 1983). O maior aproveitamento da bauxita se dá por conta da obtenção da alumina, que a partir daí é produzido o

alumínio. Com isso, temos que 90% da produção mundial tem o mesmo intuito (PRADO et al, 2012).

Segundo MACHADO (2022), o Brasil está entre as maiores reservas de bauxita de ótima qualidade do mundo, ficando atrás apenas da Austrália (2º lugar) e China (1º lugar), no ranking de 2015.

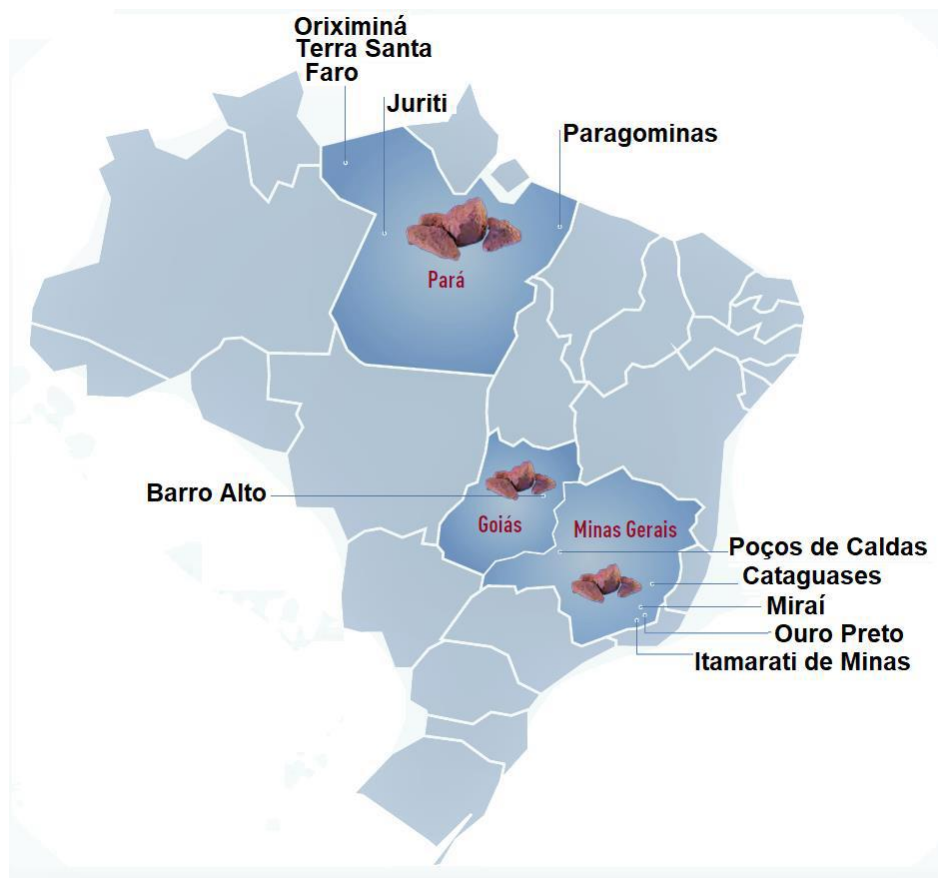
Tabela 1 – Ranking mundial das reservas e do beneficiamento de bauxita

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
	<b>Total</b>	<b>28000</b>		<b>270492</b>		<b>116700</b>		<b>57557</b>

Fontes: British Geological Survey, 2011 - 2015. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January, 2017. World Metal Statistics – March, 2017.

A mineração na região norte do Brasil, principalmente no estado do Pará, ainda é um dos principais motores do crescimento do ramo mineralógico. É nesse mesmo estado que se encontram as duas maiores jazidas de bauxita da região. Oriximiná representa o setor onde é extraído o minério in natura, voltada principalmente para o ramo da exportação, e em Serra dos Carajás representa onde se encontra uma das maiores reservas do mundo, e também a maior em qualidade (MACHADO, 2022).

Figura 2 – Localização das minas de bauxita no Brasil.



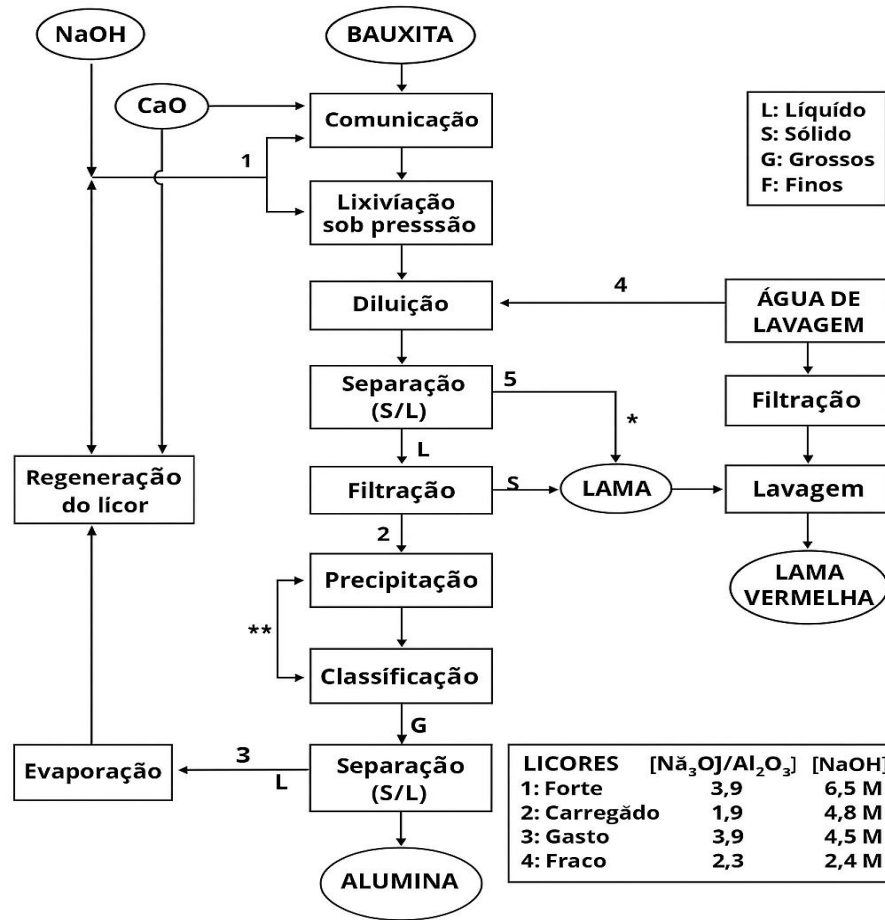
Fonte: ABAL (2017)

## 2.2 PROCESSO BAYER

O beneficiamento da bauxita é efetuado pelo método desenvolvido por Karl Josef Bayer, denominado “Processo Bayer”. O Resíduo de Bauxita (RB), também conhecido como “lama vermelha” em função de sua coloração típica avermelhada, consiste no rejeito constituído predominantemente por elementos minerais insolúveis, resultantes da etapa de digestão da bauxita em meio de hidróxido de sódio, durante a obtenção de alumina pelo processo Bayer. (HILDEBRANDO, 1998).

De acordo com IAI (2013), este processo é o mais utilizado mundialmente, por ser o mais econômico para a obtenção de alumina. O composto químico do hidrato de alumínio é bastante solúvel em soda cáustica, fato este que não ocorre com os outros óxidos presente na composição da bauxita, sendo estes também não aproveitáveis durante o processo VILLAR (2002).

Figura 3 – Etapas do processo Bayer.



Fonte: Adaptado de CETEM (2005)

De forma resumida, o beneficiamento da bauxita é composto pela digestão do minério em Na (OH), seguida pela separação do resíduo de bauxita, a cristalização do hidróxido de alumínio juntamente com a sua calcinação (SILVA FILHO *et al.*, 2007). De acordo com ABAL (2007), são necessários cerca de 5kg de minério de bauxita em sua forma natural para produzir 2kg de alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), que a partir disto serão produzidos 1kg de alumínio. Após o processo de refino deste minério, os resíduos gerados são a água de lavagem e o resíduo da bauxita, que são direcionados para armazenagem em grandes depósitos adequados em segurança e licenciados ambientalmente.

### 2.3 RESÍDUO DE BAUXITA

De acordo com HIDELEBRANDO (1998), o resíduo de bauxita (RB) também conhecido como lama vermelha é o rejeito proveniente do processo Bayer de refinamento do minério, composto por minerais insolúveis, resultantes da digestão da bauxita através de hidróxido de sódio (NaOH) para fabricação de alumina. Estima-se aproximadamente entre 30 a 40% a perda de bauxita durante o processo de refinamento em forma de rejeito (SINGH, 1996).

O maior depósito deste minério no Brasil está localizado na cidade de Barcarena. A Hydro Alunorte é a maior refinaria do mundo (ficando atrás apenas da China) e é responsável pela estocagem desses resíduos. A disposição desses rejeitos se dá pelo método de lavagem dos resíduos, filtração e armazenamento nos depósitos de forma sólida. Atualmente, a Alunorte está com 2 depósitos destes resíduos, sendo eles denominados de Depósito de Resíduos Sólidos 1 e Depósito de Resíduos Sólidos 2 (DRS 1 e DRS 2) HYDRO (2025).

Segundo MACHADO (2022), os métodos de estocagem e armazenamento dos resíduos da bauxita estão se modernizando cada vez mais, porém esses métodos ainda apresentam um alto custo e isso ligados a outros fatores, tais como a recuperação das áreas de estocagem ainda se torna um grande desafio nas indústrias.

Figura 4 – Refinaria da Alunorte na cidade de Barcarena-PA.



Fonte: Hydro (2025)

#### 2.4 AGREGADO GRAÚDO SINTÉTICO DO RESÍDUO DE BAUXITA

O processo de transformação no agregado sintético chama-se sinterização, que é o processo a nível físico e químico e de modo permanente desses rejeitos. Geralmente durante esta etapa, a porosidade do material sofre redução pelo sistema de crescimento e contorno dos agregados (REIS, 2014).

Na sinterização misturam-se as matérias prima que compõem o AGS do agregado a uma quantidade pré-definida de combustível. Esse combustível pode se carvão mineral ou vegetal, de forma finamente moído ou coque. Após isso esse material é elevado a altas temperaturas, ocasionando sua expansão devido a formação de gases (GOMES NETO, 1998).

Figura 5 – Composição do agregado graúdo sintético



Fonte: MACHADO (2022)

Segundo Souza *et al.*, (2002) a Universidade Federal do Pará (UFPA) realizou uma parceria com a Hydro Alunorte com o intuito de desenvolver estudos para a aplicabilidade do rejeito do processo Bayer na construção civil. De acordo a pesquisa dos autores, concluíram que o RB misturado à argila e sílica, em proporções definidas, apresentaram-se viáveis para o uso na produção de agregado sintético, visto que os estudos realizados com concretos produzidos a partir dessa mistura sinterizada, apresentaram bons resultados mecânicos.

Esse material também é motivo de estudo internacional, como forma também de aplicá-lo na indústria da construção civil. O presente estudo foi feito por Mudgal *et al.* (2018) o este propôs que os agregados fossem produzidos de forma a serem densos, pelletizados e calcinados a uma temperatura de 1300° Celsius utilizando o RB junta a aditivos químicos, obtendo assim agregados com alta resistência abrasiva e perda ao choque variando sua densidade entre 3,70 – 4,16 g/cm<sup>3</sup>.

## 2.5 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

A reatividade álcali-agregado (RAA) é uma reação química que ocorre dentro do concreto entre os hidróxidos do cimento e alguns tipos de minerais presentes nos agregados. Com essa reação, são formados produtos que na presença de água no

concreto, é capaz de expandi-lo, ocasionando fissuras de dentro para fora podendo comprometer a estrutura ao longo do tempo (NOGUEIRA, 2010).

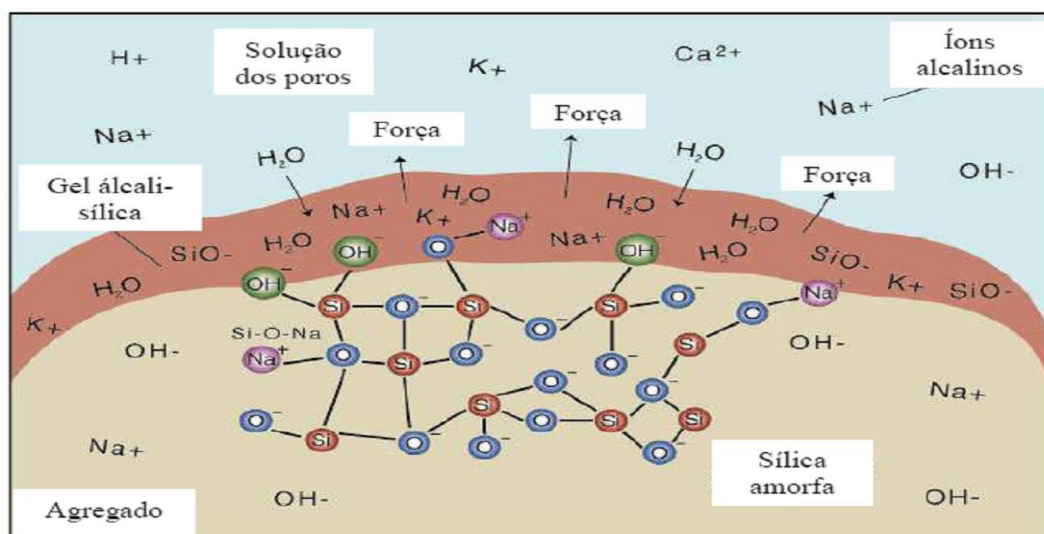
Figura 6 – Bloco de fundação com fissuração causada por RAA



Fonte: PECCHIO *et al.*, (2006)

De acordo com TIECHER (2006), a reação álcali-agregado envolve íons alcalinos tais como o sódio ( $\text{Na}^+$ ) e o potássio ( $\text{K}^+$ ) obtidos a partir de frações argilosas (argila e xisto) que compõem o cimento, íons hidroxilas ( $\text{OH}^-$ ) e minerais que compõem também os agregados.

Figura 7 – Ilustração química do processo do RAA.



Fonte: COLLINS *et al.*, (2008).

O gel alcalino formado na estrutura absorve água e se mantém impossibilitado de mover-se livremente, porquê a pasta de cimento o deixa contido. Essas tensões geradas, causam tração na estrutura de concreto (FOURNIER & BERUBÉ, 2000).

## 2.6 PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO NO CONCRETO

Um dos problemas mais danosos na durabilidade das estruturas de concreto é a patologia por penetração de íons cloreto, que compromete as armaduras (YILDIRIM, ILICA, SENGUL, 2011). O impacto econômico desse evento nas estruturas de concreto é significativo, visto que o custo de manutenção e reparo desta patologia se torna alto (KIM & BUMADIAN, 2017).

Este fenômeno com a penetração dos íons cloreto nos poros do concreto, e juntamente com a água e o oxigênio, chegam próximas as armaduras e desestabilizam pontualmente a capa passivadora, proporcionando o início do processo corrosivo. A literatura explica que considera que a ruptura da capa passiva é dinâmica com ciclos de passivação e despassivação, até que a despassivação ocorra de forma definida (MOTA *et al.*, 2012).

Figura 8 – Corrosão de armadura por cloreto.



Fonte: VAGHETTI *et al.*, 2002 *apud* SCHNEIDER, 2005.

As pesquisas de Gjrv (2009) propõem uma classificação de resistência  penetração de ns cloreto no concreto. Este método relaciona resultados de 4 tipos métodos de avaliação de penetração (acelerados e naturais), utilizando como parâmetro as faixas de profundidade de penetração dos ns no concreto. Esta proposta se mostrou altamente promissora, visto que o autor obteve um coeficiente de determinação médio, ou R<sup>2</sup>, de 0,9226 para esta classificação (MACHADO, 2022).

Tabela 2 – Proposta de classificação da resistência  ação de cloretos nos concretos com base na profundidade de penetração, para 4 metodologias distintas.

Dns (10 <sup>-15</sup> cm <sup>2</sup> /s)	Resistência do concreto  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).

As pesquisas sobre os agregados graúdos sintéticos com resíduos de bauxita ainda são escassas, e por isso ainda não apontam com exatidão as influências desses rejeitos causadas no concreto. Visto que, os estudos sobre durabilidade deste minério no concreto ainda estão sendo desenvolvidos, no Brasil e ao redor do mundo (MACHADO, 2022).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados em primeira etapa estão dispostos a seguir, juntamente com suas respectivas caracterizações.

- Cimento *Portland*: CP II-F-32 da marca Poty, comumente comercializado na região metropolitana de Belém-PA. Foi escolhido pela versatilidade no seu uso, sendo aplicado em revestimentos, argamassas e até mesmo concreto armado.

- Areia retida na peneira 2,4mm (grossa) (NBR – NM 248/2003), proveniente da região de Tracuateua-PA. Utilizada para a produção do concreto convencional e concreto com AGS.

- Brita 0 com granulometria 4,8 mm até 9,5 mm de acordo com a norma NBR – NM 248/2003 e brita 1 com granulometria 9,5 mm até 19 mm de acordo com a norma a NBR – NM 248/2003.

- Resíduo de Bauxita (RB) cedido pela empresa Hydro Alunorte, foi utilizado para a produção do Agregado Graúdo Sintético (AGS) através do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PPGEQ).

A caracterização do resíduo de bauxita não foi abordada nesta pesquisa, pois o foco deste estudo é avaliar as características do agregado graúdo sintético e suas influências físicas e químicas no concreto.

Tabela 3 – Ensaio de caracterização dos materiais primários.

<b>Material</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Normatização</b>
<b>Cimento Portland – CP II-F-32</b>	Massa específica	ABNT NBR 16605 (2017)
	Tempo de pega	ABNT NBR 16607 (2018)
	Índice de finura	ABNT NBR 11579 (2012)
<b>Agregado miúdo (Areia)</b>	Massa específica	ABNT NBR 16916 (2021)
	Massa unitária	ABNT NBR 16972 (2021)
	Granulometria	ABNT NBR NM 248 (2003)
	Módulo de finura	ABNT NBR 7211 (2022)
<b>Agregado graúdo (brita 0,1 e sintético)</b>	Massa específica aparente	ABNT NBR NM 53 (2009)
	Massa específica absoluta	ABNT NBR 16917 (2021)
	Módulo de finura	ABNT NBR 17054 (2022)
	Granulometria	ABNT NBR NM 248 (2003)
	Material Pulverulento	ABNT NBR NM 46

Os agregados graúdos sintéticos foram fabricados pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PPGEQ) e tiveram como componentes os materiais mostrados na Figura 5. Após sua produção, os mesmos foram caracterizados de modo semelhante ao agregado graúdo convencional (brita) também utilizado nesta pesquisa. Ademais, com a escassez do material brita 1, a brita 0 com granulometria entre 4,8 e 9,5 mm foi utilizada na confecção dos concretos, para suprir a ausência de material suficiente da brita 1 pré-determinada na dosagem do concreto. O processo de produção do AGS foi feito através do PPGEQ e com isso foram produzidos 3 tipos de agregados: AGS 70, AGS 80 e AGS 90 de acordo sua composição na Figura 9.

Entretanto, devido à carência do material AGS no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da UFPa, foram utilizados nesta pesquisa somente o AGS 90.

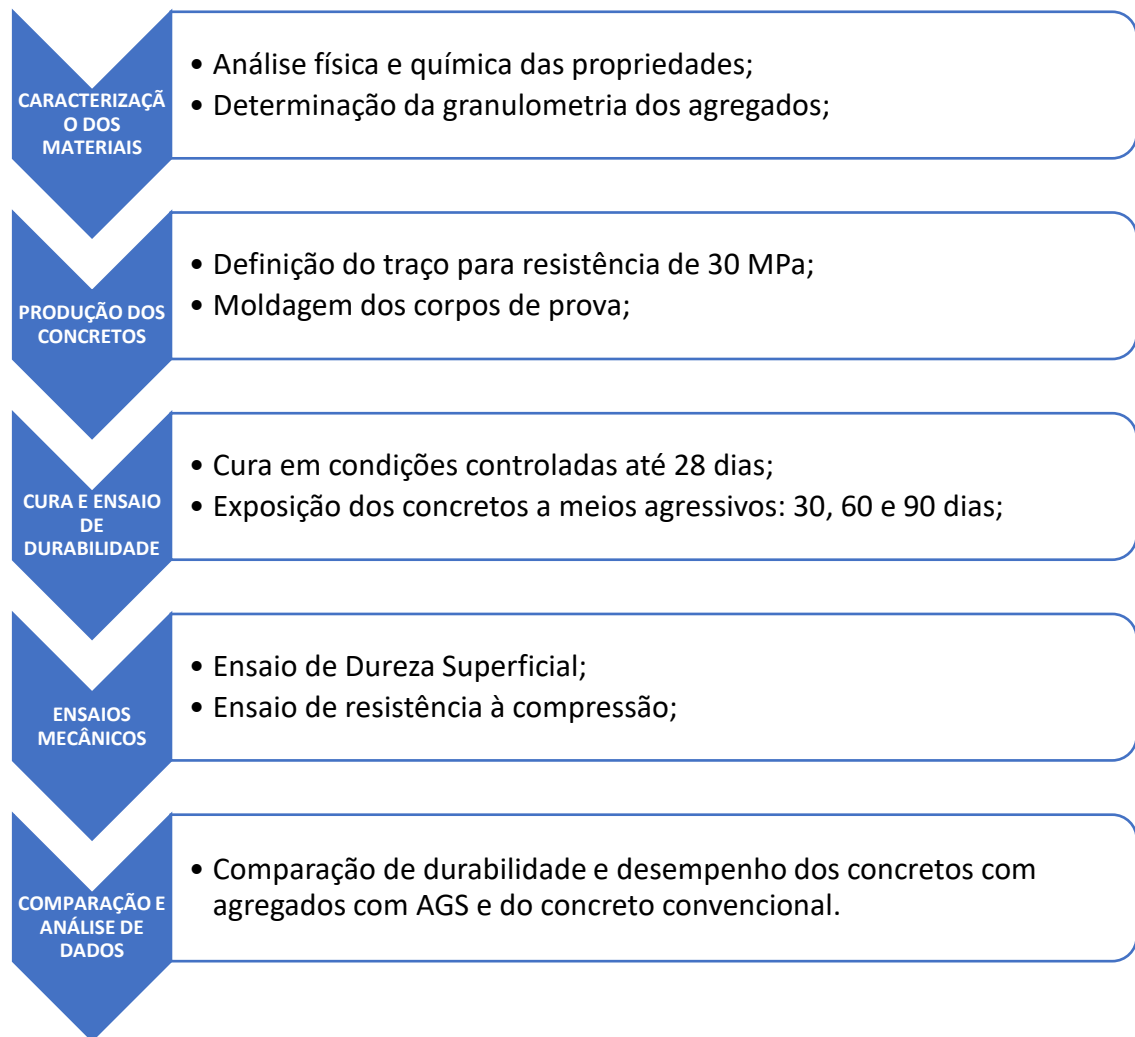
Figura 9 – Agregado Graúdo Sintético.



### 3.1. SÍNTESE DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

A metodologia do presente estudo propõe avaliar a durabilidade do concreto por meio da absorção de cloreto e ensaio de reação álcali-agregado (RAA) em idades distintas (30 a 90 dias), juntamente com ensaios mecânicos. Com base nisso é apresentado o fluxograma com 5 etapas distintas nesta pesquisa.

Figura 10 – Fluxograma de Atividades



### 3.2 DOSAGEM E PRODUÇÃO DO CONCRETO

Para a produção dos concretos foi utilizado o método do Instituto de Pesquisas Tecnológicas/Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (IPT/EPUSP). Por meios de tentativas, adotou-se os parâmetros apresentados na Tabela 4 para os concretos com AGS e para os concretos convencionais.

Tabela 4 – Características da dosagem.

Concreto	Relação (cimento:agregados)	$\alpha$ (%)	Relação a/c	Agregado graúdo (%)		Abatimento (mm)
				<sup>3</sup> britado	Sintético	
<sup>1</sup> CAGB	1:3,4	55	0,462	100	0	85
<sup>2</sup> CAGS	1:3,4	55	0,518	0	100	87

<sup>1</sup> Concreto agregado graúdo britado. <sup>2</sup> Concreto agregado graúdo sintético. <sup>3</sup> Brita.

De acordo com a relação a/c do concreto de referência e AGS, foi adotada a Classe de Agressividade III ( $\leq 0,55$ ) com a Classe do Concreto sendo  $\geq C30$  e consistência Classe S50 de abatimento de tronco de cone.

O método de mistura e a ordem dos materiais foram estabelecidos com base na ABNT NBR 7212:2021. Para intuito de comparação, foi substituído 100% da brita do concreto convencional para produção do concreto com AGS, a fim de analisar suas influências na durabilidade e seus desempenhos físico-mecânicos. Para a produção dos concretos, iniciou-se pela deposição de 100% do agregado graúdo (natural ou sintético, dependendo do traço a ser utilizado), deposição de 50% da água para saturação dos agregados graúdos, deposição total do cimento, agregado miúdo (areia) e por fim, a deposição do restante da água gradualmente, à medida que a consistência do concreto estava de acordo com o esperado.

A Figura 11 mostra os aspectos resultantes da confecção dos concretos e o teste de abatimento de tronco de cone (*Slump Test*).

Figura 11 – Características visuais e ensaio de abatimento



### 3.3 ANÁLISE DAS INFLUÊNCIAS DE DURABILIDADE NO CONCRETO

Foram utilizados para este ensaio, 6 corpos de prova (3 com brita e 3 com AGS) nos formatos cilíndricos de dimensões 10 x 20 cm (largura e altura, respectivamente).

Figura 12 – Corpos de prova cilíndricos para o ensaio de penetração de íons cloreto



Para a preparação dos corpos de prova, foram condicionados a submersão em tanque para a cura úmida, por 90 dias, posteriormente à desmoldagem. Após a cura, as amostras foram retiradas do tanque e destinadas a uma estufa durante o período de 24hs à temperatura de  $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$  para padronizá-los e mantê-las em condições ideais para testes.

Por conta de limitações técnicas não foi possível fazer uma análise experimental de acordo com a NT BUILD 443 que está dentro dos parâmetros ideais de execução do ensaio. Optou-se por fazer um ensaio mais simples utilizando apenas uma camada do corpo de prova para análise e utilizando uma média aritmética das profundidades (mm) de penetrações ao invés de porcentagem (%) de massa superficial influenciada pela agente agressivo.

O método de MACHADO (2022) consistiu no rompimento diametral do corpo de prova após o ensaio, com o intuito de avaliar a penetração do agente agressivo utilizado apenas uma camada, de forma a contemplar toda a dimensão longitudinal (20 cm) do corpo de prova.

Foram apresentados os seguintes parâmetros, baseando-se na norma europeia e em MACHADO (2022) para o condicionamento dos corpos de prova descritos na Tabela 5.

Tabela 5 – Condicionamento dos corpos de prova para o ensaio de penetração de íons cloreto.

Geometria do corpo de prova (cm)	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	NaCl (%)	Condições das amostras	Umidade Relativa (%)	Tempo de exposição (dias)
Cilíndrico(10x20)	29±2	3	Submersa e em ambiente fechado	100	30 e 90

Foram produzidos 2 tipos de barras de argamassa (areia e pó de AGS), de dimensões de 25x25x285mm de acordo com a ABNT NBR 15577-4:2018. As mesmas foram mantidas em cura úmida por 24hs e após esse período, as amostras foram deixadas na estufa por também 24hs a uma temperatura de  $80 \pm 2^\circ\text{C}$ . Após esses procedimentos, as barras foram submersas em uma solução aquosa concentrada de hidróxido de sódio (NaOH), simulando um ambiente agressivo de modo acelerado, conforme demonstra a Figura 13.

Figura 13 – Condicionamento do ensaio de RAA



### 3.4 ANÁLISE DAS INFLUÊNCIAS DE FÍSICO-MECÂNICAS NO CONCRETO

A resistência superficial do concreto foi avaliada por meio do ensaio não destrutivo de esclerometria por reflexão, realizado aos 28 dias de idade dos corpos de prova. O procedimento seguiu as diretrizes da ABNT NBR 7584:2012. Este ensaio permitiu avaliar a dureza superficial do material, fornecendo uma estimativa de sua resistência mecânica (MPa).

Para isso, foram avaliados dois tipos de corpos de prova nas seguintes condições: 2 (brita e AGS) submersos em uma solução de íons cloreto (prévios ao rompimento diametral e medição de penetração) e 2 (brita e AGS) em seu estado convencional apenas (após a cura de 28 dias).

Figura 14 – Ensaio com esclerômetro (martelo Schmidt)



### 3.5 ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

Os concretos foram submetidos ao ensaio de absorção de água por capilaridade, visto que o mesmo ensaio é de suma importância ao se tratar de durabilidade das estruturas de acordo com a ABNT NBR 9779: 2012. Tal método visa avaliar a possível entrada de agentes deletérios e patológicos para a parte interna do concreto, o que posteriormente pode levar à ataques e corrosão da armadura. Este ensaio tem o intuito também apresentar um indicativo de conectividade dos poros presentes no concreto.

Para este ensaio foram submetidos 6 corpos de provas, sendo eles 3 de AGS e 3 convencionais, em um recipiente com condições controladas. A camada de água utilizada foi de  $5 \pm 1$  mm de altura, seguindo os parâmetros da norma. O ensaio ocorreu nos tempos de 3hs, 4,5hrs, 6hrs, 24hrs e 48h.

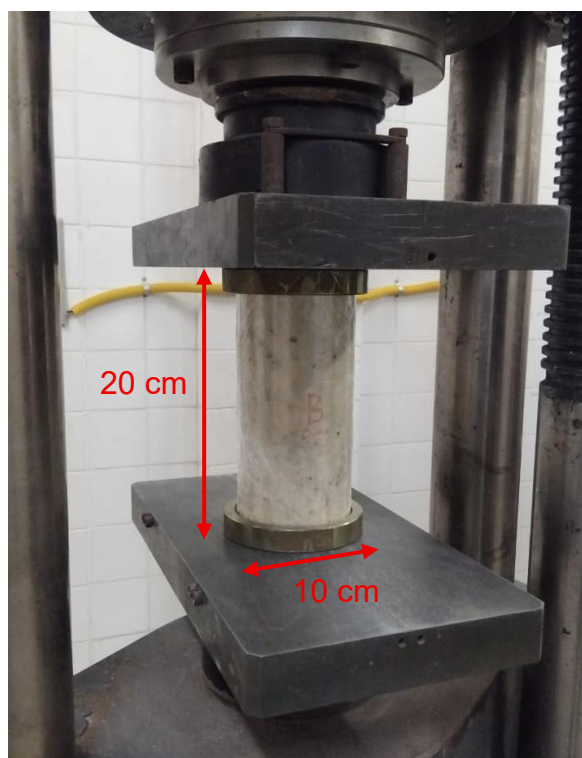
Figura 15 – Condicionamento do ensaio de absorção



### 3.6 ROMPIMENTO POR COMPRESSÃO AXIAL

Além do ensaio de esclerometria foi utilizado o ensaio de compressão axial de acordo com a ABNT NBR 5739: 2018. O método consistiu no rompimento de dois corpos de prova de forma natural, ou seja, que previamente não passaram por nenhum ensaio de durabilidade ou resistência. Foram usados corpos de provas com dimensões de 10x20cm e condicionados na prensa hidráulica conforme a Figura 16. Antes da ruptura, os corpos de prova foram submetidos a cura maior que 90 dias afim de testá-lo o mais próximo possível de sua resistência máxima, além de serem medidos e verificados quanto às suas condições superficiais. A compressão axial foi realizada em ambiente controlado, com aplicação contínua da carga sem choque aos testemunhos.

Figura 16 – Ensaio de compressão axial



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

O cimento Portland, areia, brita 0, brita 1 foram caracterizados e os seus resultados estão apresentados abaixo.

Tabela 6 – Caracterização do cimento Portland.

Tipo	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Índice de finura (%)	Tempo de pega (h : min.)	
			início	fim
CP II-F-32	3,061	4	1:20	8:00

Tabela 7 – Caracterização da areia.

Amostra	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de finura
Areia	2,62	1,61	1,44

Tabela 8 – Caracterização das britas.

<b>Propriedades</b>	<b>Brita 0</b>	<b>Brita 1</b>
Dimensão nominal (mm)	4,8 a 9,5	9,5 a 19
Massa esp. aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,45	1,39
Massa esp. absoluta (g/cm <sup>3</sup> )	2,60	2,60
Módulo de finura	6	6,9

Fonte: Fornecida pela Tabalmix (2024)

A caracterização dos agregados grãos sintéticos está disposta abaixo na Tabela 9.

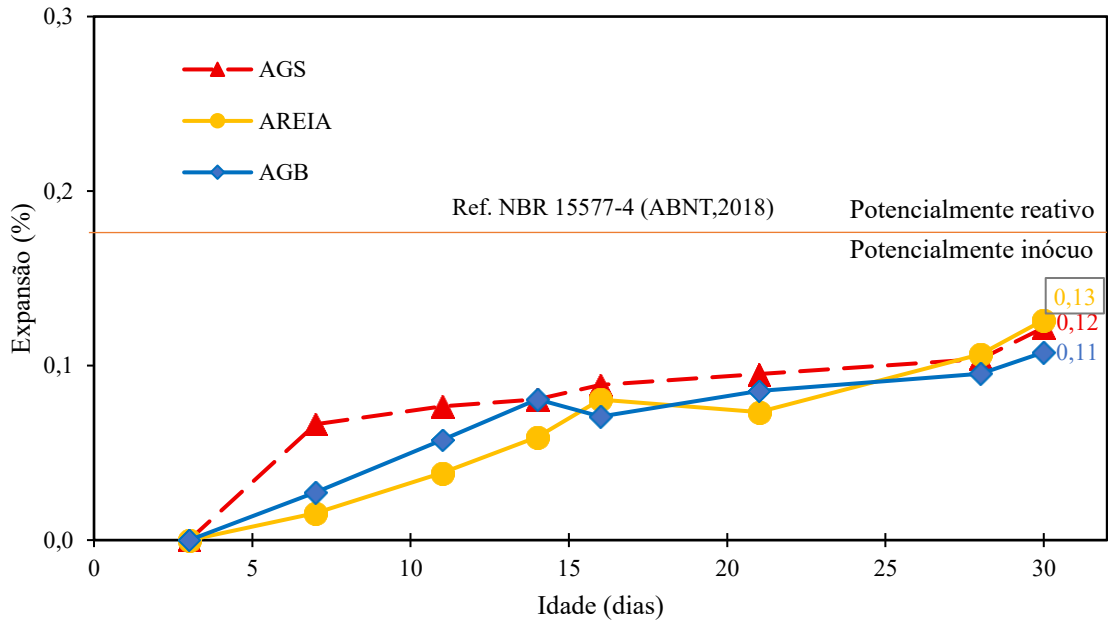
Tabela 9 – Caracterização do AGS.

<b>Abrasão Los Angeles (%)</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa unitária (kg/dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Índice de forma (%)</b>	<b>Módulo de Finura</b>	<b>Diâmetro máximo (mm)</b>
24,41	2,49	1,44	1,99	1,84	19

#### 4.2 REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO

A potencialidade reativa dos materiais primários e AGS atendeu aos critérios estabelecidos pela ABNT NBR 15477-4:2018 em relação ao ensaio de reatividade álcali-agregado (RAA). Todos os materiais analisados permaneceram abaixo do limite de expansão máxima normativa (0,19%), sendo todos eles classificados como inócuos como demonstra a Figura 17.

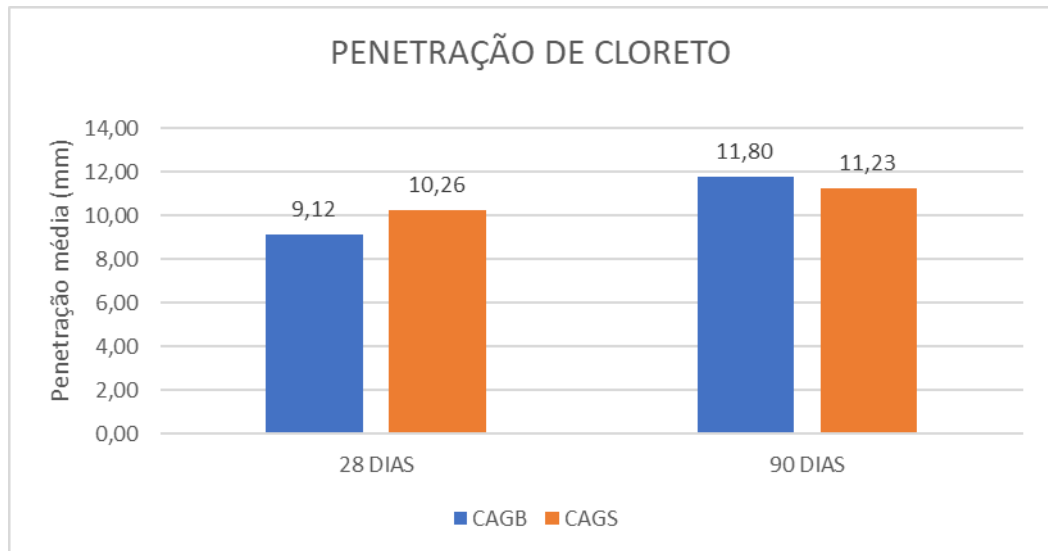
Figura 17 – Reatividade dos materiais em gráfico de dispersão



#### 4.3 ANÁLISE DE PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO

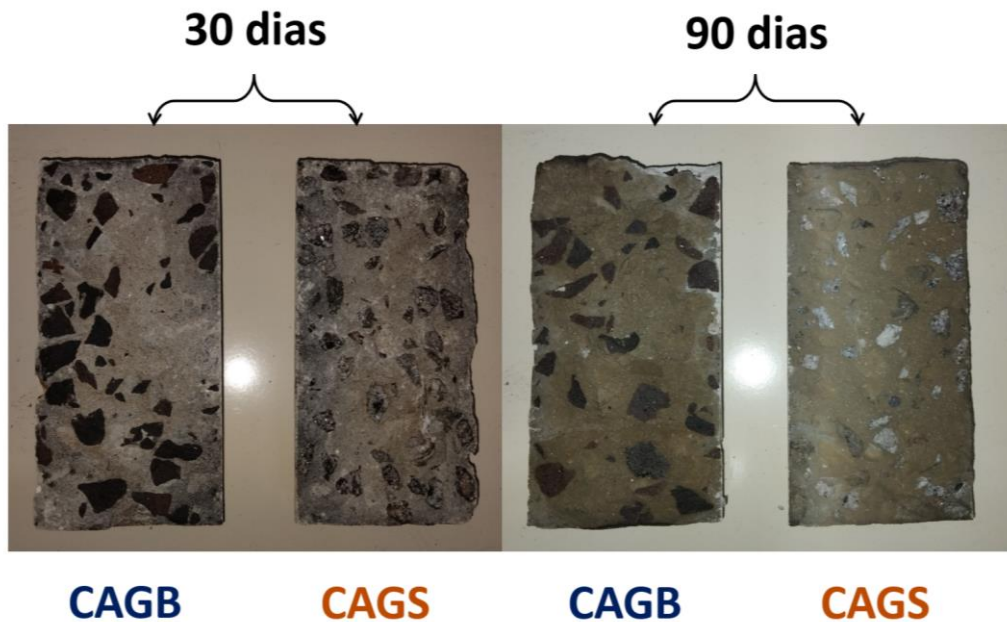
Após o ensaio, se obteve a resistência à penetração de cloreto através da análise da média da profundidade em idades distintas (30 e 90 dias).

Figura 18 – Desempenho de penetração dos concretos



Fonte: Autor (2025)

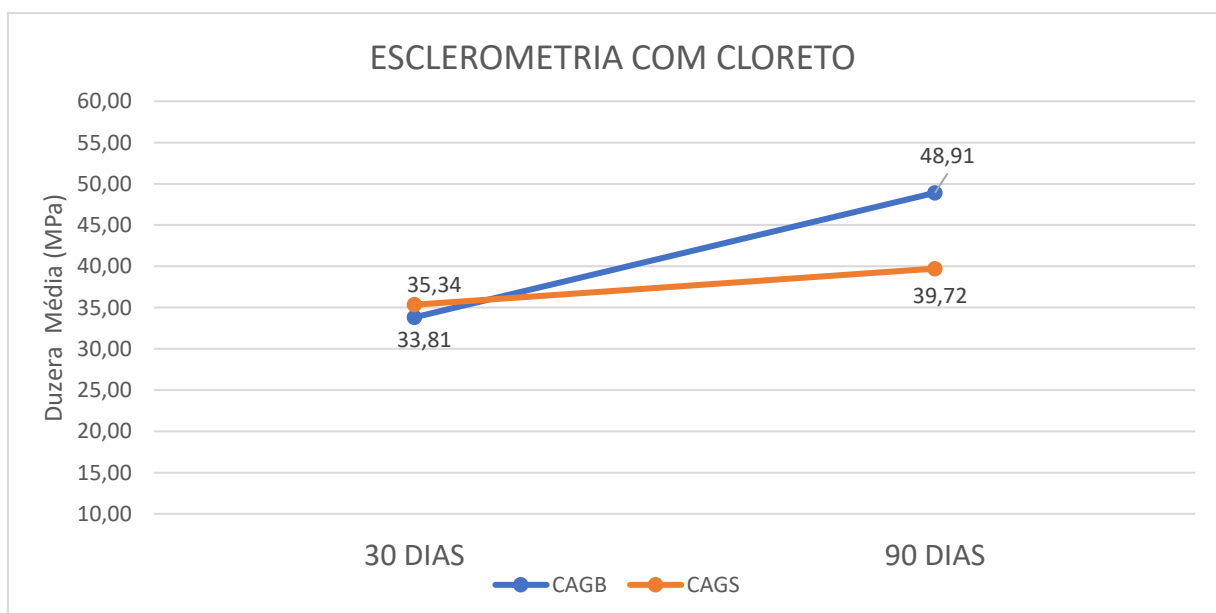
Figura 19 – Corpos de prova após o ensaio



#### 4.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÂNICAS

Após a produção dos concretos, e ao ensaio de penetração de cloreto, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de esclerometria. Sendo esse um método não-destrutivo para avaliar e estimar a dureza superficial do concreto no estado endurecido. Para isso, foram avaliados corpos de prova com idade de 30, 60 e 90 dias.

Figura 20 – Desempenho de dureza superficial dos concretos com cloreto



Os resultados obtidos no ensaio de esclerometria, após a realização do ensaio de penetração de íons cloreto, evidenciam um comportamento diferenciado entre CAGB e o CAGS. Observou-se que ambos os concretos apresentaram evolução dos valores médios de resistência ao longo das idades de 30, 60 e 90 dias, comportamento esperado em função da continuidade das reações de hidratação do cimento.

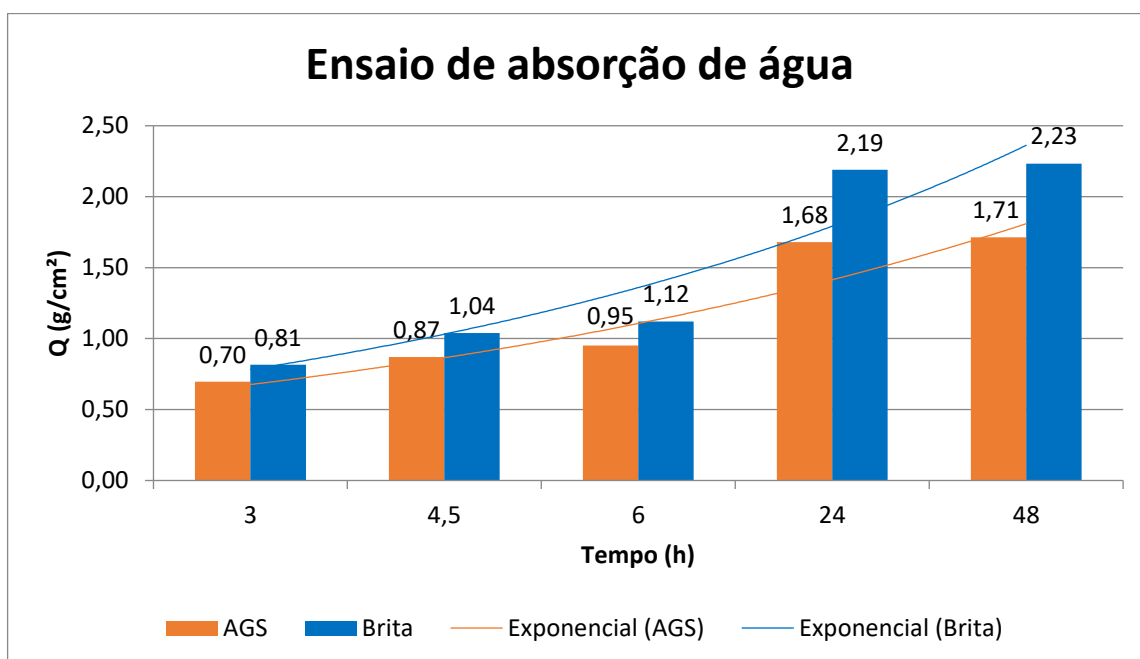
No entanto, o concreto com brita apresentou desempenho superior nas idades mais avançadas analisadas (60 e 90 dias), partindo de 35,34 MPa aos 30 dias e atingindo 48,91 MPa aos 90 dias. Já o concreto com AGS iniciou em 33,81 MPa aos 30 dias, alcançando 39,72 MPa aos 90 dias, demonstrando um incremento mais moderado. Essa diferença se acentuou com o tempo, de forma que aos 90 dias o concreto com brita apresentou resistência aproximadamente 23% maior que o obtido com AGS.

Apesar do concreto convencional apresentar maior disparidade e ganho de resistência ao longo do tempo, o AGS se mostrou também promissor para um bom desempenho de esforços físico-mecânicos. Devido aos recursos materiais limitados no laboratório de engenharia civil da UFPa, não foi possível fazer uma análise estatística dos desempenhos, visto que, a comparação foi feita apenas com 2 testemunhos de cada tipo de concreto, porém os resultados estão de acordo com os previstos e estimados nas análises mecânicas.

#### 4.5 AVALIAÇÃO PELO MÉTODO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

Com os resultados obtidos dos 6 testemunhos ensaiados, foi retirada a média aritmética da absorção do concreto convencional e do AGS. A Figura 21 demonstra o comportamento da penetração de água nos corpos de prova.

Figura 21 – Absorção acumulada ao longo do tempo



Apesar do concreto convencional (CAGB) se mostrar mais vulnerável a absorção do que o CAGS, os dois resultados se mantiveram em um crescimento constante. Nas primeiras horas do ensaio, é possível ver a nítida diferença de absorção de água nos corpos de prova.

Embora o agregado graúdo sintético seja um elemento mais poroso que a brita, os resultados denotaram que o CAGB esteve mais propício à absorção de umidade do que o CAGS.

A hipótese mais provável para tal ocorrido seria a presença da película d'água na interface entre o agregado e a pasta de cimento que tende a gerar uma região menos densa em comparação à própria pasta, caracterizada por maior quantidade de poros e menor densidade após a secagem. Essa condição de interface menos compacta torna-se suscetível à atuação de compostos como sulfatos, aluminatos e hidróxido de cálcio, os quais, em condições de temperatura e umidade favoráveis, podem favorecer a formação de etringita tardia. Esse processo está associado a problemas mecânicos, como o surgimento de fissuras no concreto.

No caso do AGS, a absorção significativa de umidade faz com que a película de água ao redor do agregado seja mais fina, permitindo uma distribuição mais homogênea dos referidos compostos, evitando sua concentração na zona de interface. Dessa forma, reduz-se a probabilidade de ocorrência da etringita tardia. Em contraste, no concreto produzido com brita, a menor absorção de água do agregado leva à formação

de películas mais espessas e localizadas na interface, favorecendo a aglomeração de compostos e, conseqüentemente, aumentando a suscetibilidade à etringita tardia.

Mesmo o CAGB assumindo os maiores valores de absorção do que o CAGS, os resultados atenderam às expectativas esperadas.

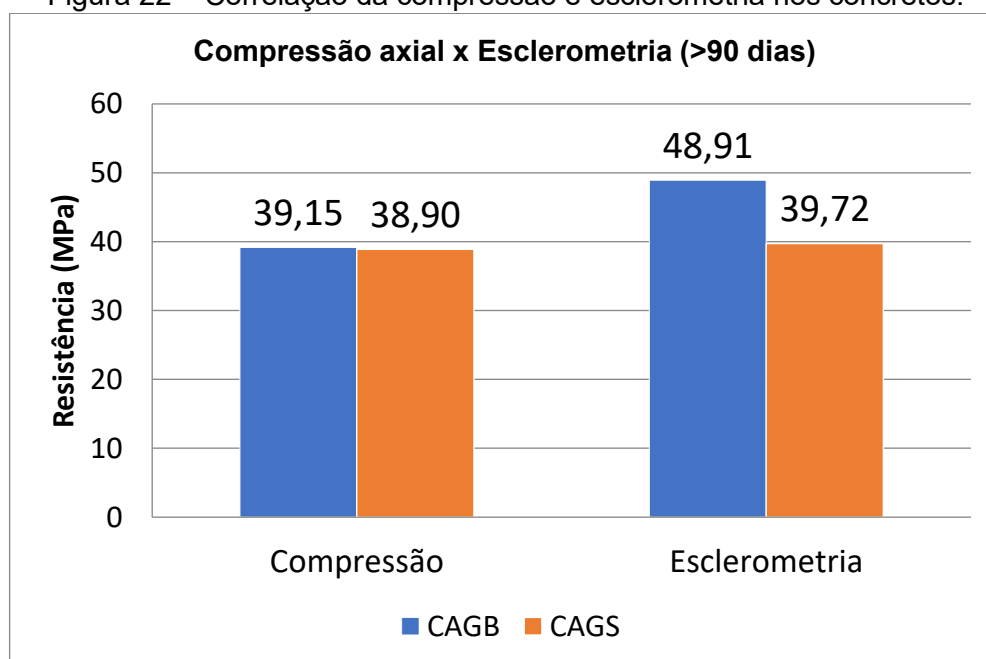
#### 4.6 ANÁLISE DA COMPRESSÃO AXIAL

Após o ensaio de compressão axial no concreto, os resultados foram dispostos na Figura 22 de modo a fazer uma correlação entre os resultados do ensaio de esclerometria e o ensaio de compressão.

Dessa forma, a comparação e a correlação entres os dois ensaios tornam-se indispensáveis no âmbito analítico. A partir desta análise conjunta, é possível estabelecer curvas ou equações de dureza superficial medida pelo esclerômetro com a resistência efetiva obtida na compressão. Isto garante maior confiabilidade no controle de qualidade dos concretos.

No entanto, esta análise foi feita de forma simplificada devido ao número limitado de corpos de prova, impossibilitando uma análise estatística dos resultado físico-mecânicos.

Figura 22 – Correlação da compressão e esclerometria nos concretos.



Apesar dos corpos de prova manterem uma semelhança nos resultados, houve uma disparidade de  $\pm 9,65$  MPa do CAGB no ensaio de esclerometria entre o valor médio

dos restantes. O ensaio do martelo Schimidt é apenas uma estimativa da resistência superficial, diferente do ensaio a compressão axial que é um teste empírico. A leitura da aferição do resultado no momento do ensaio pode ter ocorrido sobre o agregado, o que influencia nos dados posteriores, algo comumente considerado neste tipo de experimento. Portanto não pode ser levado em consideração como um resultado absoluto.

## 5 CONCLUSÃO

De acordo com análises resultantes dos procedimentos, podemos ver que o concreto com AGS 90 atendeu as especificações normativas e se mostraram tão promissores quanto o concreto convencional para os elementos estruturais no ramo da construção civil. Com isso, concluímos que:

- Os resultados do ensaio acelerado de reação álcali-agregado (RAA) indicaram que o CAGS apresentou desempenho satisfatório, com comportamento semelhante ao CAGB, evidenciando menor suscetibilidade a expansões deletérias no período analisado.
- No que se refere à durabilidade física, avaliada pela penetração de íons cloreto até 90 dias, o concreto com agregado sintético demonstrou maior resistência à penetração, o que pode ser atribuído à distribuição mais uniforme da porosidade do compósito. Como não houve especificação prévia da destinação do uso do concreto (pilares, fundação, etc.), estes ainda assim estão dentro dos limites normativos de acordo com a ABNT NBR 6118:2023 que define cobertura nominal para Classe de Agressividade III sendo entre 30 a 45 mm (variando o tipo de estrutura).
- A análise correlativa entre os ensaios de esclerometria e a ação de íons cloreto mostrou que o CAGS manteve níveis adequados de resistência mecânica, mesmo quando exposto a ambientes potencialmente agressivos, reforçando sua viabilidade como alternativa ao uso da brita convencional. Ademais, os ensaios de absorção por capilaridade confirmaram a influência significativa da porosidade na durabilidade, sendo que a estrutura porosa do agregado sintético, ao invés de comprometer o desempenho, contribuiu para uma melhor

redistribuição da umidade e redução de concentrações localizadas de compostos deletérios.

- A resistência mecânica dos concretos apresentou valores aceitáveis dentro do parâmetro pré-estabelecido na dosagem, que seria uma estimativa de 30 MPa. Todos os resultados, tanto da esclerometria quanto da compressão axial, ficaram acima do esperado.
- A resistência à penetração de cloretos obteve resultados satisfatórios de profundidade de penetração.

Dessa forma, pode-se concluir que a substituição parcial ou total do agregado graúdo britado pelo agregado sintético de resíduo de bauxita apresenta potencial para aplicação em concretos estruturais de resistência normal, atendendo não apenas aos requisitos de resistência, mas também oferecendo vantagens quanto à durabilidade física e química. Além disso, a utilização desse resíduo como insumo agrega valor ambiental, ao destinar de forma sustentável um subproduto industrial de grande relevância.

## **6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16972: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: Agregados para concreto – Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16916: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17054: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16917: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605 — Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248 - Agregado – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579 — Cimento Portland: determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 46 — Agregados - Determinação do material fino que passa na peneira 75 µm, por lavagem (nº 200). Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9779 – Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7584 – Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7212: Execução de concreto dosado em central – Procedimento. Rio de Janeiro, 2021

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

ABNT. NBR 8953 — Concreto para fins estruturais — Classificação pela resistência, consistência, massa específica e classe de agressividade ambiental. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

NORDTEST. *NT Build 443: Concrete, hardened – Accelerated chloride penetration*. Espoo: Nordtest, 1995.

MACHADO, Vinícius Costa. Resíduo da bauxita na produção de agregados graúdos sintéticos para concreto estrutural: análise de durabilidade Orientador: Marcelo de Souza Picanço. 2022. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/15735> . Acesso em:

ROSÁRIO, Katia Alrelhia do. Concreto com utilização de agregado graúdo sintético produzido a partir da lama vermelha: estudos de dosagem, propriedades e microestrutura. Alcebíades Negrão Macêdo, 2013. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/6266>. Acesso em:

SILVA, Ana Paula Moreira da; VIANA, João Paulo; CALVACANTE, André Luís Brasil. *Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas*. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2012.

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.

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.

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

HIND, R. A., BHARGAVA, S. K., GROCCOTT, 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.

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.

IAI, International Aluminium Institute (2013). Disponível em: <<http://www.world-aluminium.org/>> (acesso: 16/08 2025).

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.

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.

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.

HYDRO. Hydro Alunorte. Hydro, c2025. Disponível em: <https://www.hydro.com.br/global/sobre-a-hydro/a-hydro-no-mundo/americas/brasil/barcarena/alunorte/>. Acesso em: 28 ago. 2025.

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.

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

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.

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

NOGUEIRA, Kelso Antunes. *Reação álcali-agregado: diretrizes e requisitos da ABNT NBR 15577/2008*. 2010. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2010.

PECCHIO, M.; KIHARA Y.; BATTAGIN A. F.; ANDRADE T. Produtos da Reação Álcali-Silicato em Concretos de Edificações da Região do Grande Recife - PE. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2., 2006. Rio de Janeiro. Anais... São Paulo: IBRACON, 2006. 1 CD-ROM.

YILDIRIM, Hasan; ILICA, Tolga; SENGUL, Ozkan. Effect of cement type on the resistance of concrete against chloride penetration. *Construction and Building Materials*, v. 25, 2011.

KIM, Yail J.; BUMADIAN, Ibrahim. Chemicoelectrical response of concrete bonded with carbon fiber-reinforced polymer sheets in a corrosive environment. *ACI Materials Journal*, v. 114, ago. 2017.

MOTA, J. M. F.; BARBOSA, F. R.; COSTA e SILVA, A. J.; FRANCO, A. P. G; CARVALHO, J. R. Corrosão de armadura em estruturas de concreto armado devido ao ataque de íons cloreto. In: *Anais do CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, n. 54. Maceió: IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, 2012.

VAGHETTI, M. A. O.; SARKIS, P. J.; SARKIS, J. M. Ação dos cloretos incorporados: um estudo de caso. In: *Anais do Congresso Brasileiro do Concreto*, n. 44, Brasília: IBRACON, 2002.

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.

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.

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

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

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

NEVILLE, A.M. "Propriedades do concreto"; 2ª edição São Paulo: Pini, São Paulo - SP, 1997.