

# Agregado sintético de resíduo de bauxita para concreto estrutural: Uma análise físico-mecânica

Daniel de Queiroz Santos Araújo

Renan Alves de Castro

Marcelo de Souza Picanço<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7313-1229>

Universidade Federal do Pará - UFPA, Programa de Graduação em Engenharia Civil, Belém, Pará, Brasil

Faculdade de Engenharia Civil

Norsk Hydro Brasil, Barcarena, Pará, Brasil

**Resumo:** No presente estudo foram produzidos concretos utilizando 3 agregados graúdos sintéticos (AGS 70, AGS 80, AGS 90), obtidos a partir do resíduo da bauxita (RB), sendo avaliados quanto a: resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e absorção capilar de água. Os resultados mostraram, primeiramente, que os agregados sintéticos de RB atendiam aos requisitos normativos para utilização em concretos e apresentaram-se inócuos na avaliação do potencial reativo (RAA). A resistência à compressão dos concretos (28 dias) atingiu valores entre 36-24 MPa; as outras características analisadas (tração, módulo de elasticidade) mostraram pouca variabilidade; já a absorção capilar foi compatível à tendência linear crescente das absorções dos agregados sintéticos. O concreto contendo o AGS 70 obteve o melhor desempenho físico-mecânico.

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

**Financial support:** The funding for this study arose from the research sector of the Hydro Alunorte refinery (State of Pará, Brazil), through a public-private partnership.

**Abstract:** In the present study, concrete was produced using 3 coarse synthetic aggregates (AGS 70, AGS 80, AGS 90), obtained from bauxite residue (BR), being evaluated for: resistance to axial compression, resistance to traction by diametral compression, modulus of elasticity and capillary water absorption. The results showed, firstly, that the synthetic RB aggregates met the normative requirements for use in concrete and presented inoculum in the evaluation of the reactive potential (RAA). The compressive strength of the concretes (28 days) reached values between 36-24 MPa; the other characteristics analyzed (traction, modulus of elasticity) showed little variability; on the other hand, capillary absorption was compatible with the increasing linear trend of synthetic aggregate absorptions. Concrete containing AGS 70 obtained the best physical-mechanical performance.

**Keywords:** bauxite residue, coarse synthetic aggregate, concrete, characterization.

## 1 INTRODUÇÃO

Tratando-se do consumo de recursos naturais, a indústria da construção civil que é um grande motor econômico-social, também é responsável por cerca de 57,5% da utilização de matéria-prima a nível mundial [1]. Dentre os materiais utilizados na construção civil, pode-se destacar os agregados graúdos, uma vez que possuem vastas áreas de aplicações como: barragens, pavimentação, concreto, etc.

Com o passar dos anos nota-se um crescimento acentuado do consumo desses agregados, tomando-se como exemplo a China que entre 2011 - 2014 consumiu mais que os Estados Unidos em todo o século 20 [2]. No Brasil, segundo [2], o consumo de agregados graúdos possui comportamento crescente em períodos economicamente favoráveis, e isto acaba contribuindo com a ligeira escassez deste recurso devido à alta demanda uma vez que segundo [2], em 2022 o país demandou cerca de 266 milhões de toneladas de agregado graúdo. Mediante a este fato, a limitada oferta aponta para a necessidade de se obter novas alternativas técnicas para produção de agregados à construção civil, visando a também a atenuação da degradação ambiental gerada pela exploração dos agregados naturais (ex.: seixo).

A mineração é um setor de grande importância para a economia e desenvolvimento social, estando ligado também à construção civil. O mesmo, apesar de seus inúmeros benefícios, gera uma grande quantidade de rejeitos com elevados custos de gerenciamento, potenciais riscos ao ser humano (dependendo da composição) e muitas vezes sem aplicabilidade oficial normatizada. Dentro deste âmbito pode-se destacar a indústria da alumina no que se refere ao seu principal rejeito, o resíduo da bauxita (RB) drenado, popularmente conhecido como “lama vermelha”. O RB é caracterizado como a parcela residual dos componentes minerais insolúveis do minério, durante o a fase de refino pelo processo Bayer, para obtenção da alumina [3]. Segundo dados da ABAL [4], estima-se que o Brasil seja o terceiro maior produtor de alumina, gerando anualmente um montante de 14,5 milhões de toneladas deste resíduo (disposição drenada). A nível mundial, este valor chega a 120 milhões de toneladas, sendo um total estimado de 2,7 bilhões em estado de armazenagem segundo [5], [6].

Com o passar dos anos, no intuito de reaproveitamento, muitos países tem visto o RB como alternativa viável de matéria-prima base para aplicações na construção civil [5; 7; 8]. Esta

---

motivação global atrela-se principalmente ao crescimento da quantidade de RB gerado durante a fase de refino da bauxita, onde o este resíduo acaba-se tornando um passivo ambiental [9], e a escassez gradativa das reservas de matéria prima não renovável (ex.: agregados).

No meio científico da construção civil, e que vêm se tornando realidade, há propostas da utilização do RB na produção de agregados graúdos por meio da calcinação com outros materiais (ex.: argila, sílica, areia), visando também o emprego em concretos. Alguns autores [10]-[18] apontam para um desempenho levemente superior do agregado sintético em relação ao agregado natural, tanto em suas propriedades intrínsecas (ex.: abrasão, perda ao choque e absorção de água) quanto nas conferidas aos concretos que os incorporam (ex.: resistência à compressão/tração; módulo de elasticidade e absorção capilar de água). Segundo [12] e [19], a produção dos agregados sintéticos tem o objetivo de atenuar a alta demanda por agregados naturais consumidos principalmente pela construção civil. A utilização destes novos agregados, também por conta da variabilidade composicional do RB, deve ser conduzida a partir de estudos prévios com intuito de se avaliar o desempenho dos mesmos na aplicação desejada. Conforme [20], um dos grandes desafios neste âmbito é conseguir um desempenho satisfatório utilizando a maior proporção de RB com segurança, devido a elevada alcalinidade que este resíduo apresenta *in natura*. Ressalta-se que embora haja pesquisas sobre tal agregado, as mesmas ainda são escassas em número e limitadas quanto a abrangência e representatividade plena dos resultados, de modo que qualquer contribuição neste âmbito se mostra benéfica a composição global de informações a respeito.

Baseando-se no que foi evidenciado, meios que garantam elevadas taxa de consumo do RB para produção e/ou substituição de materiais da construção civil [21], como por exemplo os agregados graúdos para concreto, acabam por se tornar necessárias visto as problemáticas apresentadas com relação ao armazenamento do resíduo, falta de aplicabilidade normatizada do mesmo e demanda por agregados. Dessa forma, ao se produzir um agregado graúdo que confira garantia de boas propriedades físico-mecânicas em concretos estruturais, contribui tanto para a indústria da construção civil quanto a indústria da alumina. O presente estudo utilizou o RB (tipo dry-disposal) advindo da refinaria Hydro Alunorte (Barcarena-PA, Brasil), na produção de 3 agregados graúdos sintéticos para concretos estruturais, sendo avaliados em relação às suas respectivas características físico-mecânicas. Destaca-se também

que a pesquisa apresentada fez parte de um amplo e longo estudo, ainda em desenvolvimento pela UFPA, envolvendo a produção e aplicabilidade do RB, sendo este futuramente utilizado na construção civil devido à alta demanda por agregados.

**Figura 1** – Vista da refinaria de alumina na cidade de Barcarena-PA



Fonte: Hydro

## 2 MATERIAIS E PROGRAMAÇÃO DO EXPERIMENTO

### 2.1 Materiais

#### 2.1.1 Materiais primários

A tabela 1 apresenta os materiais primários utilizados na pesquisa, além das respectivas normas dos ensaios de caracterização.

**Tabela 1** – Caracterização dos materiais

Materiais	Ensaio	Norma
CP IV - 32 RS cimento	Massa específica	ABNT NBR 16605 (2017) [22]
	Tempo de pega	ABNT NBR 16607 (2018) [23]
	Determinação da finura	ABNT NBR 11579 (2012) [24]
Areia	Massa específica	ABNT NBR 16916 (2021) [25]
	Massa unitária	ABNT NBR 16972 (2021) [26]
	Granulometria	ABNT NBR NM 248 (2003) [27]
Resíduo de bauxita	Composição química (XRF)	ABNT NBR 14656 (2001) [28]
Agregado graúdo	Reação alcali-agregado (RAA)	ABNT NBR 15577 (2018) [29]
	Massa específica	ABNT NBR 16917 (2021) [30]
	Massa unitária	ABNT NBR 16972 (2021) [26]
	Absorção de água	ABNT NBR 16917 (2021) [30]
	Granulometria	ABNT NBR NM 248 (2003) [27]
	Índice de forma	ABNT NBR 7809 (2019) [31]
	Abrão Los Angeles	ABNT NBR 16974 (2021) [32]
	Perda ao choque	DNER-ME NR 399/99 [33]

### 2.1.2 Produção do agregado sintético

A Figura 2 demonstra os materiais primários utilizados para a produção do agregado sintético.

**Figura 2** – Materiais primários utilizados para a produção do agregado sintético



Para a utilização apropriada do agregado sintético, os materiais consituíntes foram submetidos ao pré-tratamento demonstrado na tabela

**Tabela 2** – Pré-tratamento da matéria-prima (agregados naturais e argila).

Materiais	Utilização	Tratamento prévio		
		Secagem	Moagem	Triagem
Argila	Agregado sintético	Estufa com recirculação de ar a temperatura de 105°C por 24h (MARCONI MA 035).	Desagregação por Moinho de Bolas (aço) por 30 min.	Utiliza-se apenas o material passante da peneira #150 µm.
Sílica				
Resíduo de bauxita				
Seixo	Concreto estrutural	Estufa por 24h na temperatura de 105°C.	-	-
Areia				

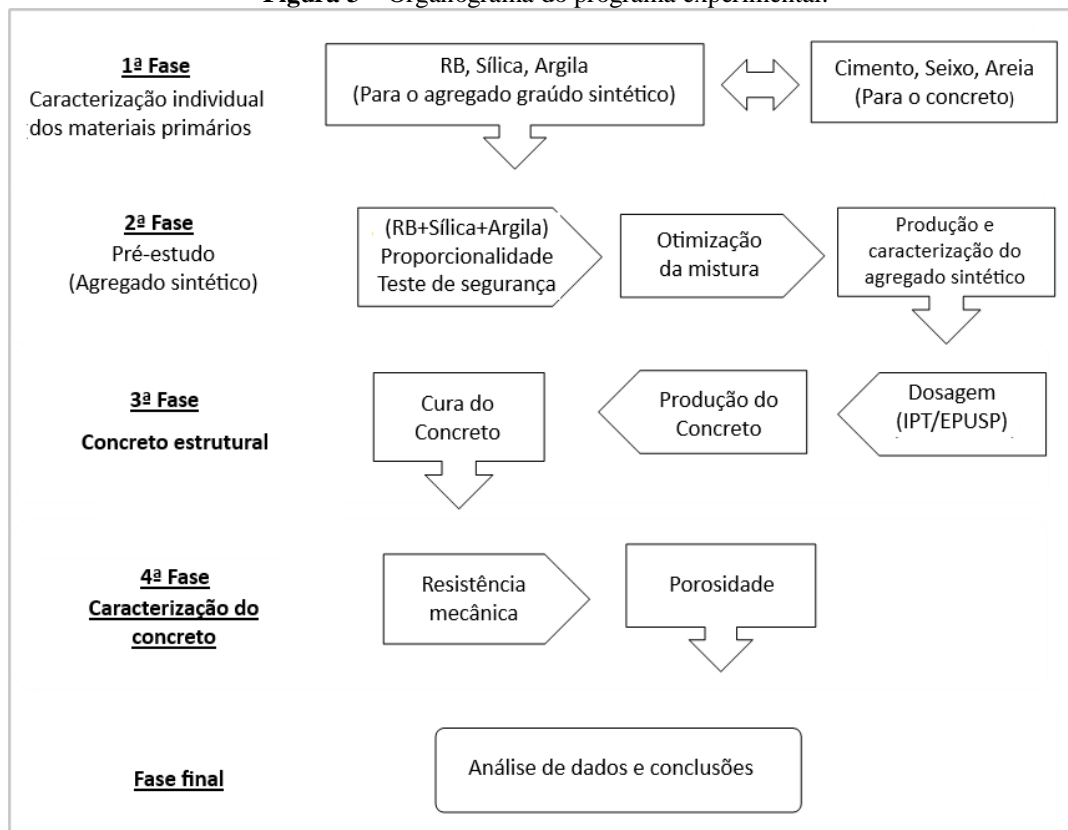
O referido tratamento prévio teve como objetivo encontrar um ajuste na granulometria no qual se ajustaria a uma maior eficiência nas reações de sinterização dos agregados, além de evitar a possibilidade da formação de áreas mais frágeis devido ao uso de materiais molhados ocasionariam um efeito negativo na performance e resultados finais

## 2.2 Programa Experimental

### 2.2.2 Sumário do Programa Experimental

O programa passo a passo foi em 5 fases assim como apresentadas na figura 3

**Figura 3** – Organograma do programa experimental.



### 2.2.3 Estudo prévio para a sinterização do agregado.

Anteriormente à utilização dos agregados foram realizados estudos em relação a composição deles, baseados nos estudos [36], [37] e [38]. Nestes estudos, foram analisadas 26 pré misturas com as variações de resíduo de bauxita (60-95%), sílica (0-30%) e argila (0-30%), todas com diferentes proporções para determinar a composição ideal.

Todas as amostras foram submetidas aos ensaios de solubilização (ABNT NBR 10005:2004) [39] e de obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos (ABNT NBR 10006:2004) [40] como critério de análise inicial. Entre as amostras, as 5 que estavam satisfatórias de acordo com os critérios iniciais foram escolhidas.

Levando em conta a performance das amostras iniciais, foram formuladas 3 novas misturas gerando os agregados AGS 70, AGS 80, AGS 90.

**Tabela 3** – Composição, temperatura e tempo de sinterização para a produção dos agregados sintéticos

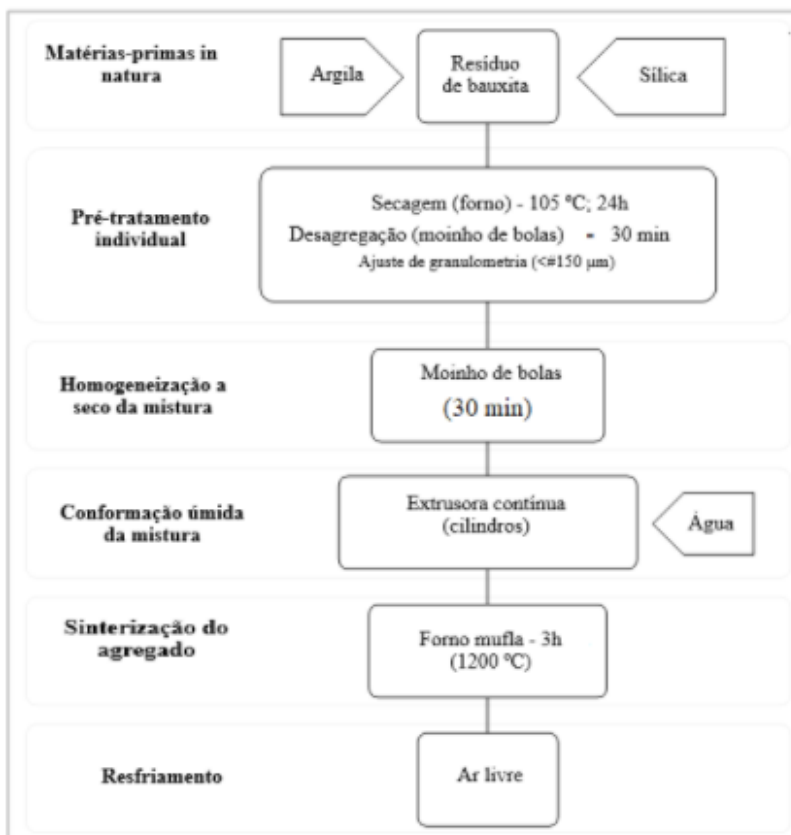
<b>Amostra</b>	<b>Resíduo de bauxita (%)</b>	<b>Silica (%)</b>	<b>Argila (%)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tempo (h)</b>
AGS 70	70 - 75	20 - 25	5	1200	3
AGS 80	80 - 85	10 - 15	5	1200	3
AGS 90	90 - 95	0 - 5	5	1200	3

Os agregados graúdos otimizados, até a presente data, encontram-se ainda em processo análise para patenteamento pela UFPA. Onde as análises realizadas no presente estudo foram apenas uma pequena parcela de um estudo mais abrangente (em andamento) realizado pela mesma instituição. Portanto, como forma de resguardo, informações como fases minerais e composições químicas foram por enquanto preservadas; e teores do RB e sílica (componentes mais relevantes) apresentados em forma de faixas intervalares. De modo semelhante, o processo produtivo e outras informações técnicas são apresentadas de forma resumida no presente estudo.

#### 2.2.4 Produção dos agregados sintéticos

Os agregados de resíduo de bauxita foram obtidos a partir do processo de produção apresentado na Figura 3, obtendo os produtos finais demonstrados na Figura 4. Os agregados foram produzidos em parceria com alunos da Faculdade de Engenharia Química ( FEQ). O Organograma abaixo demonstra o processo produtivo realizado.

**Figura 4** – Organograma de produção dos agregados graúdos sintéticos.



**Figura 5** - Amostra de agregados graúdos sintéticos otimizados



As amostras apresentam a forma alongada e lamelar com a presença de grãos irregulares, além da superfície relativamente rugosa com diâmetro máximo característico de 19mm. Os agregados foram submetidos a caracterizações físico-mecânicas realizadas também no seixo, descritas na tabela 1.

### 2.2.5 Dosagem e produção do concreto

Com a utilização do método IPT/EPUSP ( Instituto de Pesquisas Tecnológicas/Escola Politecnica da Universidade de São Paulo) foram realizadas as dosagens dos concretos produzidos para o estudo, os parâmetros adotados estão apresentadas na tabela 4 e a dosagem final está apresentada na tabela 5. Além das curvas de dosagens presents nas figuras 5,6,7 e 8.

**Tabela 4** – Parametros iniciais adotados.

Relação - kg/kg (cimento : agregados)	<sup>1</sup> $\alpha$ (%)	<sup>2</sup> Relação a/c	Slump (mm)	Conteúdo de AGS (%)
1 : 5,0	51 ≤	≤ 0,65	100 ± 20	100

<sup>1</sup> Teor de argamassa

<sup>2</sup> Para a classe de agressividade I, de acordo com ABNT NBR 6118:2014 [42].

**Tabela 5** – Características finais de dosagem

Concreto	Relação (cimento : agregados)	$\alpha$ (%)	Relação A/c	agregado (%)		Slump (mm)
				<sup>3</sup> Natural	Sintético	
REF	1 : 5,0	51	0,55	100	0	≈ 90
AGS 70	1 : 5,0	55	0,65	0	100	
AGS 80	1 : 5,0	59	0,65	0	100	
AGS 90	1 : 5,0	61	0,65	0	100	

<sup>3</sup> Seixo Rolado.

Cabe destacar que a utilização do CP IV – RS (pozolânico) deveu-se ao intuito de análise do agregado graúdo sintético com este tipo cimento, a mitigação de possíveis reações álcali-agregado (indesejadas) nos concretos, da maior disponibilidade do mesmo no comércio regional e da quantidade limitada de agregados para estudos paralelos com outros tipos de cimento Portland.

Foram produzidos além de concretos compostos com os agregados sintéticos, foi produzido também o concreto com seixo rolado com o propósito de utilizá-lo como referência para comparação com os demais

Devido às diferentes taxas de absorção de água apresentadas pelos agregados sintéticos, o concreto requereu diferentes teores de argamassa para alcançar os parâmetros desejados. Durante os ensaios de consistência, trabalhabilidade, segregação e coesão também foram levados em consideração devido a intenção de utilizar o concreto em estruturas (pilares, vigas e lajes).

A Figura 6 demonstra um exemplo de um dos concretos produzidos durante a pesquisa.

**Figura 6** – Exemplo de concreto produzidos



### 3 Resultados e discussões

#### 3.1 Caracterização do Material

##### 3.1.1 Materiais primários

As tabelas 6, 7, e 8 apresentam a caracterização dos materiais primários: areia, seixo e agregados graúdos sintéticos.

**Tabela 6** – Caracterização do seixo

Agregado	Massa Unitária (Kg/dm <sup>3</sup> )	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de Finura (mm)	Diâmetro Máximo (mm)
Seixo	1,52	2,6	6,44	19

**Tabela 7** – Caracterização agregado miúdo natural

Agregado	Massa Unitária (Kg/dm <sup>3</sup> )	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de Finura (mm)	Diâmetro Máximo (mm)
Areia	2,33	1,68	2,08	4,75

**Tabela 8** – Caracterização agregado AGS-70

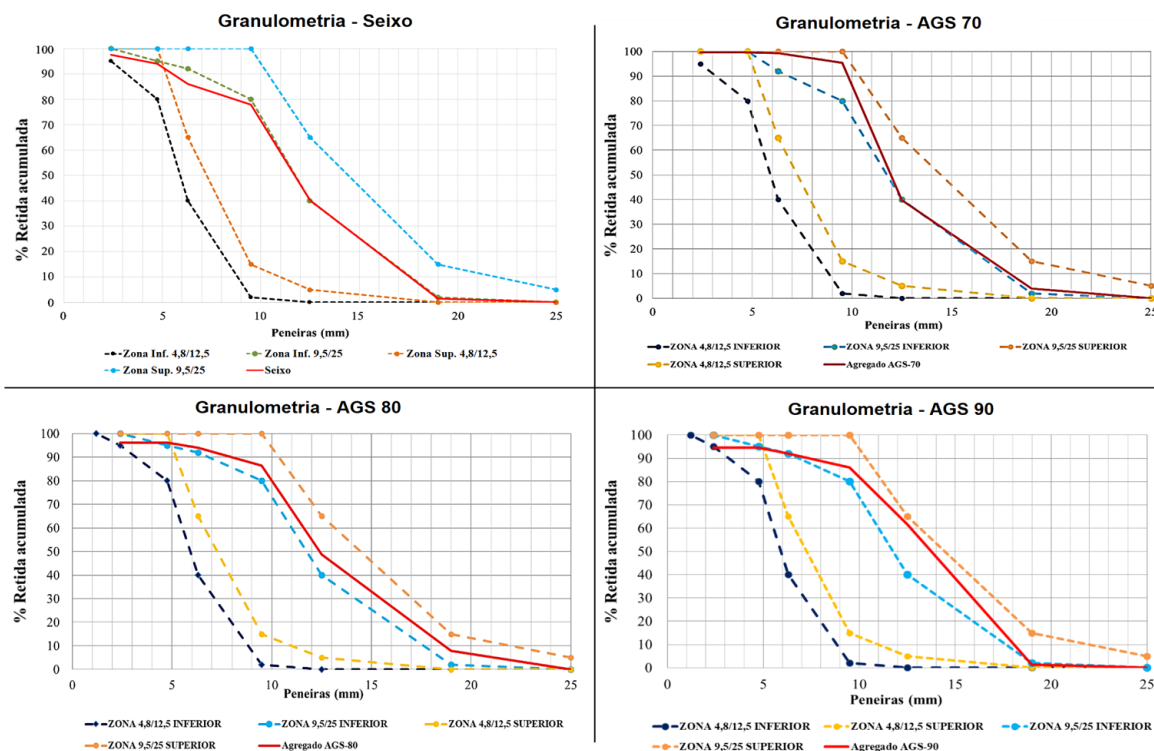
Agregado	Massa Unitária (Kg/dm <sup>3</sup> )	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de Finura (mm)	Diâmetro Máximo (mm)
AGS 70	1,68	2,32	6,97	19

**Tabela 9** – Caracterização agregado AGS-80

Agregado	Massa Unitária (Kg/dm <sup>3</sup> )	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de Finura (mm)	Diâmetro Máximo (mm)
AGS 80	1,62	2,11	6,71	19

**Tabela 10** – Caracterização agregado AGS-90

Agregado	Massa Unitária (Kg/dm <sup>3</sup> )	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de Finura (mm)	Diâmetro Máximo (mm)
AGS 90	1,4	1,79	6,55	19

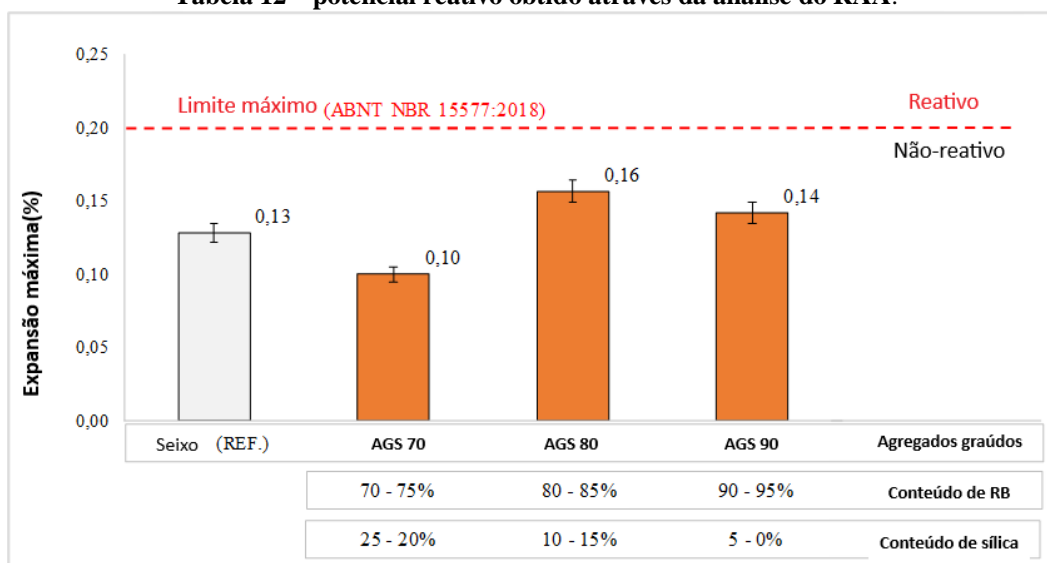
**Tabela 11** - Curva granulometrica dos materiais primários

As curvas granulométricas dos AGS com diferentes porcentagens de resíduo de bauxita revelam a influência da composição no empacotamento e na distribuição das partículas. O AGS 70 apresentou uma maior proporção de partículas finas, melhorando a coesão da mistura. O AGS 80, com uma curva mais equilibrada, sugere um agregado bem distribuído, o que proporciona boa trabalhabilidade e empacotamento. Já o AGS 90 exibiu uma granulometria mais similar ao seixo, com partículas maiores, porém com uma distribuição ligeiramente mais fina, indicando uso para misturas mais coesas e menos densas.

### 3.1.2 Agregado Sintético

Os resultados da caracterização dos agregados sintético estão apresentados nas tabelas 13 e 14.

**Tabela 12 – potencial reativo obtido através da análise do RAA.**



A partir da análise acerca dos respectivos potenciais reativos dos agregados, todas as 3 amostras foram aceitáveis segundo os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 15577:2018 [29] sem alcançar o limite de reatividade, como desejado. Portanto, todas ficaram abaixo do limite normativo, logo, ficaram caracterizadas como inócuas.

Assim como pretendido, o cimento CP IV – RS utilizado, mitigou possíveis reações álcali-agregados nas amostras analisadas, dessa forma resguardando os concretos analisados de sofrer influência deste fenômeno indesejado durante os estudos.

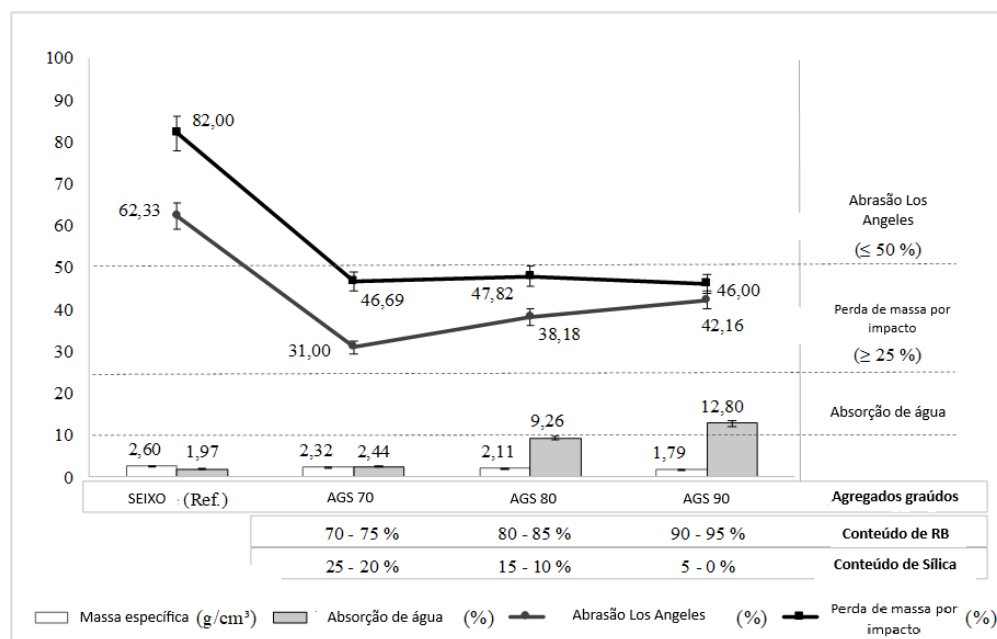
De acordo com Ribeiro *et al.* (2012) há, de sobremodo, uma certa preocupação quando o RB é exposto às matrizes cimentícias já que o resíduo apresenta elevado teor de álcalis, principalmente o sódio, que pode favorecer a ocorrência da reação álcali-sílica.

O mesmo autor afirma também que a mitigação da reação está ligada a certa quantidade de adições pozolânicas no cimento, que pode ser suficiente dependendo do nível de reatividade apresentada pelos agregados analisados.

Os resultados demonstram que apesar das amostras serem inócuas, elas demonstraram uma tendência de crescimento no aumento no teor de resíduo de bauxita e decréscimo no teor de sílica.

Os autores [44] e [45] afirmam que para a ocorrência da reação álcali-sílica, uma quantidade de sílica é necessária para reagir com a quantidade de agregados reativos na matriz cimentícias. Esses fatores não são diretamente proporcionais ou lineares a ocorrência do fenômeno.

**Tabela 13** – Caracterização físico-mecânica dos agregados graúdos. Variáveis intrínsecas.



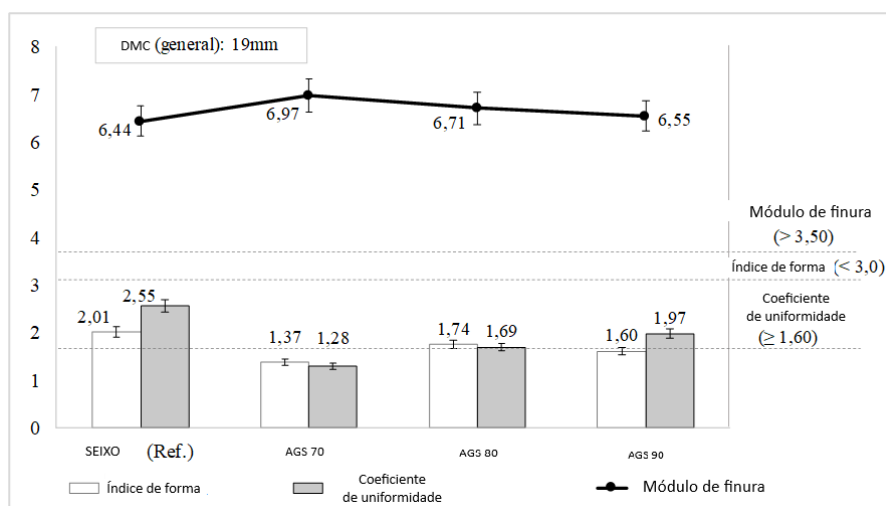
A partir da caracterização dos agregados produzidos, primeiramente em relação a resistência a abrasão e perda de massa, nota-se que todos os agregados alcançaram as especificações normativas. Além disso, pode-se enfatizar que a amostra do AGS 70 apresentou uma maior

resistencia a abrasão, perdendo menos massa durante o ensaio. De acordo com [12], essas duas características mecânicas estão relacionadas a quantidade de sílica que compõe o agregado, uma vez que a sílica devido a suas propriedades, oferece uma maior resistência mecânica.

Atentando-se à absorção de água dos agregados, nota-se que a amostra AGS 70 obteve o menor resultados dentre os sintéticos e não estando distante ao do agregado natural (seixo). Já o AGS 80 e principalmente o AGS 90, que ficou acima da recomendação (DIN 4226:2002 [46]; WBTC n.12/2002 [47]), apresentaram elevadas absorções quando comparadas aos demais citados. Nota-se que a absorção dos agregados sofreu influência da variação do teor de RB e sílica. Conforme estudos de [48] e [49], o aumento do teor sílica na composição faz com que a camada vítrea presente nos agregados se torne mais espessa, dessa forma diminuindo a quantidade de poros e a absorção de água consequentemente. Segundo [50], os agregados graúdos produzidos por meio do processo de sinterização podem também apresentar porosidade aberta, elevada capacidade de absorção de água e não possuir recobrimento.

Com relação às massas específicas dos agregados, excluindo o AGS 90, e apesar de diferentes, ficaram acima dos  $2,0\text{g/cm}^3$ , dessa forma estando na categoria de agregados de densidade normal. Esta variação na massa específica foi esperada, uma vez que o aumento no teor de sílica presente na composição do agregado, como já mencionado, acarretou no fechamento dos poros e como consequência também causa um aumento da densidade do mesmo (ex.: AGS 70)

**Tabela 14** – Caracterização físico-mecânica dos agregados sintéticos. Variáveis granulométricas



De acordo com os dados granulométricos, o índice de forma dos agregados classificam-os como alongados lamelares de acordo com a ABNT NBR 7809:2019 [31]. Baseado no coeficiente de uniformidade dos agregados, com uma exceção para o AGS 70, eles apresentaram uma granulometria não uniforme (de acordo com [13], sendo favoráveis a concreto).

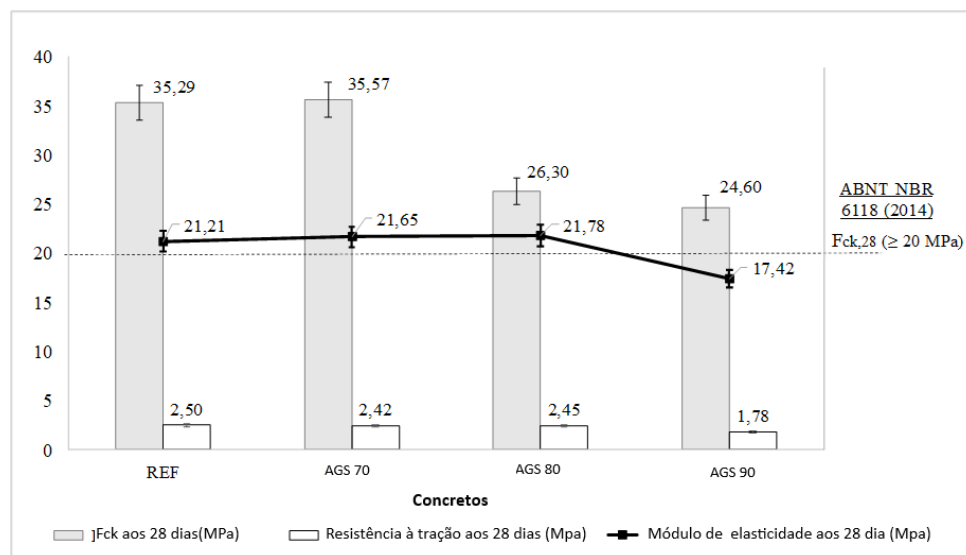
Os módulos de finura dos agregados obtiveram valores bastante similares e consistentes mediante as especificações técnicas apresentadas previamente. Enfatiza-se que devido ao processo de conformação ao qual foram submetidos os agregados durante a produção, todos alcançaram o diâmetro máximo de 19mm.

### 3.2 Caracterização físico-mecânica do concreto

#### 3.2.1 Propriedades mecânicas

Os gráficos das tabelas 15 e 16 enfatizam os resultados médios dos ensaios de caracterização físico mecânicas dos concretos.

**Tabela 15 – Caracterização Mecânica dos concretos**

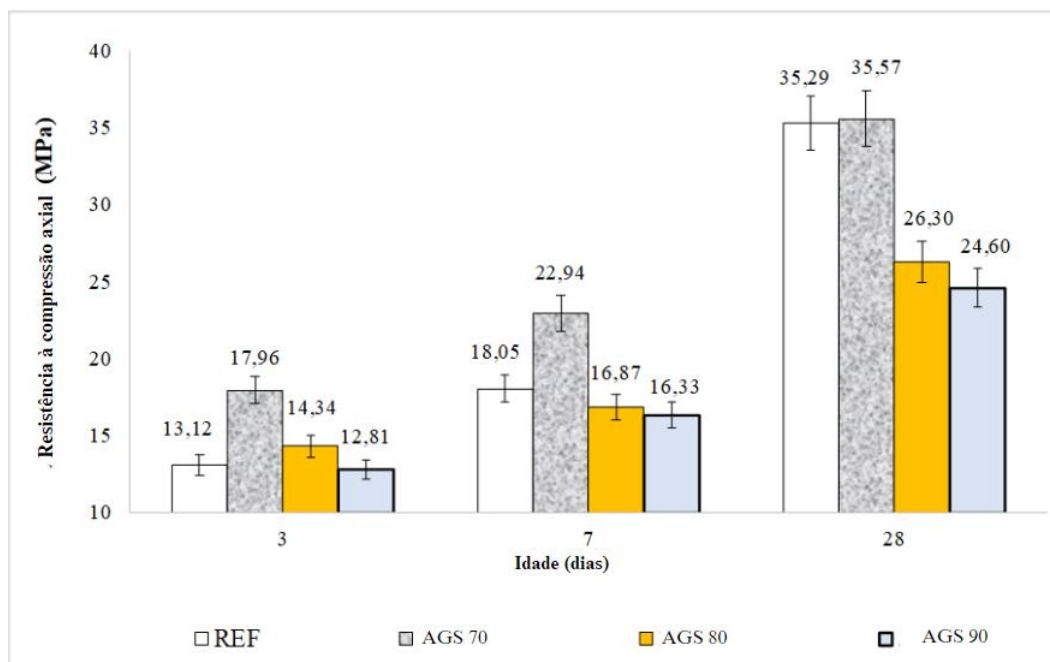


De acordo com os resultados mostrados na tabela 15, a resistência de compressão axial dos concretos com 28 dias ( $f_{ck,28}$ ), alcançaram o padrão de especificação da ABNT NBR 6118:2014 [42] e resistiram acima dos 20MPa. A partir das orientações, os concretos

alcançaram valores na categoria de concreto estrutural de acordo com as normas. Evidencia-se também que o AGS 70 chegou aos valores de resistência mais altos juntos ao concreto compost pelo agregado natural (REF).

Com relação à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade estático, os concretos, exceção do AGS 90, assumiram valores um tanto semelhantes e de pouca variabilidade, apesar dos diferentes teores de argamassa, proporções de água e resistências a compressão axial dos concretos.

**Tabela 16** – Desenvolvimento da resistência à compressão axial dos concretos, ao longo do tempo.



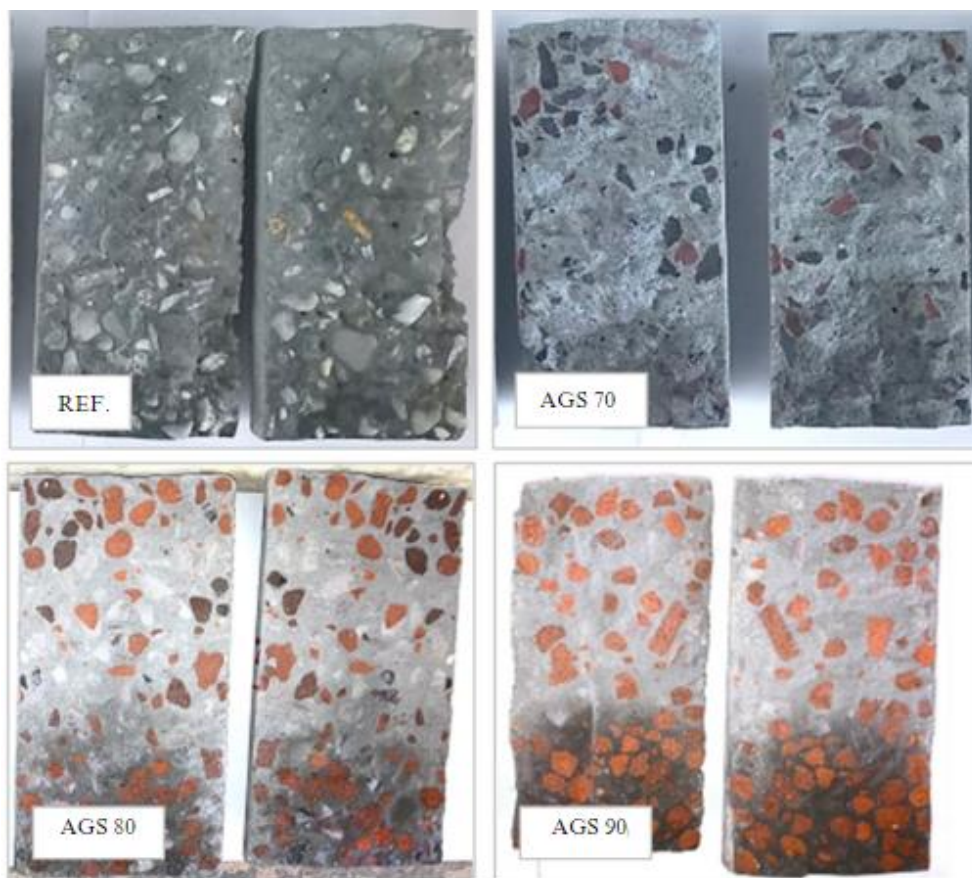
Analisando-se o desempenho mecânico dos concretos ao longo do tempo (Tabela 16), percebe-se que, apesar das diferenças nos teores de argamassa, o desenvolvimento inicial da resistência à compressão do REF, AGS 80 e AGS 90 (aos 3 e 7 dias) mostraram-se próximas enquanto o com AGS 70 foi e continuou superior aos demais desde o princípio. Na idade de 28 dias o AGS 70 e REF apresentaram resistências muito próximas, os concretos com AGS 80 e AGS 90 assumiram valores também com certa proximidade entre eles, porém menores na mesma idade final.

Estudos de [12], que teve como foco a produção de concretos com agregados sintéticos de RB, afirma que o incremento na resistência à compressão axial pela utilização de tal agregado

(ex.: AGS 70) é atribuído ao menor desgaste à abrasão apresentada pelo mesmo. A melhoria das propriedades mecânicas do concreto, ao utilizar-se agregados sintéticos de RB, também está ligada à elevação do teor de sílica na composição deste agregado [12].

Com relação ao comportamento mecânico conjunto dos agregados graúdos e a matriz cimentícia, pode-se observar (Figura 7) que houve a ruptura dos agregados sintéticos nos concretos que os detinham em sua composição, durante o ensaio de resistência à compressão axial.

**Figura 7**– Faces internas dos corpos de provas rompidos por compressão diametral

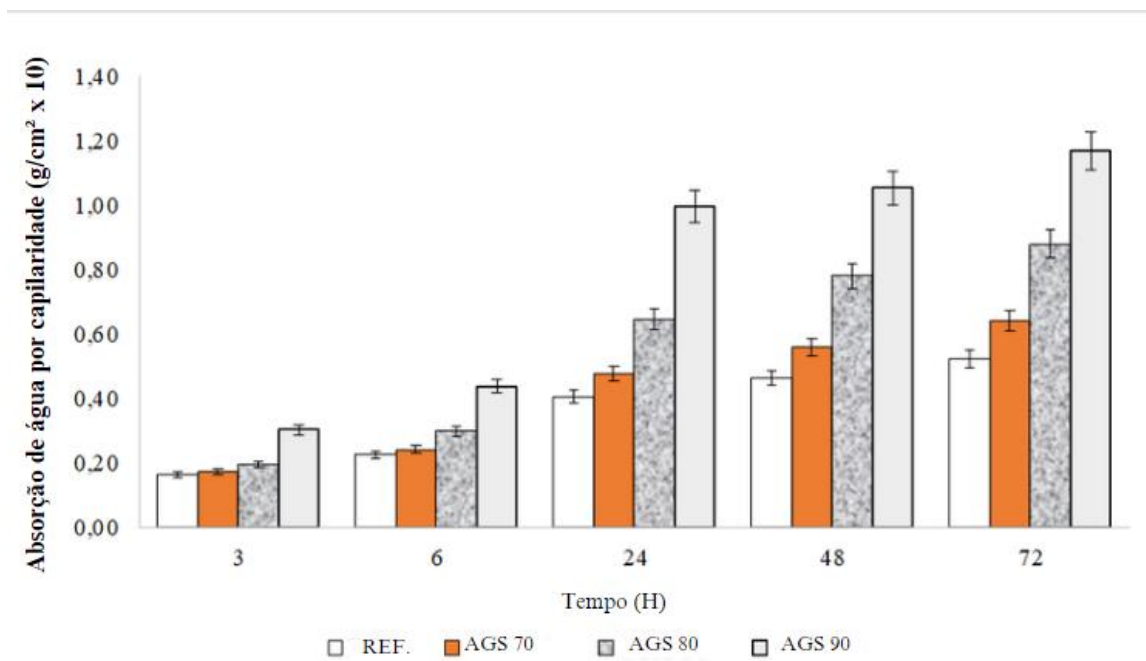


Nota-se também que no concreto com seixo (REF), a ruptura se deu quase que de forma plena na matriz cimentícia, ao contrário dos demais concretos. Dessa forma torna-se nítido que, apesar de algumas resistências semelhantes (ex.: REF e AGS 70), os agregados sintéticos de forma geral analisados possuíam resistência mecânica menor que a matriz cimentícia dos seus respectivos concretos.

### 3.2.2 Absorção de água por capilaridade

Em relação ao ensaio de absorção de capilaridade, os concretos apresentaram os resultados médios explicados nos gráficos das tabelas 17, 18 e 19.

**Tabela 17** – Absorção de água por capilaridade de concretos com o tempo.

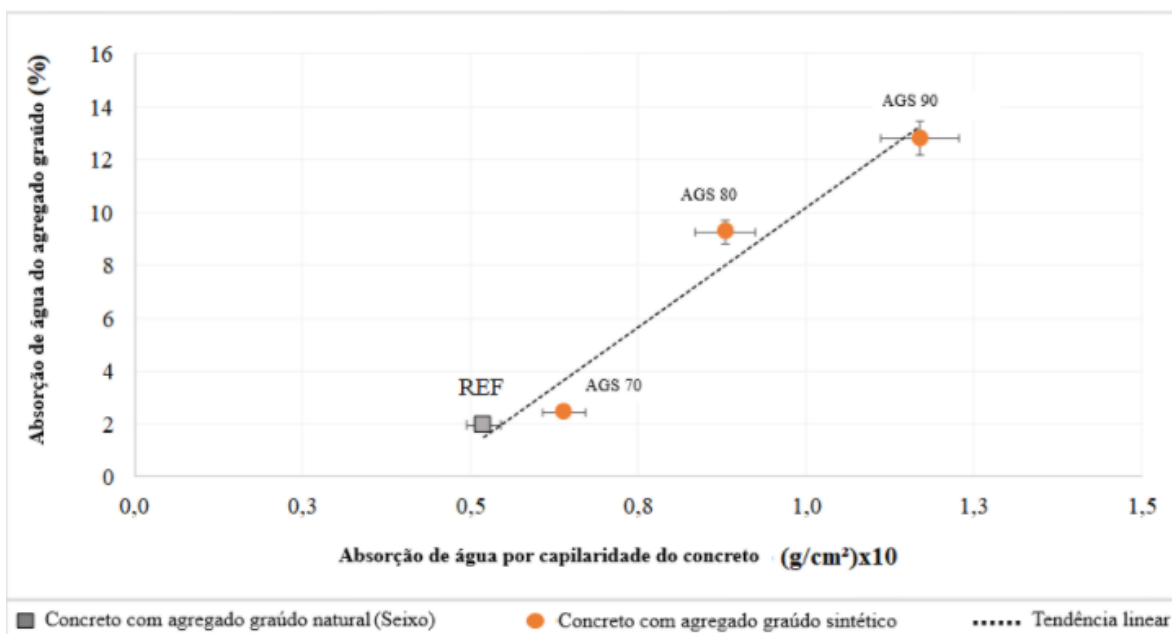


Como apresentado na tabela 17, a absorção final por capilaridade dos concretos tiveram comportamentos distintos e crescente da Referência, seguido dos AGS 70,80 e 90.

Nas primeiras 24h de teste, evidenciou-se a diferença de absorção, tendo o concreto composto pelo AGS 70 uma menor absorção dentre os compostos por agregados sintéticos obtendo valores aproximados ao traço com agregados naturais, apesar da diferença do teor de argamassa.

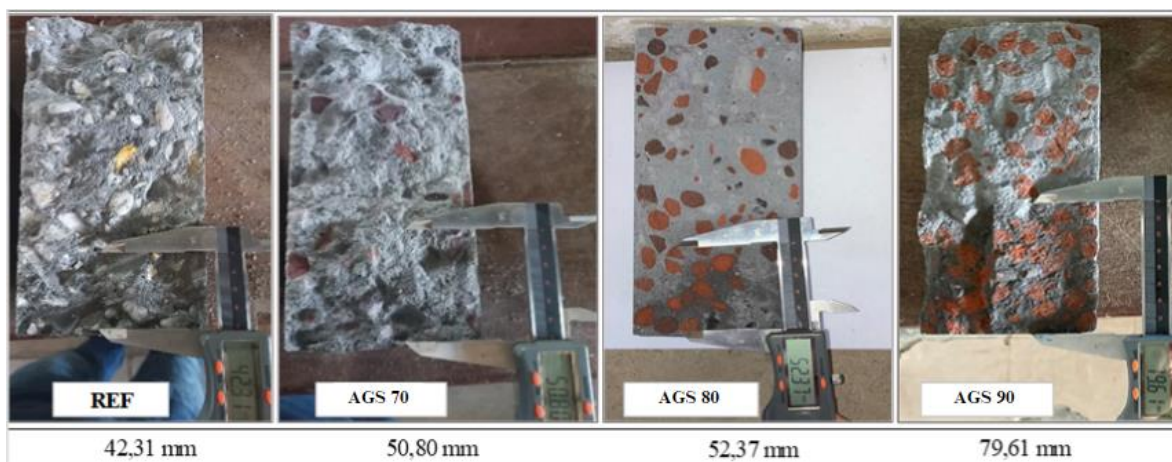
Enfatiza-se que a absorção por capilaridade dos concretos obtiveram valores proporcionais com a absorção dos agregados com demonstradas na tabela 18.

**Tabela 18** – correlação entre a absorção por capilaridade do concreto e dos agregados



A respeito da lâmina de água por capilaridade dentro dos corpos de prova (Figura 14), apresentou-se de maneira similar entre os traços referência e os AGS 70, 80 e 90, apresentando uma tendência ao crescimento linear. Como esperado, o concreto composto pelo AGS 70 apresentou o menor crescimento da lâmina d'água entre todos os corpos de prova.

**Figura 8** – Crescimento de água dentro dos corpos de prova



Como evidenciado na caracterização dos agregados, fatores que influenciaram nas diferenças de absorção reenfaz-se a quantidade de sílica presente no agregado. De acordo com [51] e [52], o formato lamelar angular e pequenas mudanças no índice de forma dos agregados

também podem ocasionar mudanças na reologia do concreto que afetaria na diferença das porosidades.

Conforme estudos de [53], a absorção capilar, embora não ser parâmetro oficial da qualidade dos concretos, grande parcela dos “bons” concretos possuem absorção de água abaixo dos 10% em massa, e os de alta qualidade mostram-se menores que 5% [54].

Destaca-se 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 [51] e [52].

Conforme [51] a porosidade do agregado, e como consequência a sua absorção, influi também na absorção no concreto, afetando assim a demanda de água para adquirir determinada trabalhabilidade e posteriormente influenciando diretamente a resistência mecânica do mesmo.

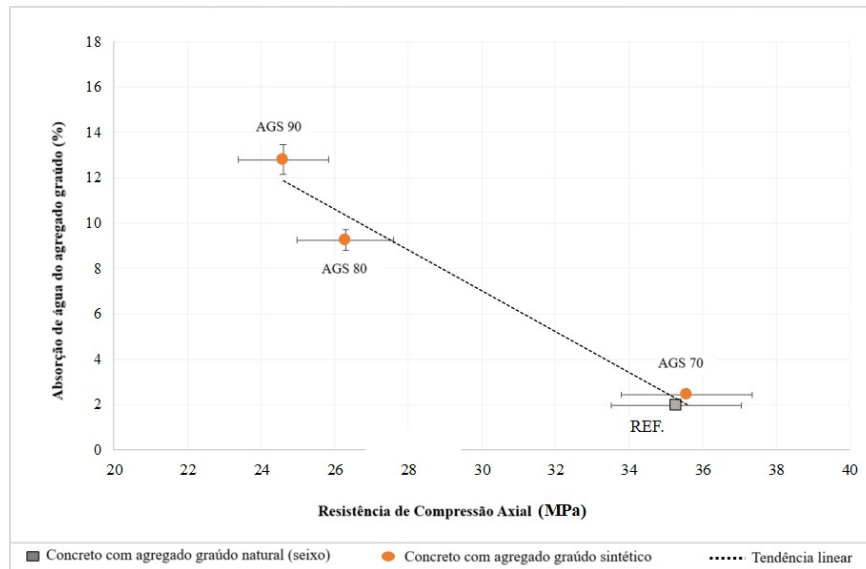
### **3.3 Correlações**

Tratando-se de características potencialmente relevantes dos concretos e agregados respectivamente, pode-se destacar a resistência mecânica e a porosidade. Tais características podem ser evidenciadas na correlação da tabela 19, na qual mostra uma tendência linear inversamente proporcional entre a resistência à compressão axial dos concretos e a absorção de água dos agregados graúdos.

Desse modo percebe-se que a absorção de água dos agregados sintéticos não somente influenciou na absorção capilar dos concretos (como visto anteriormente) mas também na resistência mecânica dos mesmos.

Conforme [55] e [56], a absorção por capilaridade é um bom indicativo das condições da porosidade da superfície do concreto, e por ventura também da sua resistência mecânica e durabilidade.

**Tabela 19** – aumento da água por capilaridade nos corpos de provas



Em estudos, [57] afirma a utilização de agregados artificiais porosos com absorção de água superior à da matriz cimentícia podem resultar em um decréscimo na sua durabilidade devido ao aumento da permeabilidade nos concretos, e ainda servir de indicativo para uma análise qualitativa da sua resistência mecânica.

#### 4 CONCLUSÕES

- Mediante os resultados apresentados e as respectivas discussões, pode-se concluir que os agregados sintéticos compostos de resíduo de bauxita alcançaram os padrões das especificações técnicas para o uso em concretos estruturais, contribuindo para os propósitos mecânicos requeridos. Além disso, outras conclusões específicas foram evidenciadas, como:
- Os agregados sintéticos não reagiram ao ensaio de reação álcali-agregado, logo, se caracterizando como inócuos.

- As características inerentes dos agregados (AGS 70 e AGS 80) alcançaram resultados satisfatórios de acordo com as especificações para o uso em concretos estruturais. A única exceção foi o agregado AGS 90, que foi recusado devido aos valores de absorção de água.
- A reologia do concreto apresentaram comportamentos diferentes devido à absorção divergente dos agregados, requerindo mudanças no teor de argamassa para apresentar consistência normativa, trabalhabilidade e coesão apropriadas para o propósito estrutural (pilar, vigas e lajes).
- A resistência a compressão diametral (28 dias), chegaram à valores acima dos 20Mpa estabelecidos pela norma ABNT NBR 6118 (2014) 43[41], portanto, denominando-se concretos estruturais para ambientes com graus de agressividade. O concreto composto pelo AGS 70 obteve a melhor performance dentre os compostos com agregados sintéticos.
- A absorção de água por capilaridade dos concreto apresentaram comportamento similar à tendência linear, aumentando. O concreto composto pelo agregado AGS 70 apresentou melhores resultado devido a menor absorção por capilaridade.

## **ACKNOWLEDGEMENTS**

Hydro Alunorte (Pará, Brazil)

ITEC/UFPA - Institute of Technology of the Federal University of Pará.

PROPESP/UFPA - Pro-rectory Research and Graduate Studies at the Federal University of Pará.

PPGEC/UFPA – Postgraduate Program in Civil Engineering at the Federal University of Pará.

## **REFERENCES**

- [1] IEB – Instituto de Engenharia. Revista Engenharia [online], ano 76, nº. 641, São Paulo - SP, Brasil. Imprensa Editorial LTDA, julho/2019. Disponível em:

- <https://www.institutodeengenharia.org.br/site/2019/09/24/edicao-641/> (acesso: 15/12/2022).
- [2] OLIVEIRA, L. S.; ÂNGULO, S. “Entrevista - Agregados, meio ambiente e o desafio da economia circular (2020)”. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP. Disponível em: <http://cics.prp.usp.br/wp-content/uploads/2020/07/entrevista-Agregado-e-Meio-Ambiente-diagramado-.pdf> (acesso: 20/12/2022).
- [3] 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.
- [4] ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. ”Alumínio Brasileiro: Soluções para uma vida sustentável”. Publicação própria. São Paulo - SP, 2017. 66p. Disponível em: <http://abal.org.br/manifesto-do-aluminio/downloads/ABAL-Aluminio-Sustentavel.pdf> (acesso: 15/08/2022).
- [5] POWER, G., GRÄFE, M., KLAUBER, C., “Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices”. *Hydrometallurgy* 108, pp. 33–45. 2011.
- [6] EVANS, K., NORDHEIM, E., TSESMELIS, K., “Bauxite Residue Management “, *Light Metals 2012*, pp63-66, TMS, Wiley, Orlando, 2012.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [11] ROSSI, C. R. C. “Concretos para reparo com agregados de lama vermelha sob abrasão hidráulica”. 2009. Trabalho de conclusão de curso. (Especialização em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.
- [12] ROSÁRIO, K. A. “Concreto com utilização de agregado graúdo sintético produzido a partir da lama vermelha: estudos de dosagem, propriedades e microestrutura”. Programa de Pós-graduação em engenharia civil. Belém, PA; 2013.
- [13] 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.

- 
- [14] AIRES, M. F. M. & PAIVA A. E. M. – “Utilização de agregados graúdos sintéticos de lama vermelha e argila em concretos”. 58° Congresso Brasileiro de Cerâmica, Bento Gonsalves, RS, 2014.
- [15] MUDGAL. M.; CHOUHAN, R.; VERMA, S.; AMRITPHALE, S.; DAS. S.; SHRIVASTVA, A. *Radiochemical Acta*, 106 (2018) 59.
- [16] 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.
- [17] SUN, Y. et al. “Production of lightweight aggregate ceramist from red mud and municipal solid waste incineration bottom ash: Mechanism and optimization”. *Construction and Building Materials, Journal*, 287 (2021) 122993.
- [18] TIAN, K.; WANG, Y.; HONG S.; ZHANG, J.; HOU, D.; DONG, B.; XING, F. *Construction and Building Materials, Journal*, 281 (2021) 122552.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] ABNT NBR 16605 (2017): Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.
- [23] ABNT NBR 16607 (2018): Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega.
- [24] ABNT NBR 11579 (2012): Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200).
- [25] ABNT NBR 16916 (2021): Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água.
- [26] ABNT NBR 16972 (2021): Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios.
- [27] ABNT NBR NM 248 (2003): Agregados - Determinação da composição granulométrica.

- 
- [28] ABNT NBR 14656 (2001): Cimento Portland e matérias-primas - Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio.
- [29] ABNT NBR 15577 (2018): Agregados - Reatividade álcali-agregado - Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto.
- [30] ABNT NBR 16917 (2021): Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água.
- [31] ABNT NBR 7809 (2019): Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio.
- [32] ABNT NBR 16974 (2021): Agregado graúdo - Ensaio de abrasão Los Angeles.
- [33] 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).
- [34] 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.
- [35] SOUZA, J. A. da S.; MACÊDO, A. N.; MONTINI, M. “Agregado sintético de resíduo de bauxita para a construção civil: produção e caracterização”. Relatório Interno 02 - materiais de partida: análises e caracterização. Não Publicado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos. UFPA/PROPESP/HYDRO ALUNORTE. Belém-PA, 2021.
- [36] RASHAD, A.M. “Lightweight expanded clay aggregate as a building material – An overview”. *Construction and Building Materials*, 170, p. 757–775, March, 2018.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] ABNT NBR 10005 (2004): Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido.
- [40] ABNT NBR 10006 (2004): Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.

- 
- [41] HELENE, P.; TERZIAN, P. “Manual de dosagem e controle do concreto”. São Paulo: Pini; Brasília - DF: SENAI, 1993.
- [42] ABNT NBR 6118 (2014): Projeto de estruturas de concreto — Procedimento.
- [43] 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.
- [44] BICZÓK, I. “Corrosión y Protección del Hormigón”. 6. ed. Bilbao: Urmo, 1972.
- [45] HOBBS, D.W. “Alkali-silica reaction in concrete”. London: Thomas Telford, 1988.
- [46] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 4226-100: Aggregates for Concrete and Mortar, Part 100: Recycled Aggregates. Germany, 2002.
- [47] WORKS BUREAU TECHNICAL CIRCULAR. WBTC No.12: Specifications facilitating the use of recycled aggregates, Hong-Kong, 2002.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] SANTOS, M. E. et al. “Argila expandida como agregado para concreto leve”. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON. 1986. São Paulo. Reunião...São Paulo, 1986.
- [51] 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.
- [52] NEVILLE, A M. “Propriedades do concreto”; 2ª edição São Paulo: Pini, São Paulo - SP, 1997.
- [53] 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.

**Author contributions:** MSP: Orientation, formal analysis; MMF: methodology and operational; MCDR: methodology and operational; MM: coordination, conceptualization and financing.

**Editors:** [Associate Editor Name](#), Guilherme Aris Parsekian.