



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**JEMIMA TABITA FERREIRA DE SOUSA**

**PROPRIEDADES DE CONCRETOS LEVES AUTOADENSÁVEIS COM**  
**AGREGADOS LEVES ARTIFICIAIS PRODUZIDOS A PARTIR DA CALCINAÇÃO**  
**DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAL E DE MINERAÇÃO**

**NATAL/RN**

**2020**

JEMIMA TABITA FERREIRA DE SOUSA

PROPRIEDADES DE CONCRETOS LEVES AUTOADENSÁVEIS COM AGREGADOS  
LEVES ARTIFICIAIS PRODUZIDOS A PARTIR DA CALCINAÇÃO DE RESÍDUOS  
AGROINDUSTRIAL E DE MINERAÇÃO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito final à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – ênfase em Materiais e Processos Construtivos.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos

NATAL/RN

2020

Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN  
Sistema de Bibliotecas – SISBI  
Catalogação de Publicação da Fonte. UFRN – Biblioteca Central Zila Mamede

Sousa, Jemima Tabita Ferreira de.

Propriedades de concretos leves autoadensáveis com agregados leves artificiais produzidos a partir da calcinação de resíduos agroindustrial e de mineração / Jemima Tabita Ferreira de Sousa. - 2021.

86 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Natal, RN, 2021.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos.

1. Concreto leve autoadensável (CLAA) - Dissertação. 2. Agregados leves artificiais - Dissertação. 3. Resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC) - Dissertação. 4. Resíduo da produção de scheelita (RPS) - Dissertação. 5. Durabilidade - Dissertação. I. Anjos, Marcos Alyssandro Soares dos. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624.012.45

JEMIMA TABITA FERREIRA DE SOUSA

PROPRIEDADES DE CONCRETOS LEVES AUTOADENSÁVEIS COM AGREGADOS  
LEVES ARTIFICIAIS PRODUZIDOS A PARTIR DA CALCINAÇÃO DE RESÍDUOS  
AGROINDUSTRIAL E DE MINERAÇÃO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito final à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – ênfase em Materiais e Processos Construtivos.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos – Orientador (UFRN)

---

Prof. Dr. Ênio Fernandes Amorim – Examinador Interno (UFRN)

---

Prof. Dr. Valtencir Lúcio de Lima Gomes – Examinador Externo (IFRN)

**Natal, 29 de outubro de 2020.**

“Tu criaste o íntimo do meu ser e me teceste no ventre de minha mãe. Eu te louvo porque me fizeste de modo especial e admirável. Tuas obras são maravilhosas! Disso tenho plena certeza.” (Salmos 139:13-14)

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus que durante todo o trabalho esteve ao meu lado, me fortalecendo, sustentando e providenciando os meios para realização de mais uma etapa na minha vida e colocando pessoas maravilhosas à minha volta. Que todo conhecimento aqui adquirido seja usado para servir ao próximo, mostrando que existe um Pai soberano que cuida individualmente de cada um de nós;

Aos meus pais, Kleber e Fátima, por todos os ensinamentos até aqui, mostrando desde cedo que o estudo e o conhecimento eram as únicas heranças de valor que poderiam deixar, por todos os conselhos e por sempre apoiar minhas decisões, repreendendo quando não eram as melhores, por todo suporte material e emocional e, principalmente, por todo amor e dedicação empenhados para minha formação como pessoa;

Ao meu irmão, Miqueias, pela compreensão durante esse período, por estar sempre ao meu lado, compartilhando momentos e experiências, e sempre me ajudando quando necessário;

A todos os meus familiares e amigos por todo apoio e palavra de motivação e, principalmente, por compreenderem quando não pude me fazer presente;

Ao professor e orientador Marcos Alyssandro, pela dedicação, disponibilidade, por estar sempre disponível, por todo incentivo e, principalmente, por toda a paciência e compreensão. Muito obrigada professor, o senhor é um exemplo de orientador, pesquisador e professor;

À professora e colega Evilane Cássia, por toda ajuda, esforço, orientação e sacrifício em prol desse trabalho, sendo quase uma co-orientadora no desenvolvimento da pesquisa. Toda palavra de agradecimento a você ainda será pouco. Muitíssimo obrigada;

Aos companheiros de laboratório que foram a força motriz dessa pesquisa e por tornarem um trabalho árduo em algo prazeroso e leve, meu muito obrigada à vocês, Maelson, Nathaly, Pedro, Amanda, Alan, Ivelton, Jeremias, Igor e Raynara, pelos dias de muito trabalho, mas também de muitas histórias compartilhadas e risadas;

Aos professores Ênio Amorim, Valtencir Gomes, Luciana Figueiredo e Andreza Nóbrega pelas contribuições para enriquecimento do trabalho, pela leitura e todas as sugestões de correção na qualificação e defesa desse trabalho;

Aos colegas de mestrado que compartilharam essa fase juntamente comigo e que tornaram o caminho até aqui mais leve, por todo o companheirismo e convivência, Deize, Rayanderson, Jennef, Débora, Wesley, Ana Lígia, Maria Cecília e Luane;

Ao pessoal dos laboratórios de construção civil da Diacon do IFRN – Natal Central (Nathana, Gian e Ricardo), do laboratório de construção civil do IFRN – São Paulo do Potengi (Arthur), do laboratório de ensaios mecânicos da UFRN (Sandro), do laboratório de materiais cerâmicos (prof. Paskocimas e Roberto), do laboratório de cimentos – LabCim (prof. Martinelli, Fabrício e Paulo Henrique), do laboratório de Nutrição Animal da EAJ-UFRN (Randerson) e do laboratório de metais e ensaios mecânicos da UFRN (Hudson). Meu muito obrigada, pois não seria possível chegar até aqui sem a ajuda e disponibilidade de todos vocês;

Aos professores da graduação Ítalo Vale e Cláudia Cruz, por todo incentivo, conselhos e apoio antes e durante o mestrado. Também aos professores Fagner França, Reymard Sávio e Osvaldo de Freitas do PEC pela acessibilidade e confiança dada;

A secretaria do PEC, na pessoa de Viviane, por todo o cuidado, atenção e disponibilidade, sempre auxiliando e ajudando da melhor forma possível;

Ao PEC e à UFRN por possibilitar a realização de mais um sonho e pelo crescimento acadêmico-profissional concedido;

A todos os demais que contribuíram para a conclusão dessa caminhada, de maneira direta ou indireta, deixo aqui meu muito obrigada!

“Se o conhecimento estivesse ao alcance da mão e pudesse ser encontrado sem qualquer dificuldade, seria certamente negligenciado. Tudo que é nobre é tão difícil quanto raro.”

Baruch Spinoza

## RESUMO

O concreto autoadensável (CAA) apresenta-se como um importante exemplo de nova tecnologia e alternativa ao uso do concreto convencional. Os parâmetros reológicos demonstrados por esse tipo de concreto, proporcionam alta fluidez e coesão que resultam na habilidade de preenchimento e resistência à segregação, além da otimização dos processos de concretagem e redução nos custos com mão de obra. Atualmente, em decorrência da falta de solo resistente para suportar cargas das edificações em aglomerações urbanas, estudos têm sido realizados em busca de possibilidades que resultem em um menor peso para a estrutura, assim como facilidade de transporte, execução e propriedades termoacústicas. O concreto leve autoadensável (CLAA) surge então, como uma possível alternativa por agrupar os benefícios do CAA e do concreto leve estrutural (CL). Na produção desses concretos, o agregado leve mais utilizado no mundo e no Brasil ainda é a argila expandida, tendo sua produção nacional concentrada na Região Sudeste. Nesse contexto, estudos realizados por Leal de Souza (2019) e Souza (2019), verificaram a viabilidade de se produzir agregados leves a partir da sinterização de resíduos industriais e matérias-primas regionais (Rio Grande do Norte/Brasil), como resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC), resíduo da produção de Scheelita (RPS) e argilas locais. Diante do exposto, o presente estudo elencou alguns dos agregados leves que foram desenvolvidos por Leal de Souza (2019) e Souza (2019), e analisou a influência desses na composição de concretos leves autoadensáveis, averiguando sua eficiência e comportamento em comparação com o CLAA produzido com o agregado leve comercial. Os concretos foram submetidos aos ensaios de caracterização no estado fresco, onde avaliou-se as propriedades de fluidez, viscosidade aparente, estabilidade visual e habilidade passante, através dos ensaios de slump flow, tempo de escoamento ( $t_{500}$ ), índice de estabilidade visual e anel-J, respectivamente, e medição da massa específica fresca. No estado endurecido foram realizados ensaios para determinação das propriedades mecânicas, com o ensaio de resistência à compressão aos 7 e 28 dias, com a aferição da massa específica seca para cada idade, e dos parâmetros de durabilidade através da difusão de íons cloreto. Os resultados obtidos evidenciaram a viabilidade da produção de concretos leves autoadensáveis com agregados leves não convencionais. Tanto no estado fresco quando no estado endurecido, todos os traços atenderam aos requisitos estabelecidos em norma, com massa específica final variando entre 1,94 a 2,03 g/cm<sup>3</sup> e resistência à compressão aos 28 dias entre 36,72 a 26,11 MPa. Os traços com agregados leves de RBC apresentaram desempenho constante e semelhante ao desempenho do concreto com agregado leve comercial, demonstrando ser um material

promissor para utilização em concretos leves autoadensáveis. Ainda, foi constatado que as propriedades físicas dos agregados leves influenciaram nos resultados obtidos no estado fresco e endurecido, tornando o agregado leve o principal responsável por limitar e influenciar nas propriedades dos concretos.

**Palavras-chave:** Concreto leve autoadensável (CLAA), agregados leves artificiais, resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC), resíduo da produção de Scheelita (RPS), durabilidade.

## ABSTRACT

Self-compacting concrete (SCC) is an important example of new technology and alternative to the use of conventional concrete. The rheological parameters demonstrated by this type of concrete, provide high fluidity and cohesion that results in the ability to fill and resistance to segregation, as well as optimize concrete processes and reducing labor costs. Currently, due to the lack of resistant soil to support loads of buildings in urban agglomerations, studies have been carried out in search of possibilities that result in a lower weight for the structure, as well as ease of transportation, execution and thermoacoustic properties. The self-compacting lightweight concrete (SCLC) then emerges as a possible alternative for grouping the benefits of SCC and structural lightweight concrete (SLC). In the production of these concretes, the lightweight aggregate most used in the world and in Brazil is still an expanded clay, with its national production concentrated in the Southeast Region. In this context, studies carried out by Leal de Souza (2019) and Souza (2019), verified the viability of producing lightweight aggregates from the sintering of industrial residues and regional raw materials (Rio Grande do Norte/Brazil), as waste from sugar cane biomass ash (SCBA), scheelite residue (RPS) and local clays. In view of the above, the present study listed some of the lightweight aggregates that were developed by Leal de Souza (2019) and Souza (2019), and analyzed their influence on the composition of self-compacting lightweight concretes, investigating their efficiency and behavior in comparison with SCLC produced with commercial lightweight aggregate. The concretes were subjected to characterization tests in the fresh state, where the properties of fluidity, apparent viscosity, visual stability and passing ability were evaluated, through slump flow tests, flow time ( $t_{500}$ ), visual stability index and J-ring, respectively, and measurement of fresh density. In the hardened state, tests were performed to determine the mechanical properties, with the compressive strength test at 7 and 28 days, with the measurement of the dry density for each age, and the durability parameters through the diffusion of chloride ions. The results obtained showed the viability of producing self-compacting lightweight concrete with unconventional lightweight aggregates. Both in the fresh and in the hardened state, all mixtures met the requirements established in the standard, with final density ranging between 1.94 to 2.03 g/cm<sup>3</sup> and compressive strength at 28 days between 36.72 to 26.11 MPa. The mixtures with lightweight aggregates of SCBA showed a constant performance and similar to the performance of concrete with commercial lightweight aggregate, demonstrating to be a promising material for use in self-compacting lightweight concretes. Still, it was found that the physical properties of the lightweight aggregates

influenced the results obtained in the fresh and hardened state, making the lightweight aggregate the main responsible for limiting and influencing the properties of the concretes.

**Keywords:** Self-compacting lightweight concrete (SCLC), artificial lightweight aggregate, sugar cane bagasse ash (SCBA), scheelite residue (RPS), durability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação do concreto leve: a) com agregados leves; b) celular; c) sem finos.....	23
Figura 2 – Principais materiais utilizados nas pesquisas para obtenção de agregados leves.....	28
Figura 3 – Representação da ocorrência de corrosão pelo ataque de cloretos.....	36
Figura 4 – Esquema representativo das deteriorações causadas pela corrosão.....	36
Figura 5 – Fluxograma das atividades desenvolvidas durante a pesquisa.....	41
Figura 6 – RBC e moinho utilizado no beneficiamento: (a) RBC antes da moagem; (b) RBC após a moagem; (c) moinho de facas utilizado.....	42
Figura 7 – Resíduos e moinho utilizado no beneficiamento: (a) resíduo da produção de scheelita; (b) cinza da casca de arroz; (c) moinho de bolas.....	43
Figura 8 – Agregados na mufla: (a) agregados de RBC; (b) agregados de RPS.....	44
Figura 9 – Sequência de cálculo da composição de cada traço.....	48
Figura 10 – Verificação do espalhamento através de mini <i>slump flow</i> .....	49
Figura 11 – Ensaio de espalhamento e determinação do tempo de escoamento ( $t_{500}$ )...	50
Figura 12 – Comportamento do concreto para cada classe do IEV.....	51
Figura 13 – Esquema do ensaio para determinação do coeficiente de difusão pelo método NT Build 492 (NORDTEST, 1999).....	54
Figura 14 – Ilustração da medição das profundidades de penetração dos cloretos.....	55
Figura 15 – Espalhamento dos concretos estudados.....	60
Figura 16 – Relação entre o espalhamento ( <i>slump flow</i> ) e o volume de agregado graúdo.....	61
Figura 17 – Correlação entre a viscosidade aparente pelo ensaio de $T_{500}$ e relação $V_g/V_m$ .....	62
Figura 18 – Índice de estabilidade visual pelo detalhamento da borda do espalhamento.....	63
Figura 19 – Relação habilidade passante e volume de agregado graúdo.....	64
Figura 20 – Espalhamento dos CLAAs com Anel J.....	65
Figura 21 – Massa específica média dos CLAA no estado fresco.....	66
Figura 22 – Comportamento da massa específica seca aos 7 e 28 dias de cura.....	67

Figura 23 – Valores de resistência à compressão axial, aos 7 e 28 dias, de cada traço.	68
Figura 24 – Relação entre ganho de resistência, volume de agregado e absorção do agregado.....	70
Figura 25 – Corpos de prova dos CLAAs após ensaio de ruptura axial.....	71
Figura 26 – Fator de eficiência dos CLAAs.....	72
Figura 27 – Provetes dos CLAAs após aspersão do nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ).....	73
Figura 28 – Coeficiente de difusão de íons cloreto nos CLAAs.....	74
Figura 29 – Relação entre volume de agregado graúdo e coeficiente de difusão de íons cloreto.....	76
Figura 30 – Relação entre coeficiente de difusão de íons cloreto e a relação $V_g/V_m$ ...	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores normativos de massa específica dos concretos leves estruturais...	23
Tabela 2 – Requisitos para as resistências de concretos leves estruturais.....	24
Tabela 3 – Relação entre a resistência à compressão, aos 28 dias, e massa específica aparente de concretos leves.....	25
Tabela 4 – Massa unitária máxima de agregados leves para concreto estrutural.....	26
Tabela 5 – Agregados leves comercializados no Brasil e no mundo.....	27
Tabela 6 – Estudos realizados sobre agregados leves não convencionais e os resultados obtidos.....	28
Tabela 7 – Documentos normativos sobre concretos e agregados leves.....	30
Tabela 8 – Composição das misturas dos agregados.....	42
Tabela 9 – Características dos agregados produzidos.....	44
Tabela 10 – Características do cimento Portland CP V-ARI.....	45
Tabela 11 – Características do Metacaulim BZ.....	45
Tabela 12 – Propriedades físicas da areia e da argila expandida.....	46
Tabela 13 – Informações técnicas do aditivo superplastificante.....	47
Tabela 14 – Composição dos traços em estudo.....	47
Tabela 15 – Consumo dos concretos leves autoadensáveis moldados.....	48
Tabela 16 – Classes do Índice de Estabilidade Visual.....	51
Tabela 17 – Classificação da habilidade passante pelo Anel J.....	52
Tabela 18 – Consumo de cada traço por metro cúbico de concreto.....	56
Tabela 19 – Parâmetros volumétricos obtidos a partir do consumo de cada material....	58

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>18</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>19</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>20</b>
1.2.1	Objetivo Geral.....	20
1.2.2	Objetivos Específicos.....	21
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>22</b>
<b>2.1</b>	<b>Concreto Leve.....</b>	<b>22</b>
2.1.1	Classificação e formas de obtenção.....	22
2.1.2	Agregado leve – Definições e características.....	26
<b>2.2</b>	<b>Concreto Leve Autoadensável.....</b>	<b>30</b>
2.2.1	Concreto leve autoadensável no estado fresco.....	32
2.2.2	Concreto leve autoadensável no estado endurecido.....	33
2.2.3	Durabilidade em concretos.....	35
2.2.3.1	<i>Ataque por íons cloreto.....</i>	<i>37</i>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>40</b>
<b>3.1</b>	<b>Produção dos agregados leves.....</b>	<b>42</b>
3.1.1	Materiais.....	42
3.1.2	Fabricação dos agregados leves.....	43
<b>3.2</b>	<b>Materiais para produção dos concretos.....</b>	<b>45</b>
3.2.1	Cimento.....	45
3.2.2	Metacaulim.....	45
3.2.3	Agregados.....	46
3.2.4	Água de amassamento.....	46
3.2.5	Aditivo químico para concreto.....	46
<b>3.3</b>	<b>Definição e execução dos traços.....</b>	<b>47</b>
<b>3.4</b>	<b>Propriedades no estado fresco.....</b>	<b>50</b>
3.4.1	Determinação da fluidez, viscosidade aparente e estabilidade visual.....	50
3.4.2	Determinação da habilidade passante.....	51
3.4.3	Massa específica.....	52
<b>3.5</b>	<b>Propriedades no estado endurecido.....</b>	<b>52</b>
3.5.1	Resistência à compressão axial.....	53

3.5.2	Relação resistência e massa específica seca – Fator de eficiência (FE).....	53
3.5.3	Difusão de íons cloreto por migração em regime estacionário.....	53
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>56</b>
<b>4.1</b>	<b>Propriedades no estado fresco.....</b>	<b>56</b>
4.1.1	Determinação da fluidez, viscosidade aparente e estabilidade visual.....	59
4.1.2	Determinação da habilidade passante.....	63
4.1.3	Massa específica.....	65
<b>4.2</b>	<b>Propriedades no estado endurecido.....</b>	<b>68</b>
4.2.1	Resistência à compressão axial.....	68
4.2.2	Relação resistência e massa específica seca – Fator de eficiência (FE).....	72
4.2.3	Índice de durabilidade – Coeficiente de difusão de íons cloreto.....	73
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>78</b>
<b>5.1</b>	<b>Sugestões de estudos futuros.....</b>	<b>80</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>81</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A produção de concretos inicialmente se dava através da mistura apenas de três materiais: cimento, agregados e água. Porém, com o passar do tempo, quantidades muito pequenas de produtos químicos e alguns materiais de natureza inorgânica começaram a ser introduzidos aos concretos como uma forma de melhoramento das propriedades (NEVILLE, 2016). Em busca de formas que acelerem a produtividade de estruturas de concreto e diminuam as deficiências construtivas decorrentes da variabilidade da mão de obra, estudos em busca de tecnologias alternativas em concretos têm sido realizadas.

Nesse contexto, surge o concreto autoadensável (CAA), o qual tem despertado grande interesse, principalmente por parte das indústrias de pré-fabricados, devido ao fato de se utilizar em sua composição os mesmos tipos de materiais do concreto convencional (ASSUNÇÃO, 2016), além das vantagens oferecidas por sua capacidade de autocompactação, que resultam na diminuição de mão de obra necessária e eliminação de etapas executivas, como o caso da vibração (GRABOIS, 2012).

Angelin (2018) ressalta que, ao se trabalhar com concretos mais fluidos, há grande vantagem uma vez que se requerem menos esforços dos operários e como consequência, ganho no tempo de manuseio e adensamento, acarretando maior produtividade e menor custo final na operação de concretagem.

Atualmente, a falta espacial de solo resistente em aglomerações urbanas para suportar as cargas das edificações, tem gerado em profissionais e pesquisadores da área, interesse pela busca de materiais alternativos que contribuam para diminuição dos esforços sobre as edificações (JURADIN; BALOEVIC; HARAPIN, 2012; BORJA, 2011). Assim, o concreto leve autoadensável (CLAA) surge como uma alternativa interessante, pois, como enfatizado por Assunção (2016), o CLAA agrega as conhecidas qualidades do concreto leve estrutural (CL), dentre as quais destaca-se a redução do peso próprio das estruturas, com as conhecidas qualidades do CAA. O concreto leve autoadensável é uma técnica recente que propõe a prática, já consagrada na indústria da construção, de redução do peso em estruturas de concreto através da utilização de agregados leves.

Os agregados leves classificam-se quanto à sua natureza e forma de obtenção, podendo ser por meio de forno do tipo mufla ou forno rotativo, ambos pelo processo de sinterização do material. Diante disso, Nepomuceno *et al.* (2018) chama atenção para o fato de que, por possuírem diferentes origens e propriedades, conforme a matéria-prima ou forma

de obtenção utilizadas, alguma complexidade adicional na previsibilidade do comportamento do concreto nos estados fresco e endurecido, pode ser introduzida.

As alterações mais significativas causadas pela substituição dos agregados convencionais por agregados leves são evidenciadas na trabalhabilidade, resistência mecânica, condutividade térmica, resistência à altas temperaturas, espessura da zona de transição agregado-matriz cimentícia e redução na densidade específica do concreto produzido (BOGAS; GOMES; PEREIRA, 2012; ROSSIGNOLO, 2009).

Rossignolo (2009) destaca que, no Brasil a utilização dos concretos com agregados leves ainda ocorre de forma modesta, diante do seu potencial de utilização, ficando concentrado nas regiões Sul e Sudeste do país. O autor ainda ressalta que, desde o início da produção de argila expandida no Brasil, a maioria das aplicações dos concretos leves no setor da construção civil nacional ocorre em elementos estruturais pré-fabricados e na estrutura de edificações de múltiplos pavimentos moldados in loco, em especial nas lajes.

Contudo, os benefícios apresentados ao se utilizar esses dois tipos de concretos associadamente é evidente, pois quando unidos entre si formando o CLAA, oferecem menor densidade específica e maior fluidez. Diante disso, diversos estudos têm sido realizados avaliando as propriedades dos concretos leves autoadensáveis com base em diferentes composições e tipos de agregados leves utilizados (NAHHAB; KETAB, 2020; PANNEM; KUMAR, 2019; BARNAT-HUNEK *et al.*, 2018; NADESAN; DINAKAR, 2017; GONEN, YAZICIOGLU, 2017; ASSUNÇÃO, 2016; YANG *et al.*, 2015; ERDEM, 2014; GUNEYISI *et al.*, 2013).

## 1.1 Justificativa

A produção de agregados leves nos últimos anos, tem chamado a atenção de diversos pesquisadores, estimulados pela demanda crescente por materiais estruturais com baixa densidade e que apresentem desempenho térmico e acústico. Ainda, aliado a isso, têm-se a preocupação com a sustentabilidade, o que tem gerado diversos estudos abordando o uso dos mais diversos tipos de resíduos para a produção de agregados leves.

Dondi *et al.* (2016) realizaram um estudo de revisão bibliográfica sobre trabalhos com o foco em produzir novos agregados e constataram que, a taxa de publicação sobre esse tema tem aumentado de 1-2 artigos por ano nos anos 90 para 15-20 artigos anuais nos últimos anos. Os autores ainda citam que, as principais fontes de tais matérias-primas não convencionais abrangem resíduos sólidos urbanos, sedimentos de reservatórios de água e dragagem de

portos, resíduos de usinas de carvão, mineração e pedreiras, transformação mineral e indústria metalúrgica.

No entanto, o principal agregado leve comercializado no Brasil para a produção de concretos leves ainda é a argila expandida, agregado este que tem sua produção concentrada na região Sudeste do país, o que acaba dificultando a difusão do uso de concretos leves, seja convencional ou autoadensável, em regiões mais afastadas desses centros de fabricação, como é o caso da Região Nordeste.

A utilização do concreto leve autoadensável, o qual alia as características do concreto leve convencional com as técnicas do concreto autoadensável, no setor construtivo são relativamente recentes. Grabois (2012) ressalta que, pesquisas voltadas para a caracterização de concreto leve autoadensável são relevantes devido ao conhecimento ainda restrito sobre suas propriedades. No Brasil, a utilização do CLAA ainda ocorre de forma bem abaixo do potencial oferecido por esse tipo de concreto, não havendo aplicação adequada e poucos estudos desenvolvidos.

Nesse contexto, pretende-se avaliar as propriedades nos estados fresco e endurecido, assim como índices de durabilidade, de concretos leves autoadensáveis (CLAA) produzidos com agregados leves formados a partir de resíduos industriais e de mineração provenientes de fontes localizadas no Rio Grande do Norte/Brasil e desenvolvidos por Leal de Souza (2019) e Souza (2019).

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Dando continuidade aos estudos desenvolvidos por Leal de Souza (2019) e Souza (2019), os quais serviram como embasamento para a realização do presente estudo, o objetivo principal desse trabalho é produzir concretos leves autoadensáveis utilizando os agregados leves artificiais desenvolvidos a partir da sinterização de resíduos agroindustrial e de mineração, provenientes do estado do Rio Grande do Norte, de maneira que, a avaliação das propriedades desses concretos nos estados fresco e endurecido, assim como os índices de durabilidade, mostre a viabilidade de se produzir CLAA aplicando agregados leves produzidos a partir de resíduos locais.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Selecionar os agregados desenvolvidos com matéria-prima regional a serem reproduzidos para a realização do estudo;
- Produzir agregados leves a partir da sinterização dos resíduos agroindustrial e de mineração;
- Dosar concretos leves usando agregados leves artificiais produzidos a partir de resíduos locais;
- Avaliar as propriedades dos concretos leves no estado fresco e endurecido;
- Avaliar o comportamento dos concretos leves frente aos índices de durabilidade;
- Realizar análise comparativa dos resultados de desempenho obtidos pelo concreto leve autoadensável com agregados regionais em comparação com o concreto leve autoadensável com agregado leve convencional.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

Decorrente do desenvolvimento de tecnologias e estudos em concreto, o concreto com agregado leve tem sido bastante aplicado tanto para fins estruturais e redução do peso próprio das estruturas, quanto para fins de vedação e conforto termoacústico. De acordo com Rossignolo (2009), o concreto leve (CL) apresenta-se como um material de construção consagrado em todo o mundo, com aplicação em diversas áreas da construção civil, como edificações pré-fabricadas, pontes e plataformas marítimas. Pois, embora a utilização desse tipo de concreto implique em um custo por metro cúbico maior em relação ao concreto convencional, os custos com a estrutura poderão ser menores devido a diminuição dos esforços causados pelo peso próprio (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Além de que, o uso desse concreto ocasiona numa maior produtividade, quando comparado ao concreto convencional, facilitando o transporte de peças durante a etapa de execução da obra (ANGELIN, 2018) e possuem propriedades que podem ser exploradas sob diversas formas, desde o uso como material secundário até a incorporação em estruturas portantes, inclusive visando benefícios no isolamento térmico (BORJA, 2011).

De forma análoga ao concreto leve, o concreto autoadensável (CAA) surge também como uma nova alternativa frente ao concreto convencional. O CAA é caracterizado por apresentar características no estado fresco distintas do concreto convencional, tendo como propriedades determinantes a habilidade de preenchimento, resistência à segregação e habilidade passante. No setor de pré-fabricados o concreto autoadensável tem se destacado por oferecer facilidade na concretagem de peças com altas taxas de armadura, rapidez na execução e qualidade de acabamento superficial (ASSUNÇÃO, 2016).

A junção desses dois tipos de concretos resulta no concreto leve autoadensável (CLAA) que, segundo Borja (2011), é um tipo de concreto de alto desempenho que apresenta características que devem ser respeitadas durante seu proporcionamento, produção e aplicação. Dessa forma, conhecer a viabilidade da utilização de agregados leves não-convencionais e avaliar os efeitos causados no CLAA torna-se necessário para expansão do conhecimento deste tipo especial de concreto.

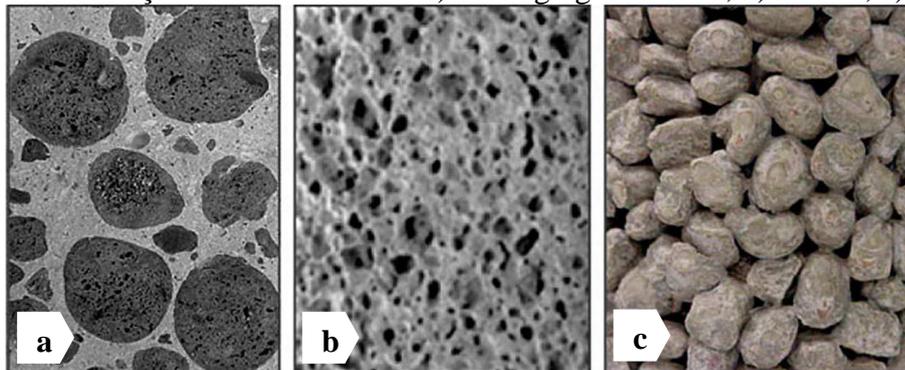
### **2.1 Concreto Leve**

#### **2.1.1 Classificação e formas de obtenção**

A ABNT NBR 8953/2015 classifica os concretos de acordo com suas massas específicas em três categorias: concreto normal, quando a massa específica está entre 2000

kg/m<sup>3</sup> e 2800 kg/m<sup>3</sup>; concreto leve, massa específica inferior a 2000 kg/m<sup>3</sup>; e concreto pesado ou denso, onde a massa específica é superior a 2800 kg/m<sup>3</sup>. A principal característica que distingue o concreto leve do concreto convencional é a redução da massa específica, a qual ocorre pela diminuição ou substituição das partículas sólidas e aumento dos vazios na mistura. Segundo Rossignolo (2009), existem três tipos de concretos leves, sendo concreto com agregados leves, concreto celular e concreto sem finos (Figura 1), onde apenas o primeiro atende aos requisitos para aplicação com fins estruturais.

Figura 1 – Classificação do concreto leve: a) com agregados leves; b) celular; c) sem finos.



Fonte: Rossignolo, 2009.

De acordo com a ACI 213R-03, os concretos com agregados leves podem ser produzidos com substituição total ou parcial dos agregados naturais por agregados leves e devem apresentar uma resistência à compressão mínima, aos 28 dias, de 17 MPa e massa específica entre 1120 kg/m<sup>3</sup> e 1920 kg/m<sup>3</sup>. Em contrapartida, a NBR 6118:2014 estabelece que a resistência mínima para concreto estrutural deve ser 20 MPa. Outras normativas estabelecem valores de referência para a massa específica dos concretos leves estruturais (Tabela 1).

Tabela 1 – Valores normativos de massa específica dos concretos leves estruturais.

<b>Referência</b>	<b>Massa específica aparente (kg/m<sup>3</sup>)</b>
NM 35 (1995)	1680 < $\gamma$ < 1840
EUROCODE 2 (2007)	900 ≤ $\gamma$ ≤ 2000
NS 3473 E (1998)	1200 < $\gamma$ < 2200
CEB-FIP (1977)	$\gamma$ < 2000
RILEM (1975)	$\gamma$ < 2000

Fonte: Adaptado de Rossignolo, 2009.

A ASTM C330-09 estabelece requisitos para o concreto leve estrutural através de uma relação entre a massa específica e as resistências à compressão e à tração por compressão diametral aos 28 dias, como mostrado na Tabela 2, de acordo com o tipo de substituição dos agregados.

Tabela 2 – Requisitos para as resistências de concretos leves estruturais.

Massa específica máxima aos 28 dias (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência à tração por compressão diametral mínima aos 28 dias (MPa)	Resistência à compressão mínima aos 28 dias (MPa)
	Todos os agregados leves	
1760	2,2	28
1680	2,1	21
1600	2,0	17
	Combinação de areia natural e agregado leve	
1840	2,3	28
1760	2,1	21
1680	2,1	17

Fonte: ASTM C330-09.

Outro parâmetro bastante utilizado para classificar os concretos leves é o Fator de Eficiência (FE), o qual relaciona a resistência à compressão e o valor da massa específica aparente do concreto, sendo dado pela equação 2.1:

$$\text{Fator de Eficiência} = \frac{f_c}{\gamma} \quad (\text{Equação 2.1})$$

onde, FE é obtido em MPa.dm<sup>3</sup>/kg, sendo  $f_c$  a resistência à compressão em MPa e  $\gamma$  a massa específica em kg/dm<sup>3</sup>. Concretos com fator de eficiência acima de 25 MPa.dm<sup>3</sup>/kg são considerados concretos de alto desempenho. Deste modo, considera-se concreto leve de alto desempenho, por exemplo, um concreto com resistência à compressão de 30 MPa, desde que sua massa específica seja inferior a 1200 kg/m<sup>3</sup> (ANGELIN, 2018; ROSSIGNOLO, 2009).

O concreto leve apresenta maior movimentação de umidade que o concreto produzido com agregados comuns (NEVILLE, 2016). Dessa maneira, na dosagem de concretos convencionais costuma-se relacionar a resistência à compressão ao fator água/cimento, sendo esse um dos parâmetros mais controlados durante a mistura. Contudo, em concretos leves deve-se ter uma atenção especial às propriedades específicas, como a baixa massa específica e o elevado teor de absorção de água por parte dos agregados leves. Na Tabela 3, Rossignolo

(2009) relaciona valores mínimos de resistência à compressão aos valores de massa específica aparente, de acordo com a NM 35 (1995).

Tabela 3 – Relação entre a resistência à compressão, aos 28 dias, e massa específica aparente de concretos leves.

<b>Resistência à compressão aos 28 dias (MPa) (Valores mínimos)</b>	<b>Massa específica aparente (kg/m<sup>3</sup>) (Valores máximos)</b>
28	1840
21	1760
17	1680

Fonte: Adaptado de Rossignolo, 2009.

Na dosagem de concretos leves são utilizados dois métodos de determinação, com base na ACI 211.2 (2004): método da massa, quando a substituição do agregado normal pelo agregado leve ocorre apenas para os agregados graúdos, e o método do volume, quando todos os agregados da mistura são leves.

Mehta e Monteiro (2014) ressaltam que, o método do volume não é adequado para concretos leves, visto que a relação entre resistência e fator água/cimento não pode ser efetivamente aplicada devido à dificuldade em se determinar quanto de água de amassamento do concreto será absorvida pelos agregados, pois alguns continuam a absorver água por várias semanas após a mistura, interferindo assim na trabalhabilidade e aumentando na retração por secagem (ROSSIGNOLO, 2009). Nesse contexto, Angelin (2018, p. 35 e 36) salienta:

Recomenda-se que, para a fabricação dos concretos com agregados leves, o consumo de cimento seja acima de 300 kg/m<sup>3</sup> para assegurar trabalhabilidade, proteção à armadura e de ancoragem da armadura. [...] O uso de aditivos e adições minerais pode ser utilizado na fabricação dos concretos leves, no entanto, deve-se considerar a absorção de água pelos agregados leves não saturados previamente, reduzindo a ação do aditivo.

Contudo, esse fenômeno da absorção excessiva por parte dos agregados leves pode ser eliminado através da pré-saturação (GESOGLU *et al.* 2015; BOGAS; GOMES; PEREIRA, 2012; BORJA, 2011; ROSSIGNOLO, 2009) que, além de auxiliar na diminuição da absorção por parte dos agregados, resulta em melhorias na zona de transição agregado-pasta de cimento e contribui na cura interna do concreto, auxiliando nas reações químicas do cimento e na diminuição das variações do processo de cura.

### 2.1.2 Agregado leve – Definições e características

O principal parâmetro que caracteriza um agregado leve é sua massa unitária menor que  $1120 \text{ kg/m}^3$ , podendo ser aplicado na produção dos mais diversos tipos de concretos leves. Classificam-se quanto à sua natureza, podendo ser agregados leves naturais, obtidos pela extração direta em jazidas ou pela britagem de rochas ígneas, e agregados leves artificiais, obtidos através de processos industriais por meio de tratamento térmico, sendo classificados em decorrência do processo de fabricação e matéria-prima utilizados. A sinterização dos materiais é o tratamento térmico mais usado, seja por forno do tipo mufla ou forno rotativo.

De acordo com Grabois (2012), existe uma gama de agregados leves e porosos de reduzida massa específica que, de acordo com suas propriedades, determinadas aplicações são sugeridas. Geralmente, agregados leves que apresentam menores densidades possuem uma estrutura mais porosa e, conseqüentemente, mais frágeis, sendo mais adequados para aplicação em concretos com funções isolantes. Em contrapartida, quando a estrutura dos poros consiste em poros finos uniformemente distribuídos, as partículas do agregado são resistentes e, portanto, adequadas para a produção de concreto leve estrutural (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Nos concretos leves estruturais, a dimensão e a granulometria dos agregados têm mais influência nos valores da massa específica e da resistência à compressão do que, comparativamente, nos concretos convencionais (ROSSIGNOLO, 2009). Os documentos normativos ASTM C330 (2009), ACI 213R-03 (2003) e a NBR NM 35 (1995) especificam que os agregados leves utilizados na produção de concretos estruturais não devem ultrapassar os valores de massa unitária no estado seco de  $1120 \text{ kg/m}^3$ , para os agregados miúdos, e  $880 \text{ kg/m}^3$ , para os graúdos. A Tabela 4 apresenta os valores de massa unitária máxima dos agregados, de acordo com sua classificação e faixa granulométrica.

Tabela 4 – Massa unitária máxima de agregados leves para concreto estrutural.

<b>ACI 213R-03</b>	<b>NBR NM 35 (1995)</b>	<b>Massa unitária máxima do agregado no estado seco solto (<math>\text{kg/m}^3</math>)</b>
Agregado graúdo + miúdo	1 e 2	1040
Agregado miúdo	3	1120
Agregado graúdo	4, 5, 6, 7 e 8	880

Fonte: Adaptado de ACI 213R-03 e NBR NM 35 (1995).

Na Tabela 5, Rossignolo e Agnesini (2011) apresentam os principais agregados leves comercializados no Brasil e internacionalmente que são utilizados na produção de concretos leves e suas principais características.

Tabela 5 – Agregados leves comercializados no Brasil e no mundo.

Nome comercial	País	Matéria-prima	Fabricação	Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	Massa unitária (kg/dm <sup>3</sup> )	Dimensão (mm)	Absorção de água 24h (%)
Lyttag	Inglaterra	Cinzas volantes	Sinterização	1,3 a 2,1	0,6 a 1,1	0,5 a 19	15 a 20
Solite	Eua	Folhelho	Forno rotativo	1,4	0,8	4 a 16	15
Liapor	Alemanha	Argila		0,6 a 1,8	0,3 a 0,9	2 a 19	11 a 17
Leca	Áustria e Noruega			0,6 a 1,8	0,3 a 0,9	0,5 a 16	11 a 30
Arlita	Espanha			1,4	0,8	1 a 10	13
Cinexpan 0500	Brasil			1,5	0,9	0,5 a 5	6
Cinexpan 1506				1,1	0,6	6 a 15	7
Cinexpan 2215				0,7	0,5	15 a 22	10

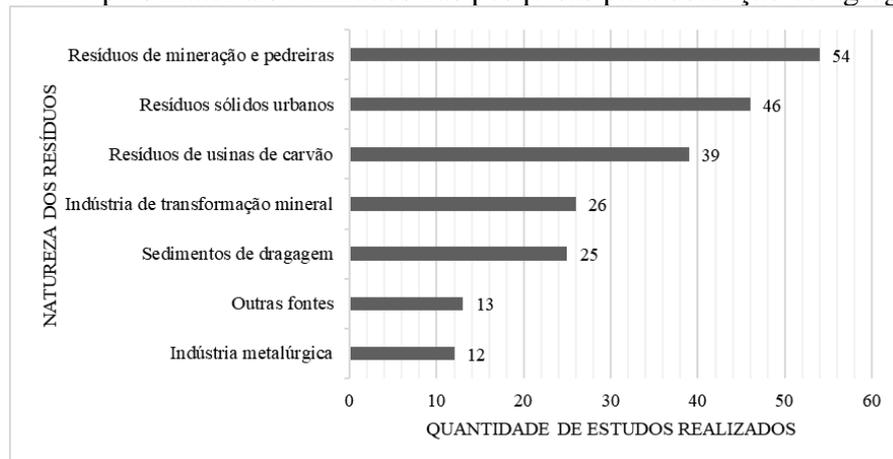
Fonte: Rossignolo e Agnesini, 2011.

Na indústria brasileira o único agregado leve produzido e, conseqüentemente, utilizado é a argila expandida, atualmente produzido pela empresa Cinexpan Indústria e Comércio, com localidade concentrada na Região Sudeste do Brasil. Atualmente, 60% da produção de argila expandida destina-se ao setor da construção civil nacional, sendo os outros 40% absorvidos pelos setores de lavanderia, paisagismo, refratários e demais aplicações, como substratos (ROSSIGNOLO, 2009).

Diversos estudos estão sendo realizados utilizando resíduos e subprodutos industriais para obtenção de agregados leves (SOUZA, 2019; LEAL DE SOUZA, 2019; AYATI *et al.*, 2019; SOLTAN *et al.*, 2016; TUAN *et al.*, 2013). Dondi *et al.* (2016) realizou um estudo de revisão sistemática e elencou os principais tipos de resíduos que estão sendo estudados e utilizados para produção dos novos tipos de agregados leves, onde os resíduos de mineração, de sólidos urbanos e de usinas estão entre os mais abordados, como mostra a Figura 2.

Na Tabela 6 são apresentados exemplos de estudos, utilizando matérias-primas pouco convencionais para produção de agregados leves, e os resultados alcançados, detalhando os trabalhos de maior relevância para o presente estudo.

Figura 2 – Principais materiais utilizados nas pesquisas para obtenção de agregado leves.



Fonte: Adaptado de Dondi *et al.* (2016).

Tabela 6 – Estudos realizados sobre agregados leves não convencionais e os resultados obtidos.

Autores	País	Matéria-prima	Fabricação	Massa unitária (kg/dm <sup>3</sup> )	Dimensão nominal (mm)	Absorção de Água (%)	Resistência (MPa)
Souza (2019)	Brasil	Resíduo de scheelita, lodo de esgoto, cinza da casca de arroz e argilas locais	Sinterização	***	(variável)	2,6 - 19,8 e 0,7 - 19,1	2,46 - 13,47 e 5,02 - 17,28
Leal Souza (2019)	Brasil	Resíduo da biomassa da cana-de-açúcar, do corte de granito e mármore e argilas locais	Sinterização	0,73 - 1,08 e 0,65 - 1,27	(variável)	8 - 32 e 1 - 40	1,25 - 23,13 e 0,51 - acima de 31
Ayati et al. (2019)	Reino Unido	Resíduo de perfuração petrolífera	Sinterização	***	7,0 a 14,0	3,60	4,40
Piszc-Karás et al. (2019)	Polónia	Resíduo de xisto da exploração de gás	Sinterização	< 1,20	***	8,0 ± 3,0	***
Liu et al. (2018)	China	Lodo de esgoto e sedimento fluvial	Sinterização	0,84	***	< 12,0	13,70
Park et al. (2017)	Coréia do Sul	Rejeito de ouro, resíduo de bauxita e calcário residual	Sinterização	***	10,0	7,40	11,20
Soltan et al. (2016)	Egito	Resíduo de corte de granito e mármore e argila local	Sinterização	< 1,20	***	***	***
González-Corrochano, Alonso-Azcárate e Rodas (2014)	Espanha	Solo contaminado com resíduos de mineração e produto de combustão do carvão	Forno rotativo	1,06 e 2,0	8,0 a 10,0	7,68 e 11,15	1,53 ± 0,95 e 4,97 ± 2,38
Quina et al. (2014)	Portugal	Resíduos da incineração de resíduos urbanos e argila local	Sinterização	0,178 - 0,279	18,0 a 20,0	***	0,19 a 0,46
Volland et al. (2014)	Alemanha/Rússia	Lodo de areia	Sinterização	0,33	***	0,10	0,18
Tuan et al. (2013)	Vietnã/Taiwan	Lodo de esgoto e resíduo de vidro	Sinterização	1,20	6,0 a 10,0	< 10,0	5,27
González-Corrochano, Alonso-Azcárate e Rodas (2009)	Espanha	Lodo de pedreira, lodo de esgoto e sedimento rico em argila	Forno rotativo	1,20	8,0 a 10,0	(Aumenta à medida que a proporção de lodo de esgoto aumenta)	0,50 a 13,31

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Souza (2019) desenvolveu agregados leves a partir do resíduo de scheelita (RPS), do lodo de esgoto (SS) e da cinza da casca do arroz (RHA), em substituição a dois tipos distintos de argilas, variando os teores de substituição até 100%. Foram formuladas 50 misturas diferentes, sinterizadas a temperaturas de 1100, 1150, 1200 e 1250 °C em forno tipo mufla. Os agregados resultantes apresentaram índice de inchaço máximo de 77,44%, perda de massa de até 43,6%, densidades das partículas variando entre 0,63 e 2,01 g/cm<sup>3</sup>, absorção de água mínima de 0,7% e resistência ao esmagamento de até 17,3 MPa. Os agregados produzidos demonstraram propriedades no mínimo semelhantes aquelas encontradas em agregados leves comerciais, exibindo a possibilidade de uso em pelo menos uma das principais aplicações deste produto em obras e serviços de engenharia (SOUZA, 2019).

Leal de Souza (2019) em seu estudo, produziu novos agregados leves, utilizando resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC), resíduo de corte de granito e mármore (RGM) e diferentes tipos de argilas, provenientes do Estado do Rio Grande do Norte/Brasil. As misturas foram formuladas com teores de resíduo variando de 0% a 100%, sendo submetidas à sinterização em temperaturas de 1000 °C a 1263 °C, em forno tipo mufla. Como resultado, diversos agregados que foram produzidos apresentaram massa específica aparente inferiores a 2,00 g/cm<sup>3</sup>, absorção de água inferior a 15% e massa unitária inferior a 0,88 g/cm<sup>3</sup>, produzidos com ambos os resíduos. A autora ressalta que, os agregados produzidos com o RBC, em teores superiores a 50%, apresentaram melhores características de massa específica e absorção de água com valores de 1,39 g/cm<sup>3</sup> e 3%, respectivamente. No entanto, os agregados com RGM também resultaram em boas características, além de apresentarem resistência à tração quatro vezes superior em relação ao agregado comercializado no Brasil.

Em sua pesquisa, Ayati *et al.* (2019) investigou a viabilidade técnica de transformar resíduos de perfuração de poços de petróleo em agregados leves. O resíduo passou por uma moagem e, em seguida, foram formados os agregados verdes, com diâmetro de 7 a 14 mm, por rolagem manual. Os agregados foram queimados a temperaturas entre 1160 e 1190 °C, em forno tipo mufla. Foram determinadas as propriedades físicas do agregado leve fabricado, incluindo densidade de partículas, absorção de água e resistência à compressão. Segundo Ayati *et al.* (2019), a pesquisa mostrou a viabilidade de produzir agregados leves com resíduo de perfuração, resultando em agregados com densidade de partículas de 1,29 g/cm<sup>3</sup>, absorção de água de 3,6% e resistência à compressão de 4,4MPa, quando queimados a 1800 °C.

Soltan *et al.* (2016) utilizaram em seu estudo o RGM-granítico, proveniente da cidade de Cairo/Egito, e uma argila coletada na mesma região. As substituições de argila pelo resíduo variaram em teores de 50, 60, 70, 80, 90 e 100%. Os agregados foram moldados

manualmente em tamanhos aproximadamente iguais, submetidos à secagem ao ar e em estufa e, posteriormente, foram levados à queima, com temperaturas variando de 1000 a 1200 °C. Os autores demonstraram que a massa específica dos agregados diminuiu com o aumento na temperatura e agregados com densidade aparente inferior ou igual a 1,2 g/cm<sup>3</sup> só foram possíveis em misturas contendo, no mínimo, 20% de argila à temperatura de 1200 °C, resultando nos menores valores de massa específica (650 kg/m<sup>3</sup>).

Neste estudo, Tuan *et al.* (2013) produziram agregados leves a partir do lodo de esgoto úmido, como matéria-prima principal, e resíduos de vidro como adição. Os agregados foram produzidos com teores de adição do vidro de 10 a 50% e sinterizado em forno comercial sob temperaturas variando de 830 a 1100 °C. Os resultados mostraram que a adição de 30 a 50% dos resíduos de vidro produziu agregados leves de alta qualidade, com densidade aparente menor que 2 g/cm<sup>3</sup> e absorção de água menor que 10%.

O controle dos parâmetros e características dos agregados leves, da mesma forma com os concretos produzidos com esses agregados, podem ser consultados através de normas e especificações técnicas já existentes. A Tabela 7 apresenta algumas dessas normas vigentes.

Tabela 7 – Documentos normativos sobre concretos e agregados leves.

País	Especificação
EUA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ACI 211.2. Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete, 2004</li> <li>• ACI 213R-03. Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete, 2003</li> <li>• ACI 318-08. Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, 2008</li> <li>• ACI 304.5R-91. Batching, Mixing and Job Control of Lightweight Concrete, 1997</li> <li>• ACI SP-136. Structural Lightweight Aggregate Concrete Performance, 1992</li> <li>• ASTM C330-05. Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete, 2005</li> </ul>
Europa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• EUROCODE 2. Design of Concrete Structures, 2007</li> <li>• NS 3420. Specification Texts for Building and Construction, 1992</li> <li>• NS 3473. Concrete Structures. Design Rules, 1998</li> <li>• NS 22. NCA Publ. N°22. Lightweight aggregate concrete. Specif. and Guidelines, 1999</li> <li>• BS 3797. BS Specifications for LWA for Masonry Units and Structural Concrete, 1990</li> <li>• BS 8110. Structural Use of Concrete. Part 2, 1997</li> </ul>
Japão	<ul style="list-style-type: none"> <li>• JASS 5. Reinforced Concrete Work, 2003</li> <li>• JIS A 5002. Lightweight Aggregates for Structural Concrete 1978 (revised 1999)</li> <li>• JSCE Chapter 19. Lightweight Aggregate Concrete 1986 (revised 1996)</li> </ul>

Fonte: Adptado de Rossignolo, 2009.

## 2.2 Concreto Leve Autoadensável

Dentre os concretos especiais que congrega o uso de novas tecnologias com a aplicação de novas técnicas e materiais, o concreto autoadensável (CAA) tem ganhado notoriedade e é considerado por muitos pesquisadores o concreto do futuro. Dessa forma, o concreto leve autoadensável (CLAA), desenvolvido a partir do CAA, surge como uma

inovação na área dos concretos de alto desempenho, combinando as propriedades do concreto autoadensável e do concreto leve. Nesse sentido, o uso do concreto leve autoadensável resulta em diversas vantagens, como a redução do peso próprio da estrutura, menor custo de construção, não necessita de vibração, alta resistência mecânica com uma massa específica próxima a 1900 kg/m<sup>3</sup>, por essa razão sendo o mais indicado para restauração em edificações antigas que não podem receber sobrecargas, além da melhoria no isolamento térmico e acústico (TING *et al.*, 2019; BOGAS; GOMES; PEREIRA, 2012; BORJA, 2011).

Os estudos realizados sobre o concreto leve autoadensável, por se tratar de um novo tipo de concreto, muitas vezes esbarram na falta de normas, experiência com o produto e metodologias de dosagem (TING *et al.*, 2019; ASSUNÇÃO, 2016). Contudo, por ser um concreto que precisa atender as mesmas propriedades do CAA no estado fresco, como habilidade de preenchimento, resistência à segregação e habilidade passante, não existem diferenças significativas entre os métodos de dosagem propostos para o concreto autoadensável convencional e o concreto leve autoadensável, exceto com relação ao tipo de agregado utilizado (TING *et al.*, 2019; BORJA, 2011). No entanto, Borja (2011, p. 100 e 101) alerta:

O concreto leve autoadensável apresenta características específicas que devem ser respeitadas durante seu proporcionamento, produção e aplicação. Por estas razões, é necessário verificar as teorias aplicáveis aos concretos autoadensáveis tradicionais antes de aplicá-las aos concretos leves autoadensáveis. [...] Pois, a baixa massa específica do agregado leve contribui de forma desfavorável sua adequação aos métodos de dosagem usualmente aplicados para os concretos autoadensáveis convencionais, e especialmente, na caracterização das propriedades reológicas através de ensaios específicos.

Ting *et al.* (2019), em seu estudo de revisão sistemática da literatura, apresentaram diversos pesquisadores que optaram pela dosagem através do método de tentativa e erro, variando o fator a/c, materiais ligantes ou a relação finos/agregado, pois a maioria das metodologias de dosagem já propostas não se adequavam quando aplicadas em outros contextos e com outros materiais.

Sendo assim, é necessário que haja conhecimento das propriedades individuais de cada material utilizado na composição do concreto, para assim, aplicar os procedimentos de dosagem e produção adequados, visto que podem afetar as propriedades necessárias nos estados fresco e endurecido. A seguir serão descritos alguns estudos desenvolvidos com concreto leve autoadensável, avaliando as propriedades nos estados fresco e endurecido.

### 2.2.1 Concreto leve autoadensável no estado fresco

De maneira análoga ao concreto autoadensável, o concreto leve autoadensável no estado fresco deve ser avaliado quanto à capacidade de enchimento, resistência à segregação e habilidade passante, como mencionado anteriormente. Portanto, os parâmetros propostos pela EFNARC (2005) são utilizados para avaliar o comportamento dos CLAA, além das normas EN 206 (BARNAT-HUNEK *et al.*, 2018; BOGAS; GOMES; PEREIRA, 2012) e a NBR 15823-1, no Brasil.

Em seu estudo, Nahhab e Ketab (2020) verificaram a influência do diâmetro máximo e teor de agregados leves de argila expandida nas propriedades do concreto leve autoadensável, reforçado com fibras. Para caracterização do estado fresco, realizaram os ensaios de Slump flow,  $t_{500}$ , Funil V e Caixa L. De acordo com os autores, todas as misturas desenvolvidas no estudo classificaram-se como SF2, conforme parâmetros estabelecidos pela EFNARC. Ainda, os resultados revelaram que o aumento do diâmetro máximo do agregado graúdo ocasionou a diminuição da quantidade de superplastificante necessária para manter as características do CLAA, assim como a densidade no estado fresco (NAHHAB; KETAB, 2020).

Os autores Pannem e Kumar (2019) produziram um agregado leve por pelotização à frio, composto por cinza volante, hidróxido de cálcio e cimento, e o aplicaram em um estudo comparativo entre o CAA convencional e o CLAA contendo esse agregado. Os ensaios realizados no estado fresco foram o Slump flow,  $t_{500}$ , Anel J, Índice de estabilidade visual, Caixa L e Funil V. Os resultados demonstraram que, o concreto contendo o novo agregado leve se mostrou menos estável em comparação com os outros, apresentando sinais de segregação durante os ensaios. Porém, segundo Pannem e Kumar (2019), todos os valores obtidos ficaram dentro do estabelecido pela EFNARC, caracterizando-se como um concreto leve autoadensável.

Barnat-Hunek *et al.* (2018) em seu estudo com CLAA, utilizando agregados leves de perlita e dois tipos de fibras, verificaram a trabalhabilidade dos concretos produzidos através dos ensaios de espalhamento (slump flow) e  $t_{500}$ . Os pesquisadores constataram que, à medida que a quantidade de areia aumentava, ocorria um aumento da viscosidade do concreto, contudo, sem apresentar segregação. Em outros estudos (TING *et al.*, 2019; TOPÇU; UYGUNOGLU, 2010) explicam que isso ocorre devido a diferença de densidade entre os agregados leves, que geralmente é menor, e a matriz de argamassa, podendo resultar em alterações nas propriedades frescas do CLAA.

Os pesquisadores Grabois, Cordeiro e Toledo Filho (2016) avaliaram o comportamento do CLAA produzido de duas formas: com substituição total dos agregados por agregado leve e com substituição parcial, onde apenas o agregado graúdo fora substituído por agregado leve, sendo ambas formulações reforçadas por fibras. Os resultados obtidos pelos ensaios de Slump flow e Slump flow invertido, indicaram que todas as misturas apresentaram desempenho reológico adequado ao especificado pelas normas regulamentadoras. Os autores ainda destacam que, o CLAA produzido com substituição total dos agregados, apresentou melhores resultados no ensaio de funil V.

Erdem (2014) realizou um estudo comparativo entre o CLAA com agregado leve de cinza volante e o CAA convencional. Para caracterização dos concretos, o autor realizou os testes de Slump flow, Funil V e Anel J. Como resultados, constatou-se que o tempo de escoamento apresentado pelo CAA foi menor, embora o CLAA tenha apresentado maior fluidez. Diante disso, o autor afirma que esse comportamento é típico de concretos com agregados leves e está associado à baixa densidade e às propriedades geométricas dos agregados. Corroborando com essa afirmação, Grabois (2012) ressalta que, uma das maiores questões concernentes à produção e aplicação deste tipo de concreto, é prevenir a segregação da argamassa com relação ao agregado leve.

### 2.2.2 Concreto leve autoadensável no estado endurecido

Dentre as propriedades requeridas em concretos no estado endurecido, a resistência a compressão está entre as de maior importância, visto que essa desempenha grande influência no comportamento estrutural dos elementos de concreto e pode ser afetada significativamente por fatores como composição das matérias-primas, tipos de agregados utilizados, empacotamento, dosagem de aditivos químicos e minerais e relação a/c. Além de que, a incorreta autocompactação e, conseqüentemente, segregação dos agregados, podem resultar em severos danos a durabilidade e desempenho estrutural do concreto no estado endurecido (JURANDIN; BALOEVIC; HARAPIN, 2012), ressaltando que, diferentemente dos concretos com peso normal, o componente mais fraco do sistema concreto leve é o agregado e não a zona de transição (NAHHAB; KETAB, 2020; GRABOIS; CORDEIRO; TOLEDO FILHO, 2016).

Os pesquisadores Nahhab e Ketab (2020), citados anteriormente, realizaram os ensaios de resistência à compressão, resistência à flexão, densidade seca, absorção de água, retração e perda de massa, aos 28 dias, para avaliação do estado endurecido. Como resultados,

constatarem que, as resistências à compressão e à flexão e a retração diminuiram inversamente proporcional ao aumento do diâmetro máximo do agregado leve, enquanto a absorção de água aumentou de maneira diretamente proporcional.

Gonen e Yazicioglu (2017) realizaram um estudo experimental sobre as influências dos tipos de curas nas características físicas, mecânicas e índices de durabilidade em CLAA, comparando com concreto leve (CL) e com o CAA. Utilizou-se o agregado leve de perlita expandida, substituindo em teores de 10, 20 e 30%. Após 28 dias em cura úmida, realizou os ensaios de porosidade aparente, absorção de água capilar e permeabilidade. Os resultados obtidos demonstraram que os CAA e CLAA possuem coeficiente de permeabilidade com grau médio e os CL possuem coeficiente de permeabilidade com grau bom. De maneira geral, quando os resultados dos ensaios de permeabilidade, capilaridade e carbonatação acelerada do CLAA foram comparados com os resultados do CAA, observou-se que o CAA apresentou melhor desempenho. Portanto, os autores concluíram que, quanto maior a quantidade de agregados porosos, maior a permeação do concreto.

Assunção (2016) em seu estudo com CAA e CLAA, utilizou a argila expandida como substituição parcial e total do agregado natural basáltico nas proporções de 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. O autor realizou os ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade estático e coeficiente de Poisson, massa específica, absorção de água, índice de vazios e, por fim, determinou o fator de eficiência estrutural (FE) dos concretos, através dos parâmetros de resistência à compressão e massa específica seca. Devido a estrutura mais porosa dos agregados leves em comparação com o agregado de peso comum, os resultados apresentados pelo autor demonstraram que, quanto maior o teor de substituição, menores os valores das resistências, do módulo de elasticidade e da massa específica e maiores os valores de absorção de água e índice de vazios.

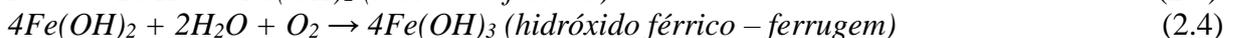
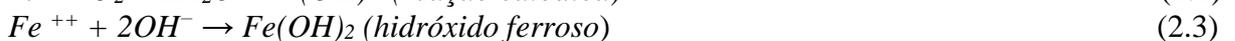
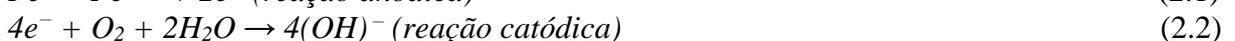
Os autores Yang *et al.*, (2015) avaliaram a influência de partículas plásticas de polipropileno modificado (PP), como substituição parcial (10, 15, 20 e 30%) do agregado miúdo, na trabalhabilidade e nas propriedades mecânicas de concretos leves autoadensáveis. Como agregado graúdo foi utilizado a argila expandida. Para avaliação do comportamento dos concretos moldados no estado endurecido, Yang *et al.* (2015) realizaram os ensaios de resistência à compressão, resistência à tração e módulo elástico. Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão mostraram que, aos 28 dias, a resistência à compressão de todos os CLAA foram superiores à 17MPa, satisfazendo assim os requisitos para concreto leve. Observou-se que o valor ótimo de substituição foi 15%, onde acima desse valor, todos valores de resistência decaíram.

### 2.2.3. Durabilidade em concretos

Nas últimas décadas, o crescente avanço das tecnologias têm levantando diversas discussões no que tange ao desenvolvimento sustentável. Na construção civil, essa preocupação têm despertando pesquisadores e profissionais da área quanto à durabilidade das estruturas de concreto e vida útil das edificações, conceitos esses que estão relacionados com os materiais constituintes, a agressividade do ambiente, consumo de cimento, fator água/cimento e a espessura do cobrimento do concreto (FARIAS, 2019).

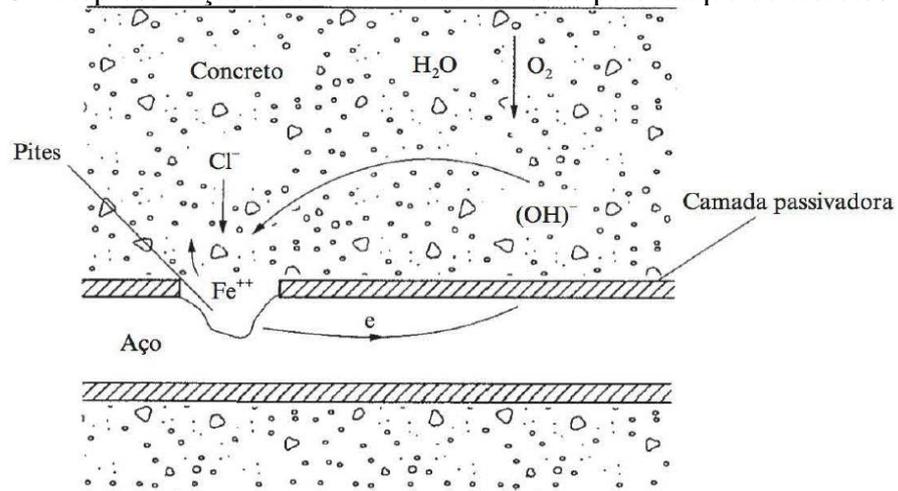
Durante certo período, a única propriedade requerida como critério para controle da qualidade e desempenho do concreto era sua resistência mecânica. Contudo, diante da necessidade de estruturas mais resistentes e duradouras frente à ambientes agressivos, outros parâmetros começaram a ser exigidos, como trabalhabilidade e, principalmente, durabilidade.

Existem diversos fatores responsáveis por comprometer o desempenho das estruturas de concreto, podendo ser mecânicos, biológicos, físicos ou químicos, sendo a junção dos dois últimos fatores evidenciado, principalmente, pela corrosão das armaduras. A corrosão das armaduras é uma das principais causas da deterioração das estruturas de concreto armado e pode ser definida como um processo espontâneo de deterioração do material devido à reações eletroquímicas resultantes de uma diferença de potencial elétrico ao longo do aço, ocasionando na perda de massa do material (FARIAS, 2019; NEVILLE, 2016). As reações responsáveis pela formação dos produtos da corrosão, são descritas nas reações 2.1 a 2.4:



Além da proteção física, o concreto gera uma proteção eletroquímica ao redor do aço, formando uma camada passivadora responsável por manter afastados agentes degradantes como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e os íons cloreto (Cl<sup>-</sup>). A corrosão por ataque de íons cloreto, considerada umas das mais agressivas, penetram a camada passivadora destruindo-a e, na presença de água e oxigênio, desencadeiam o processo de corrosão de maneira puntiforme, também conhecida como corrosão por pites (BURGOS *et al.*, 2017; NEVILLE, 2016). A Figura 3 demonstra como ocorre o processo de corrosão, onde a área danificada funciona como um ânodo, enquanto as áreas não danificadas servem como cátodos.

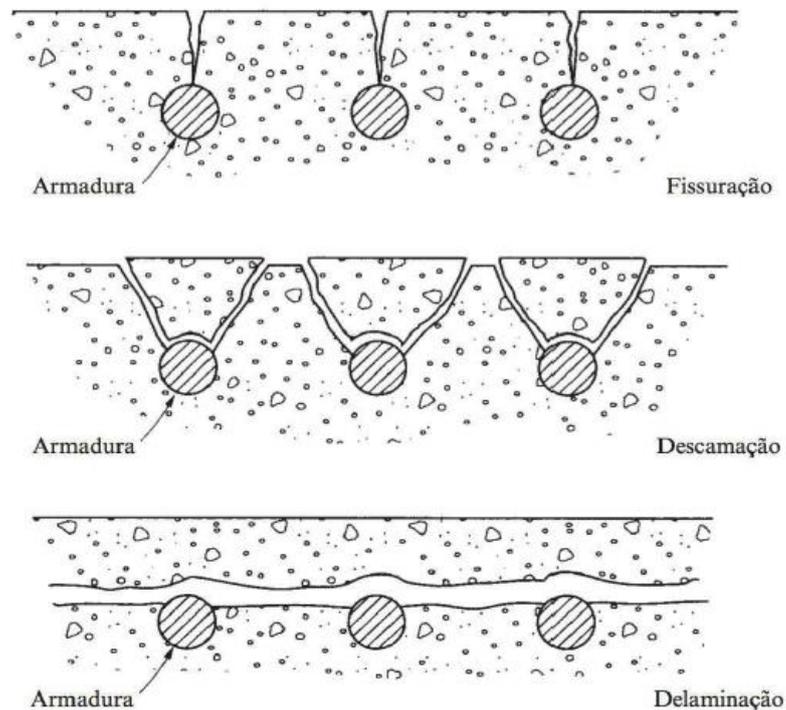
Figura 3 – Representação da ocorrência de corrosão pelo ataque de cloretos.



Fonte: Neville, 2016.

O progresso da corrosão no ânodo causa a perda da área da seção transversal do aço, diminuindo, assim, a capacidade resistente do concreto, favorecendo o crescimento de rachaduras e, em estados mais avançados, o desprendimento do concreto. (NEVILLE, 2016; OLLIVIER; VICHOT, 2014). Segundo Mehta e Monteiro (2014), dependendo do estado que se encontra o elemento em oxidação, o produto gerado pelo processo de corrosão (ferrugem) gera um aumento de volume do aço na ordem de 600% em relação ao volume inicial, ocasionando a expansão do concreto e, conseqüentemente, a fissuração. A Figura 4 apresenta um esquema de como pode ocorrer o desprendimento do concreto.

Figura 4 – Esquema representativo das deteriorações causadas pela corrosão.



Fonte: Neville, 2016.

Nesse cenário, estudos em busca de alternativas para mitigar a ação de íons cloreto em estruturas de concreto e conhecer os mecanismos de transporte e propagação desses agentes, têm sido amplamente realizados. Diante disso, uma grande quantidade de trabalhos estão sendo desenvolvidos sobre a produção de concreto leve e concreto leve autoadensável, com diversos tipos de agregados, submetidos ao ataque por íons cloreto (AZARIJAFARI *et al.*, 2018; NADESAN; DINAKAR, 2017; REAL; BOGAS; PONTES, 2015; BOGAS; BRITO; CABAÇO, 2014; GESOGLU *et al.*, 2014; GUNEYISI *et al.*, 2013; LIU; CHIA; ZHANG, 2011).

### 2.2.3.1 Ataque por íons cloreto

AzariJafari *et al.* (2018) investigaram o desempenho do concreto leve autoadensável produzido com argila expandida como agregado graúdo, realizando substituições de 25% dos materiais aglomerantes por sílica ativa, cinzas volantes, zeólito natural e metacaulim. A resistência ao ataque por íons cloretos dos concretos estudados, deu-se através do teste de migração rápida de cloreto, de acordo com a NT Build 492/1999, aos 28 dias de moldados. Os resultados obtidos demonstraram que todas as adições pozolânicas melhoraram a permeabilidade aos cloretos, ressaltando-se os concretos com sílica ativa e metacaulim. Segundo os autores, os resultados satisfatórios com essas adições foram atribuídos à melhoria das estruturas de poros dos concretos.

Os autores Nadesan e Dinakar (2017) por sua vez, realizaram uma revisão sistemática da literatura sobre a viabilidade de agregados leves sinterizados de cinza volante nas propriedades frescas, mecânicas e de durabilidade do concreto leve estrutural. Como resultados, os pesquisadores concluíram que a inclusão de agregado sinterizado de cinza volante diminuiu a penetração dos íons cloretos quando comparados com outros agregados (REAL; BOGAS; PONTES, 2015; GUNEYISI *et al.*, 2013) e, em outros casos, a carga passada pelos concretos, conforme ensaio da ASTM C1202, reduziu para 35% com o uso dos agregados de cinza volante (KAYALI, 2008).

Os pesquisadores Real, Bogas e Pontes (2015) caracterizam concretos leves estruturais com diferentes tipos de agregados leves frente à resistência à penetração por íons cloretos. Foram usados quatro tipos de agregados leves, sendo dois de argila expandida (Leca e Argex - Portugal), um de cinza volante (Lytag – Reino Unido) e um de ardósia expandida (Stalite – EUA). Os concretos foram produzidos com duas relações a/c e dois tipos de ligantes (sílica ativa e cinzas volantes) como substituição parcial do cimento. A penetração aos cloretos foi avaliada através do teste de migração rápida (NT Build 492/1999). Os resultados obtidos

pelos autores demonstraram que, os concretos com relação a/c maiores ou maior teor de cinza volante, apresentaram variações consideráveis no coeficiente de difusão de cloretos, enquanto a substituição com sílica ativa ocasionou em menores coeficientes.

Portanto, os autores concluíram que, a resistência à penetração de cloretos pode ser afetada substancialmente pelo tipo de ligante e a difusão de cloretos está exponencialmente relacionada à relação a/c, independentemente do tipo de agregado utilizado (REAL; BOGAS; PONTES, 2015).

Bogas, Brito e Cabaço (2014) verificaram as propriedades a longo prazo de concretos leves produzidos com a substituição parcial e total do agregado leve de argila expandida por agregados reciclados, obtidos da trituração de concreto leve estrutural e não-estrutural. Os agregados foram substituídos em teores de 20, 50 e 100%. Por fim, constataram que os coeficientes de difusão não sofreram grandes influências pela incorporação dos agregados reciclados em substituição aos agregados leves de argila expandida, podendo variar até 20% em 28 dias.

Gesoglu *et al.* (2014) desenvolveram um agregado leve de cinza volante, com pelotização à frio, e verificaram a influência nas propriedades do concreto autoadensável. Os agregados naturais, miúdos e grãos, foram substituídos em teores de 0 a 100%, com incrementos a cada 20%, pelos agregados confeccionados durante a pesquisa. Para verificação da permeabilidade à íons cloretos, os autores realizaram o teste rápido de permeabilidade aos cloretos (ASTM C1202-2006), aos 28 e 90 dias, em termos de carga passada pelo concreto.

De acordo com o estudo, os valores demonstraram que, aos 28 dias a permeabilidade aos íons cloretos aumentou simetricamente à substituição dos agregados naturais por agregados leves. No entanto, aos 90 dias, a penetração de íons cloretos diminuiu consideravelmente, indicando uma classificação muito baixa de acordo com a ASTM C1202, sugerindo que o efeito negativo dos agregados leves na permeabilidade dos concretos diminuiu notavelmente em maiores idades (GESOGLU *et al.*, 2014).

Em seu estudo, Guneyisi *et al.* (2013) realizaram um estudo experimental sobre as propriedades de concretos leves com agregados grãos leves de cinza volante, pelotizados à frio (CB) e sinterizados (S). Os agregados CB foram produzidos com cinza volante e cimento portland, enquanto os agregados S com cinza volante e bentonita. Foram produzidos duas séries de concretos, com relação água/cimento de 0,35 e 0,55, e sílica ativa com adição de 10%, tendo resistência à penetração de cloretos medida aos 28 dias em termos de carga passada (ASTM C1202-2006). Observou-se que, concretos contendo o agregado CB e relação

$a/c = 0,55$ , revelaram comportamento de alta permeabilidade aos cloretos, enquanto concretos com a mesma relação  $a/c$  e agregado S, apresentaram melhoria na permeabilidade ao cloreto.

Ainda, os autores Guneyisi *et al.* (2013) observaram que, para relação  $a/c = 0,35$ , a adição de sílica ativa reduziu os valores de penetração do cloreto. Contudo, ressaltam que, para uma mesma relação  $a/c$ , a utilização do agregado S pareceu ser mais eficaz que a adição de sílica, na diminuição da penetrabilidade à cloreto. Pois, a adição de sílica ao concreto com agregado CB forneceu uma redução de 14% no valor de carga passante, enquanto o concreto com agregado S reduziu 34% (GUNEYISI *et al.*, 2013).

Liu, Chia e Zhang (2011) realizaram um comparativo entre o concreto leve, com agregado miúdo e gráudo de argila expandida, o concreto convencional e uma pasta de cimento, tendo em comum a relação  $a/c = 0,38$ . A substituição dos agregados ocorreu de forma gradativa, sendo produzidas 7 misturas de concreto e 1 mistura de pasta. A resistência à penetração de íons cloretos foi avaliada por três métodos: Teste rápido de penetração de cloreto (ASTM C1202), teste de migração de cloretos (NT Build 492) e o teste de salinidade (AASHTO T259).

Os resultados obtidos pelos autores (LIU; CHIA; ZHANG, 2011) demonstraram que, embora os valores de carga passada, coeficiente de migração e coeficiente de difusão nos concretos leves não tenham apresentado diferenças significativas, constatou-se que a resistência à penetração de íons cloreto diminuiu conforme a quantidade de agregados leves aumentou. Ao comparar com a pasta de cimento, tanto o concreto convencional quanto o concreto leve apresentaram maior resistência à penetração de íons cloreto.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item são apresentadas as etapas do desenvolvimento experimental, os materiais e os procedimentos utilizados para o alcance dos objetivos deste estudo. A metodologia para desenvolvimento do estudo ocorreu em três fases. Por se tratar de uma pesquisa que visa complementar e os estudos realizados pelo grupo de Leal de Souza (2019) e Souza (2019), a primeira fase consistiu na seleção dos novos tipos de agregados a serem utilizados, tendo esses trabalhos como embasamento e, em seguida, separação das matérias-primas constituintes e produção desses agregados.

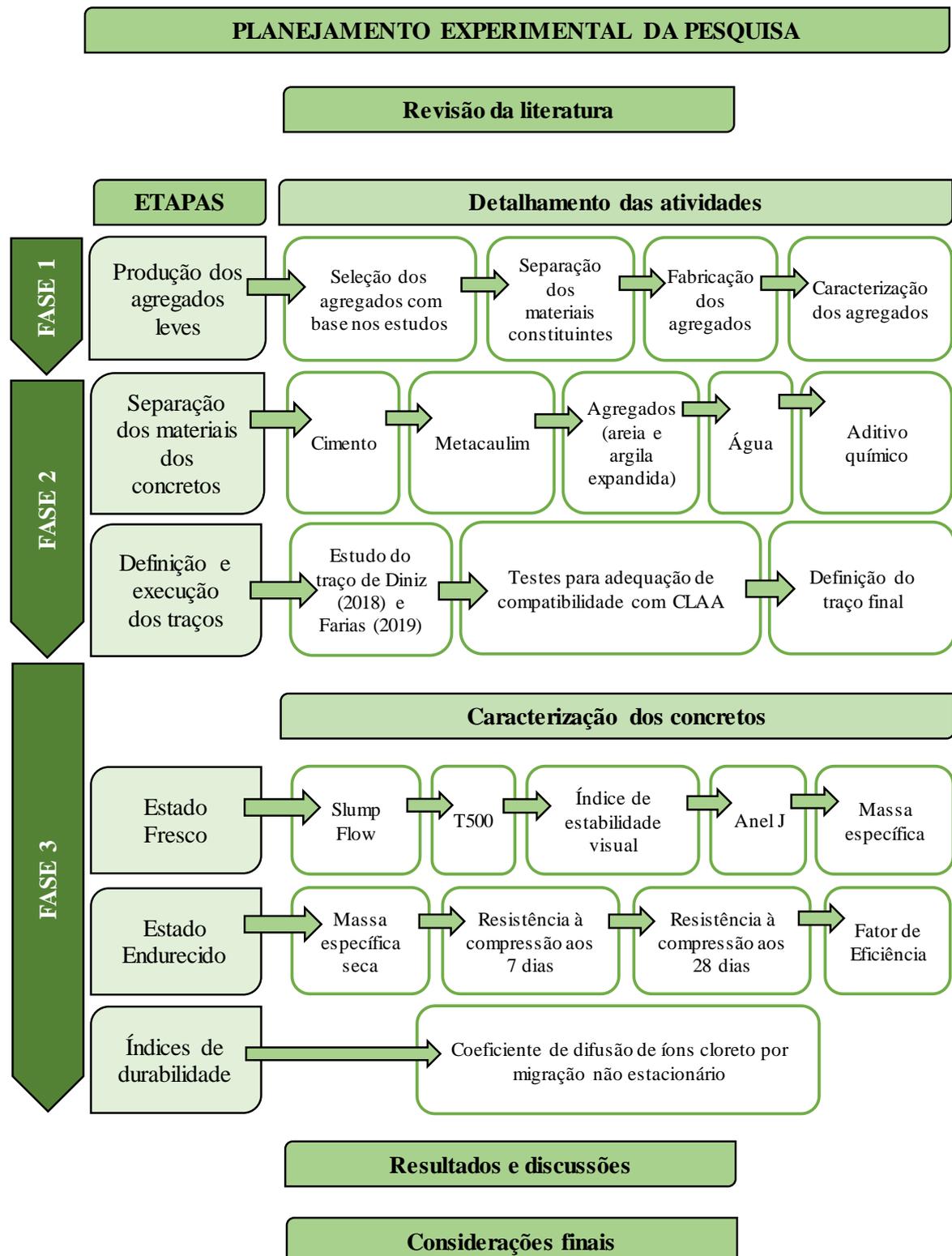
Foram produzidos três tipos de agregados, onde duas formulações são constituídas por agregados sinterizados a base de resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC) e argila, com proporções de 50% de RBC e 50% de argila e outra com 90% de RBC e 10% argila, segundo Leal de Souza (2019), e uma formulação de agregado leve sinterizado com resíduo da produção de Scheelita (RPS), constituído por 37% de RPS e uma mistura de argila e cinza da casca do arroz de acordo com a Patente nº BR 10 2019 014217 0, conforme estudo de Souza (2019).

Dando prosseguimento à pesquisa, na segunda fase realizou-se um estudo do traço, verificando o proporcionamento e selecionando os materiais a serem utilizados. O concreto leve autoadensável, como citado no item 2.2, não possui um método de dosagem específico. Contudo, por ser um concreto que precisa atender as mesmas propriedades do concreto autoadensável convencional, sendo a única diferença significativa o tipo de agregado empregado, utilizou-se um traço de CAA pré-estabelecido por estudos do grupo de pesquisa realizados por Diniz (2018) e Farias (2019), adaptando à aplicação em concreto leve autoadensável por meio da substituição do volume de agregado graúdo convencional pelo volume equivalente de agregado leve, conforme metodologia adotada por Assunção (2016), assim como, corrigindo o teor de argamassa e a quantidade de aditivo superplastificante pelo método de tentativas e erros, de acordo com Borja (2011) e Ting *et al.* (2019).

Finalmente, na terceira fase do estudo, foram realizados os ensaios para caracterização dos concretos no estado fresco, conforme parâmetros estabelecidos pela NBR 15823 – parte 1 a 3 (ABNT, 2017), e no estado endurecido, avaliando a resistência mecânica, pelo ensaio de compressão axial, e índices de durabilidade, com a determinação do coeficiente de difusão de íons cloreto.

O fluxograma da Figura 5 ilustra esquematicamente as etapas da pesquisa e o planejamento experimental desenvolvido.

Figura 5 – Fluxograma das atividades desenvolvidas durante a pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

### 3.1 Produção dos agregados leves

Os agregados a serem utilizados na execução do presente estudo foram selecionados a partir das pesquisas de Leal de Souza (2019) e Souza (2019). Esta seleção se deu com base nas características de absorção de água, resistência ao esmagamento e massa unitária apresentadas pelos autores em seus respectivos estudos, levando em consideração também a viabilidade técnica e a acessibilidade quanto à produção em maior escala, visto que a moldagem e a queima foram fatores limitantes da produção. Na Tabela 8 é apresentado a proporção dos materiais constituintes de cada agregado.

Tabela 8 – Composição das misturas dos agregados.

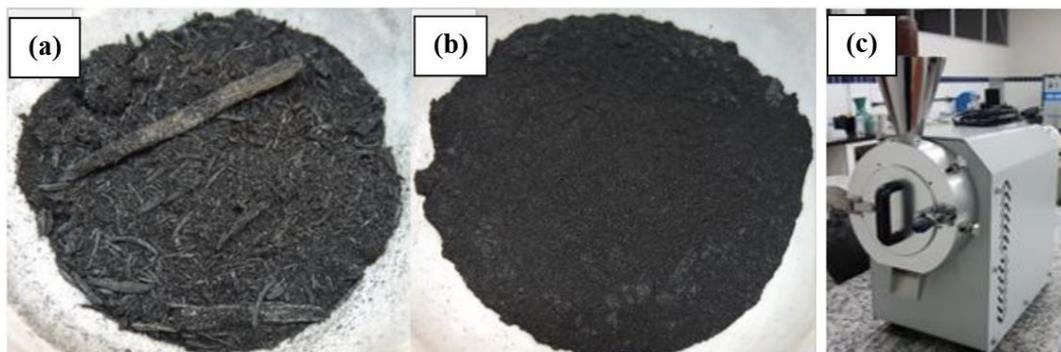
Agregados	Proporção dos materiais constituintes	Temperatura
RBC 50%	50% resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC) + 50% argila vermelha + 56% teor de água	1175 °C
RBC 90%	90% resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC) + 10% argila vermelha + 77% teor de água	1175 °C
RPS 37%	37% resíduo da produção de scheelita (RPS) + 29% cinza da casca do arroz + 34% argila vermelha + 30% teor de água	1150 °C

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

#### 3.1.1 Materiais

Na produção dos agregados RBC 50% e RBC 90%, utilizou-se o resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (Figura 6a) oriundo de uma usina sulcroalcooleira do município de Arês/RN/Brasil. O beneficiamento do resíduo se deu por secagem em estufa a  $110\pm 5^\circ\text{C}$  e moagem em moinho de facas do tipo Willey, modelo SL-31 (Figura 6b e 6c), com peneira de 50 mesh (abertura de 0,30mm).

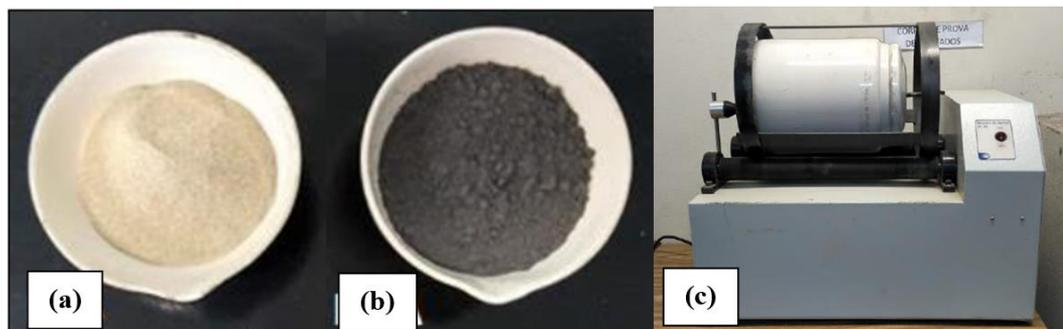
Figura 6 – RBC e moinho utilizado no beneficiamento: (a) RBC antes da moagem; (b) RBC após a moagem; (c) moinho de facas utilizado.



Fonte: Adaptado de Leal de Souza (2019).

Para o agregado de RPS 37%, utilizou-se o resíduo da produção de scheelita proveniente da Mina Brejuí (Figura 7a), situada no município de Currais Novos/RN/Brasil. Ainda, de forma conjunta com o RPS, optou-se pela utilização da cinza da casca de arroz (Figura 7b) oriunda da cidade de Alegrete/RS/Brasil. O beneficiamento do RPS se deu por secagem em estufa a  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ , moagem em moinho de bolas trifásico SOLAB (Figura 7c) e peneiramento em peneiras com abertura de 0,15mm.

Figura 7 – Resíduos e moinho utilizado no beneficiamento: (a) resíduo da produção de scheelita; (b) cinza da casca de arroz; (c) moinho de bolas.



Fonte: Adaptado de Souza (2019).

Na formulação de todos os agregados foram utilizados a argila vermelha, utilizada na indústria de cerâmica vermelha regional, oriunda do município de Assú/RN/Brasil, e a água fornecida pela Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN) para homogeneização das misturas.

### 3.1.2 Fabricação dos agregados leves

Os materiais constituintes de cada agregado foram homogeneizados ainda secos e, posteriormente, colocados na argamassadeira e adicionado água para realização da mistura úmida. Em seguida, procedeu-se com o processo de pelotização dos agregados de forma manual e, para cada tipo de agregado moldado, estabeleceu-se um valor de massa úmida, variando entre 0,8 a 1,6g, a fim de padronizar o diâmetro máximo dos agregados em 9,5mm, com base na afirmativa de alguns estudos que, agregados com até 10mm de diâmetro resultam em concretos com bom desempenho (TING *et al.*, 2019; ASSUNÇÃO, 2016; BORJA, 2011).

Consequente à moldagem, os agregados passaram 24h em secagem ao ar livre em ambiente laboratorial, em seguida foram submetidos à secagem em estufa à  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$  por 24h e, finalmente, encaminhados para o processo de sinterização em forno do tipo mufla, fabricado pela empresa JUNG (Figura 8). Para a sinterização dos agregados foram utilizadas

as muflas do Laboratório de Materiais do IFRN – Campus São Paulo do Potengi/RN e do Laboratório multiusuário de nutrição animal da Escola Agrícola de Jundiá (EAJ) da UFRN.

Figura 8 – Agregados na mufla: (a) agregados de RBC; (b) agregados de RPS.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Nessa etapa de sinterização, os agregados foram submetidos às temperaturas de 1175°C e 1150°C para agregados de RBC e agregado de RPS, respectivamente, durante 15 minutos, com taxas de aquecimento de 10 °C/min (LEAL DE SOUZA, 2019) e 8 °C/min (SOUZA, 2019). O resfriamento ocorreu de forma gradual até atingir a temperatura ambiente, quando os agregados eram retirados do forno e armazenados para posterior caracterização e aplicação. A Tabela 9 apresenta as características dos agregados desenvolvidos nesse estudo.

Tabela 9 – Características dos agregados produzidos.

<b>Característica</b>	<b>RBC 50%</b>	<b>RBC 90%</b>	<b>RPS 37%</b>
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,27	1,76	1,25
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	0,611	0,804	0,649
Absorção de água em 24h (%)	25	15	2,5
Resistência ao esmagamento (MPa)	1,12	1,38	1,53

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

### 3.2 Materiais para produção dos concretos

Apesar dos materiais utilizados na produção de concreto leve autoadensável serem os mesmos usados para o concreto autoadensável convencional, exceto pelo agregado leve, é necessário que se tenha conhecimento das características e propriedades de cada material, a fim de aplicar os procedimentos adequados no manuseio dos CLAA. Dessa forma, segue abaixo a descrição dos materiais utilizados para o desenvolvimento desse estudo.

#### 3.2.1 Cimento

Foi utilizado o Cimento Portland tipo V de alta resistência inicial (CP V-ARI) fornecido pela empresa Nacional Cimentos e fabricado no município de Pitimbu/PB/Brasil. Optou-se por esse cimento por não possuir em sua composição adições minerais que possam influenciar no desempenho do concreto leve autoadensável e por proporcionar resultados em menores idades. As características do cimento utilizado são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Características do cimento Portland CP V-ARI.

<b>Característica</b>	<b>Cimento CP V-ARI</b>
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,11
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,01
Área superficial específica (m <sup>2</sup> /g)	2,76
Volume total dos poros (cm <sup>3</sup> /g)	4,61x10 <sup>-3</sup>

Fonte: Adaptado de Farias (2019).

#### 3.2.2 Metacaulim

O metacaulim utilizado foi o Metacaulim BZ, fabricado e distribuído pela Caulim Nordeste, situada em Ipojuca/PE/Brasil, sendo o mais comumente utilizado na Região Nordeste. A Tabela 11 apresenta as características desse material.

Tabela 11 – Características do Metacaulim BZ.

<b>Característica</b>	<b>Metacaulim</b>
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,59
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	0,53
Índice de finura (%)	0,20
Área superficial específica (m <sup>2</sup> /g)	14,51
Volume total dos poros (cm <sup>3</sup> /g)	2,97x10 <sup>-2</sup>
Índice de atividade pozolânica (MPa)	13,85

Fonte: Adaptado de Farias (2019).

### 3.2.3 Agregados

Como agregado miúdo, optou-se por utilizar uma areia fina quartzosa de leito de rio, proveniente da região do município de Serrinha/RN/Brasil. Como agregado graúdo, além dos agregados já citados no item 3.1, utilizou-se o agregado leve à base de argila comercializado no Brasil pela empresa Cinexpan Indústria e Comércio. O agregado de argila expandida utilizado nesse estudo foi o AE-1506 ( $D_{m\acute{a}x} = 19\text{mm}$ ) e, de forma análoga aos agregados do item 3.1, o diâmetro máximo foi padronizado em 9,5mm por meio de separação por peneiramento. As propriedades físicas do agregado miúdo e da argila expandida são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Propriedades físicas da areia e da argila expandida.

<b>Característica</b>	<b>Areia</b>	<b>Argila expandida</b>
Massa específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,632	0,970
Massa unitária ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,513	0,544
Absorção de água em 24h (%)	-	14,0
Resistência ao esmagamento (MPa)	-	2,23

Fonte: Adaptado de Farias (2019) e Borja (2011).

### 3.2.4 Água de amassamento

Na produção dos concretos utilizou-se a água fornecida pela Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN), concessionária local responsável pelo abastecimento de água no estado.

### 3.2.5 Aditivo químico para concreto

O aditivo químico utilizado foi um aditivo superplastificante fornecido pela empresa MasterBuilders/BASF, à base de Éter Policarboxílico, conhecido comercialmente por MasterGlenium® SCC 160, a fim de garantir as propriedades de fluidez requeridas para um concreto leve autoadensável. Os dados técnicos do aditivo disponibilizados pelo fabricante são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Informações técnicas do aditivo superplastificante.

<b>Propriedade</b>	<b>Especificação</b>
Base química	Éter Policarboxílico
Aspecto	Líquido branco turvo
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,067 a 1,107
pH	7,00 a 9,00
Teor de sólidos (%)	38,00 a 42,00

Fonte: Adaptado de Farias (2019).

### 3.3 Definição e execução dos traços

A definição da composição base a ser utilizada para confecção dos concretos foi baseada em trabalhos anteriores do grupo de pesquisa sobre concreto autoadensável de Diniz (2018) e Farias (2019), adaptando à aplicação em concreto leve autoadensável pela substituição volumétrica do agregado graúdo convencional pelo volume equivalente de agregado leve, de acordo com metodologia adotada por Assunção (2016), bem como corrigindo o teor de argamassa e a quantidade de aditivo superplastificantes pelo método de tentativas e erros, de acordo com Borja (2011) e Ting *et al.* (2019).

Inicialmente realizou-se pequenos testes de moldagem para verificar a compatibilidade e o comportamento do traço com agregado leve. Após ensaios na mistura fresca e endurecida, procedeu-se com as alterações necessárias. Os traços definitivos e as respectivas proporções de cada material estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Composição em massa dos traços em estudo.

<b>Traços</b>	<b>Cimento</b>	<b>Metacaulim</b>	<b>Agregado miúdo</b>	<b>Agregado graúdo</b>	<b>Relação a/c</b>
CLAA-AE	1,0	0,1	1,85	0,75	0,405
CLAA-RBC50	1,0	0,1	1,85	0,845	0,405
CLAA-RBC90	1,0	0,1	1,85	1,11	0,405
CLAA-RPS37	1,0	0,1	1,85	0,897	0,405

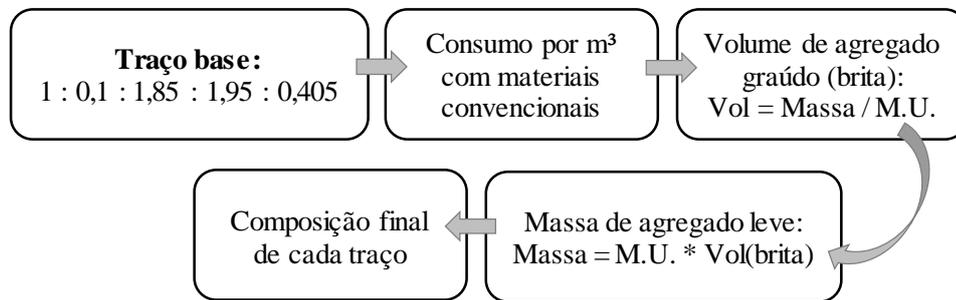
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Foram produzidos quatro traços com as mesmas proporções, exceto pelo agregado leve utilizado. O primeiro traço com agregado de argila expandida comercial (CLAA-AE), o segundo com o agregado RBC 50% (CLAA-RBC50), o terceiro com o agregado RBC 90% (CLAA-RBC90) e o quarto traço com o agregado RPS 37% (CLAA-RPS37). Apesar de cada

agregado apresentar um comportamento diferente quanto à absorção, decidiu-se por desconsiderar essa água absorvida e tornar o fator a/c constante, pois os agregados foram utilizados saturados com superfície seca e, portanto, a água disponível para fluidez do concreto foi aquela utilizada como relação água/cimento, visto que com a metodologia de pré-saturação dos agregados não há perda da água de amassamento pela absorção dos agregados.

Na dosagem do traço para concreto leve autoadensável, substituiu-se o agregado graúdo de peso normal pelo volume equivalente de agregado graúdo leve. Para isso, procedeu-se com o cálculo de consumo do traço base a fim de encontrar a massa e o volume aparente de agregado graúdo natural. Posteriormente, conhecendo-se a massa unitária do agregado leve, foi determinada a massa de agregado leve a ser utilizado. A seguir, na Figura 9 é apresentada a sequência de cálculo utilizada para determinação de cada traço.

Figura 9 – Sequência de cálculo da composição de cada traço.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Após a definição das composições de cada traço e avaliação do comportamento dos agregados na mistura, determinou-se o consumo de materiais, em kg/m<sup>3</sup>, com base nas massas específicas dos materiais utilizados, conforme mostrado pela Tabela 15.

Tabela 15 – Consumo dos concretos leves autoadensáveis moldados.

Composições	CLAA-AE	CLAA-RBC50	CLAA-RBC90	CLAA-RPS37
Cimento	449,31	468,74	476,48	457,53
Metacaulim	44,93	46,87	47,65	45,75
Agregado miúdo	831,22	867,17	881,49	846,43
Agregado graúdo leve	336,98	396,09	528,89	410,40
Água	181,97	189,84	192,97	185,30
% (adit. SP/finos)	1,00%	0,82%	1,30%	1,30%
Relação água/cimento	0,405	0,405	0,405	0,405
Agregados/finos	2,36	2,45	2,69	2,50

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Para a substituição do agregado convencional, em volume, pelo agregado leve, levou-se em consideração a massa unitária de cada agregado, como demonstrado anteriormente. Devido as diferentes massas específicas (densidades) dos agregados leves, o consumo de cimento e a relação agregados/finos sofreram variações de um traço para o outro, conforme aumentou a quantidade de agregados.

Ao manter a relação água/cimento constante para todas as composições, com o objetivo de retirar este parâmetro da avaliação do comportamento mecânico dos concretos e, assim, avaliar apenas a influência dos agregados leves, variou-se a quantidade de aditivo superplastificante para atender aos requisitos de autoadensabilidade, adequando ao comportamento de cada agregado na mistura. Para isso, foram realizadas pequenas misturas teste na argamassadeira e verificado o espalhamento através de mini *slump flow*, como mostrado na Figura 10. Este teste foi realizado nos concretos em virtude das dimensões dos agregados graúdos leves serem pequenas (<9,5 mm) e, a partir de sua realização, procedia-se com a avaliação visual do espalhamento considerando parâmetros de exsudação e segregação à medida que se adicionada o aditivo superplastificante, ficando estabelecido neste teste empírico que a quantidade de aditivo estaria adequada quando o concreto atingisse o espalhamento de 300 mm sem apresentar exsudação e/ou segregação.

Figura 10 – Verificação do espalhamento através de mini *slump flow*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Definida as quantidades, procedeu-se com a moldagem dos concretos. Inicialmente realizou-se a pesagem dos materiais constituintes para um volume de 15 litros de concreto, por traço, necessário para a caracterização no estado fresco e moldagem dos corpos de prova dos ensaios no estado endurecido. Devido a limitação na produção dos agregados leves, optou-se por utilizar o corpo de prova cilíndrico com diâmetro de 50mm e altura de 100mm, conforme limites estabelecidos pela NBR 5738 (ABNT, 2015), onde a dimensão básica do

corpo de prova de 50mm atende ao critério de ser três vezes maior que o diâmetro máximo do agregado graúdo utilizado, de 9,5mm. Portanto, foram moldados 12 corpos de prova cilíndricos 50x100mm, 2 corpos de prova prismáticos 40x40x160mm e 2 corpos de prova cilíndricos com 50mm de altura e 100mm de diâmetro.

### 3.4 Propriedades no estado fresco

O concreto leve autoadensável não possui documentos normativos e/ou diretrizes específicas sobre seu manuseio. Dessa forma, a caracterização do CLAA no estado fresco tem sido realizada seguindo os mesmos parâmetros e normativas do concreto autoadensável convencional. Para a realização desse estudo foram utilizadas as especificações, procedimentos e parâmetros estabelecidos pela EFNARC (2005) e pela NBR 15823 (ABNT, 2017). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais do IFRN – Campus São Paulo do Potengi.

#### 3.4.1 Determinação da fluidez, viscosidade aparente e estabilidade visual

A fluidez dos concretos produzidos foi determinada pelo ensaio de espalhamento, *Slump flow test*, seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR 15823-2 (2017). A realização desse ensaio se faz necessário por permitir avaliar o comportamento em fluxo livre do concreto, na ausência de obstruções, além de possibilitar a determinação de outros parâmetros, como o tempo de escoamento ( $t_{500}$ ) e o índice de estabilidade visual.

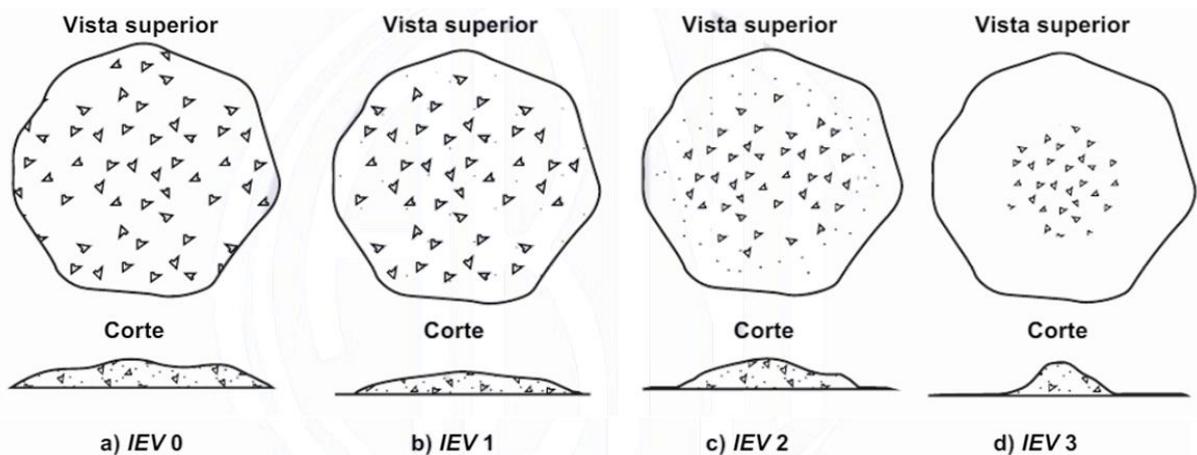
O tempo de escoamento, determinado pelo tempo que o concreto leva para se espalhar até o diâmetro de 500mm após a retirada do cone, é um parâmetro dado em segundos que se faz necessário para avaliação da viscosidade aparente do concreto. A Figura 11 ilustra a execução do ensaio e determinação desse parâmetro.



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15823-2 (2017).

O índice de estabilidade visual (IEV) é um parâmetro determinado a partir da análise visual do concreto imediatamente após o término do escoamento, a fim de verificar o comportamento dos agregados na mistura, da matriz argamassa e a ocorrência de exsudação e/ou segregação. Diante disso, a NBR 15823-2 (2017) apresenta uma ilustração do possível comportamento apresentado pelos concretos (Figura 12) e classifica o IEV em classes de 0 a 3, conforme apresentado na Tabela 16.

Figura 12 – Comportamento do concreto para cada classe do IEV.



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15823-2 (2017).

Tabela 16 – Classes do Índice de Estabilidade Visual.

Classe	IEV
IEV 0 (Altamente estável)	Sem evidência de segregação ou exsudação
IEV 1 (Estável)	Sem evidência de segregação e leve exsudação
IEV 2 (Instável)	Presença de pequena aureola de argamassa ( $\leq 10\text{mm}$ ) e/ou empilhamento de agregados no centro do concreto
IEV 3 (Altamente instável)	Segregação claramente evidenciada pela concentração de agregados no centro do concreto ou pela dispersão de argamassa nas extremidades (aureola de argamassa $> 10\text{mm}$ )

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15823-2 (2017).

### 3.4.2 Determinação da habilidade passante

Para determinar a habilidade passante dos concretos sob fluxo livre, característica fundamental em concretos com características autoadensáveis, realizou-se o ensaio do Anel J, conforme prescrito na NBR 15823-3 (2017). A execução desse ensaio ocorre de maneira semelhante ao *slump flow*, exceto por fazer uso de um anel metálico com barras espaçadas ao

longo do diâmetro, dessa forma permitindo a avaliação do fluxo do concreto na presença de obstruções, simulando uma situação de concretagem com armadura. Após a realização do ensaio, a habilidade passante do concreto é classificada por classes de acordo com o valor do PJ, que é a diferença entre o diâmetro médio de espalhamento com e sem o anel. A Tabela 17 apresenta a classificação de acordo com a NBR 15823-1 (2017).

Tabela 17 – Classificação de habilidade passante pelo anel J.

<b>Classe</b>	<b>Anel J (mm)</b>
PJ 1	0 a 25 com 16 barras de aço
PJ 2	25 a 50 com 16 barras de aço

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15823-1 (2017).

### 3.4.3 Massa específica

A determinação desse parâmetro realizou-se a partir da pesagem dos moldes metálicos antes e após a moldagem do concreto. Em seguida, calculou-se a diferença de peso entre as duas aferições, dividindo o resultado pelo volume do molde, resultando assim no valor da massa específica do concreto no estado fresco. Esse procedimento foi realizado para todos os traços em estudo.

Após o endurecimento dos concretos, determinou-se a massa específica seca para as idades de 7 e 28 dias. As amostras foram retiradas da cura úmida 24h antes de serem levadas para realização dos ensaios no estado endurecido e deixadas para secar ao ar livre. Em seguida, os valores de massa específica seca foram calculados.

### 3.5 Propriedades no estado endurecido

O estudo das características no estado endurecido dos CLAA produzidos é fundamental para verificar o desempenho em diferentes idades, assim como o cumprimento dos requisitos estabelecidos em norma. A avaliação ocorreu através da determinação das propriedades mecânicas e dos parâmetros de durabilidade. Para a realização dos ensaios foram moldados, para cada traço: 12 corpos de prova cilíndricos 50x100mm, 2 corpos de prova prismáticos 40x40x160mm e 2 corpos de prova cilíndricos com 50mm de altura e 100mm de diâmetro.

### 3.5.1 Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados seguindo as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2018), para as idades de 7 e 28 dias, sendo três corpos de prova para cada idade. Os concretos foram mantidos em cura úmida até a véspera do rompimento, sendo retirados 24h antes para aferição da massa específica seca, e em seguida capeados com enxofre para regularização das faces dos corpos de prova. Para a realização do ensaio utilizou-se a prensa Shimadzu AG-X 300 kN do Laboratório de Metais e Ensaios Mecânicos – LabMEM, no Departamento de Engenharia de Materiais, e a prensa Shimadzu AG-I 100 kN do Laboratório de Cimentos – LABCIM, ambos os laboratórios na UFRN. A velocidade de aplicação da carga utilizada foi de 0,30 MPa/s, conforme adequação com base nas especificações da NBR 5739 (ABNT, 2018) e na NBR 7215 (ABNT, 2019).

### 3.5.2 Relação resistência e massa específica seca – Fator de eficiência (FE)

Além dos parâmetros de massa específica e resistência à compressão para estudo dos CLAAs, o Fator de eficiência (FE) é outro parâmetro bastante utilizado. A determinação do FE se dá pela relação entre a resistência à compressão, aos 28 dias, e a massa específica do concreto. Para cada traço estudado, especificou-se o FE com os resultados dos respectivos valores de resistência à compressão aos 28 dias e o valor médio da massa específica seca ao ar livre.

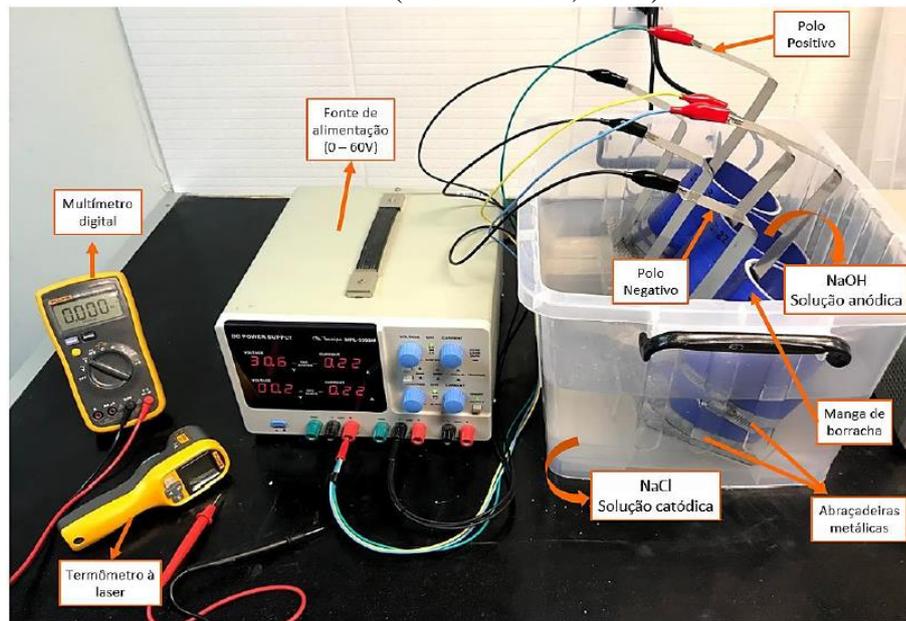
### 3.5.3 Difusão de íons cloreto por migração em regime não estacionário

O coeficiente de difusão de íons cloreto nos CLAAs foi avaliado pelo método estabelecido na NT Build 492 (NORDTEST, 1999) seguindo as especificações da E-463 (LNEC, 2004). A realização deste ensaio permite conhecer a resistência à penetração de íons cloreto nos concretos pela determinação do coeficiente de difusão. Devido ser acelerado por corrente elétrica, é possível caracterizar o concreto em até 72h, dependendo apenas da qualidade do concreto ensaiado.

Os concretos foram ensaiados com idade de 186 dias a partir da moldagem, com provetes de  $50 \pm 5$  mm de altura por  $100 \pm 2$  mm de diâmetro, sendo 2 corpos de prova para cada traço. A preparação dos corpos de prova se deu por cura úmida até os 28 dias e cura ao ar livre até a data de realização do ensaio. Os provetes foram colocados 24h antes em solução saturada de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , com a finalidade de garantir que a penetração dos cloretos nas amostras

ocorram predominantemente por difusão. Para a realização do ensaio os corpos de prova foram expostos a uma solução anódica (0,3M NaOH), na face superior, e a uma solução catódica (10% NaCl), na face inferior, e em seguida, submetidos a uma voltagem inicial de 30V, podendo aumentar dependendo da corrente passante, conforme especificações da E-463 (LNEC, 2004). A Figura 13 ilustra a esquematização do ensaio de difusão de íons cloreto por migração em regime não estacionário.

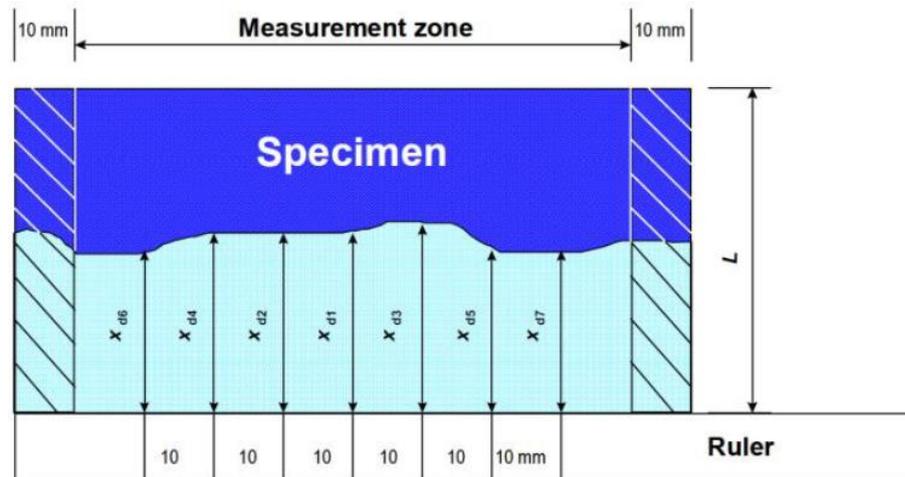
Figura 13 – Esquema do ensaio para determinação do coeficiente de difusão pelo método NT Build 492 (NORDTEST, 1999).



Fonte: Farias (2019).

Ao fim do ensaio, os provetes foram rompidos e, através da aspersão de solução de nitrato de prata (0,1M de  $\text{AgNO}_3$ ) nas faces rompidas, é possível observar a profundidade de penetração dos íons por processo colorimétrico devido a precipitação da solução de prata sobre a região afetada. Posteriormente, realizou-se a medição da profundidade de penetração de cada traço, com base nas diretrizes da E-463 (LNEC, 2004), como mostrado pela Figura 14.

Figura 14 – Ilustração da medição das profundidades de penetração dos cloretos.



Fonte: E-463 (LNEC, 2004) e NT Build (NORDTEST, 1999).

Após finalizar o ensaio e com todos os resultados obtidos, calcula-se o coeficiente de difusão pela Equação 3.1, conforme estabelecido pela E-463 (LNEC, 2004).

$$D = \frac{0,0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left( x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}} \right) \quad (\text{Equação 3.1})$$

Sendo D o coeficiente de difusão no estado não estacionário ( $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ); U o valor absoluto da voltagem aplicada (V); T o valor médio das temperaturas inicial e final na solução anódica ( $^{\circ}\text{C}$ ); L a espessura do corpo de prova (mm); X<sub>d</sub> o valor médio das medidas de profundidade (mm) e t a duração do ensaio, em horas. O valor final do coeficiente de difusão de cada traço foi obtido pela média dos valores dos dois corpos de prova ensaiados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Propriedades no estado fresco

Os concretos foram confeccionados a partir de um traço base utilizado pelo grupo de pesquisa em trabalhos anteriores de Diniz (2018) e Farias (2019), com adequações para a aplicação em CLAA. Na Tabela 18 são mostradas as composições dos concretos leves autoadensáveis, através do consumo de cada traço para um metro cúbico de concreto.

Tabela 18 – Consumo de cada traço por metro cúbico de concreto.

Composições	CLAA-AE	CLAA-RBC50	CLAA-RBC90	CLAA-RPS37
Cimento (kg)	449,31	468,74	476,48	457,53
Metacaulim (kg)	44,93	46,87	47,65	45,75
Agregado miúdo (kg)	831,22	867,17	881,49	846,43
Agregado graúdo leve (kg)	336,98	396,09	528,89	410,40
Água (kg)	181,97	189,84	192,97	185,30
Aditivo (kg)	4,94	4,23	6,81	6,54
% (adit. SP/finos)	1,00%	0,82%	1,30%	1,30%
Relação a/c	0,405	0,405	0,405	0,405
Teor de argamassa seca (%)	79%	77%	72%	76%
Agregado miúdo/agregado total	71%	69%	63%	67%
Agregado leve em m <sup>3</sup> por m <sup>3</sup> de concreto	347,40	311,88	300,51	328,32

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A ACI-213 R03 (2003) ressalta que, embora o agregado leve funcione como um “armazenador de água”, essa água absorvida internamente não está imediatamente disponível para a mistura, não devendo então ser contada como água de amassamento. Sendo assim, optou-se por desconsiderar a quantidade de água absorvida pelos agregados, fixando o fator água/cimento a fim de estabelecer uma propriedade em comum entre as misturas, e ajustando a viscosidade dos concretos pela quantidade de aditivo superplastificante.

De acordo com as informações apresentadas na Tabela 18, apesar do traço base utilizado ser o mesmo para todas as misturas, os consumos foram diferentes para cada

concreto devido a substituição do agregado graúdo convencional ter sido realizada utilizando a massa unitária dos agregados leves. Consequentemente, o teor de argamassa, a porcentagem de agregado miúdo e o volume de agregado leve por metro cúbico também variaram entre si, visto que o consumo de materiais é realizado com os valores de massa específica.

Os teores de argamassa das misturas variaram entre 72 e 79% e, apesar de não serem valores usuais para concretos autoadensáveis, estudos anteriores com concreto leve autoadensável apresentaram valores semelhantes, variando entre 66 e 82% (ALMAWLA; MOHAMMED; AL-HADITHI, 2019; AZARIJAFARI *et al.*, 2018; GRABOIS *et al.*, 2016; TOPÇU; UYGUNOGLU, 2010). Esse aumento ocorre devido o agregado leve ser mais poroso, quando comparado ao agregado graúdo convencional, demandando assim uma maior quantidade de argamassa para encobrir os grãos, a fim de manter a autoadensabilidade e promover a homogeneização adequada dos agregados na mistura.

É importante ressaltar que, convencionalmente, valores elevados de teor de argamassa podem ocasionar aumento na retração do concreto, em virtude do aumento de materiais finos na mistura. Contudo, por sua estrutura porosa, o agregado leve funciona como um reservatório de água que, durante o processo de cura, libera aos poucos a água retida auxiliando na cura interna e, consequentemente, diminuindo os efeitos causados pela retração.

Ainda, a EFNARC (2005) estabelece valores limites para alguns parâmetros de concretos autoadensáveis, dentre eles a porcentagem de agregado miúdo em relação ao peso total de agregados, que variam entre 48 e 55%. No presente estudo, esses valores variaram entre 63 e 71%, concordando com os valores encontrados por Almawla, Mohammed e Alhadithi (2019), de 61 a 69%, e AzariJafari *et al.* (2018), de 71 a 72% para concreto leve autoadensável. Esse parâmetro influencia diretamente na viscosidade das misturas, aumentando a fluidez dos concretos e diminuindo o tempo de escoamento pela diferença de densidade entre a matriz cimentícia e os agregados. É necessária precaução a fim de evitar a segregação da argamassa com relação ao agregado leve, sendo essa uma das maiores questões concernentes à produção e aplicação do concreto leve autoadensável (GRABOIS, 2012).

Por conseguinte, também podemos inferir uma relação diretamente proporcional entre o consumo de aditivo e o consumo de agregados leves. Percebe-se que em todas as misturas a quantidade de aditivo requerida para obtenção dos parâmetros adequados aumentou, exceto no CLAA-RBC50. Devido a elevada absorção dos agregados do CLAA-RBC50, ocasionando

uma relação de troca com o meio mais rápida, a perda da água absorvida internamente é incluída mais cedo à mistura, fazendo com que o aditivo reaja mais rápido, não necessitando de quantidades maiores do superplastificante. Contudo, Yang *et al* (2015) ressalta que, embora haja essa diminuição na quantidade do aditivo e que a presença dessa água livre gere melhorias na fluidez do concreto, o autor alerta que o acúmulo excessivo dessa água pode causar segregação e/ou exsudação.

Os valores de agregado graúdo leves utilizados nas composições em análise por metro cúbico, variaram de 300 a 347 l/m<sup>3</sup>. De acordo com Bogas, Gomes e Pereira (2012), concretos leves autoadensáveis podem ser produzidos com volumes de até 325 l/m<sup>3</sup> de agregado graúdo sem apresentar segregação, sendo esse valor passível de ajustes conforme alterações na relação finos/agregado miúdo ( $V_p/V_s$ ) e variações nas características dos agregados graúdos, sugerindo-se um valor limite de 350 l/m<sup>3</sup>, onde valores maiores torna inviável a produção de CLAA. A Tabela 19 apresenta os parâmetros volumétricos estabelecidos no presente estudo, definidos a partir das informações da Tabela 18.

Tabela 19 – Parâmetros volumétricos obtidos a partir do consumo de cada material.

<b>Relações</b>	<b>CLAA-AE</b>	<b>CLAA-RBC50</b>	<b>CLAA-RBC90</b>	<b>CLAA-RPS37</b>
Agregado miúdo/argamassa ( $V_s/V_m$ )	0,627	0,627	0,627	0,627
Finos/agregado miúdo ( $V_p/V_s$ )	0,595	0,595	0,595	0,595
Agregado graúdo/argamassa ( $V_g/V_m$ )	0,254	0,286	0,376	0,304

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

É possível observar que a relação agregado miúdo/argamassa ( $V_s/V_m$ ) e a relação finos/agregado miúdo ( $V_p/V_s$ ) permaneceram constantes, com valores de 0,627 e 0,595, respectivamente, comprovando que a matriz cimentícia foi proporcionalmente igual em todas as misturas, uma vez que a substituição ocorreu apenas no agregado graúdo. Em contrapartida, devido as diferentes características dos agregados leves, a relação agregado graúdo/argamassa ( $V_g/V_m$ ) apresentou variação de um traço para outro, com valores entre 0,254 e 0,376.

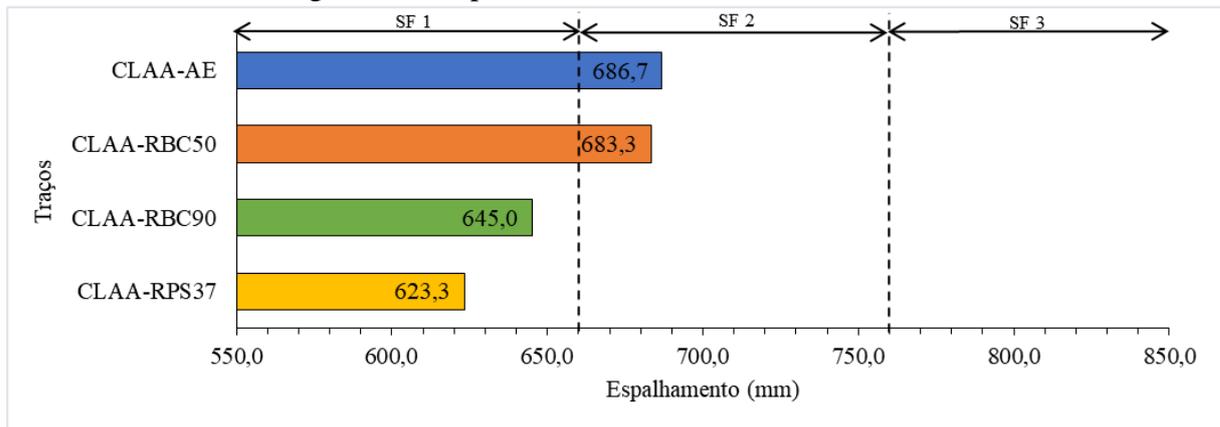
Em seus estudos, Bogas, Gomes e Pereira (2012) e Nepomuceno, Pereira-de-Oliveira e Pereira (2018) sugerem valores de  $V_p/V_s$  variando entre 0,55 a 0,80 e  $V_s/V_m$  entre 0,41 a 0,49, para volume de agregado leve por metro cúbico a partir de 296 l/m<sup>3</sup>. Em relação ao  $V_p/V_s$ , os autores alertam que, valores maiores que o intervalo indicado pode resultar em CLAAAs com maior volume de agregados graúdos e menor volume de argamassa, prejudicando assim a trabalhabilidade do traço. Por outro lado, valores menores de  $V_p/V_s$  resultarão em CLAAAs com menor volume de agregado graúdos e maior volume de argamassa, facilitando a ocorrência de segregação. Portanto, conforme mostrado na Tabela 19, os parâmetros utilizados no presente estudos atendem ao indicado pelos autores, exceto pelo  $V_s/V_m$  que, devido a padronização do diâmetro do agregado graúdo, a quantidade de agregado miúdo passou por um incremento, a fim de garantir a autoadensabilidade das misturas e o melhor preenchimento do traço.

Desse modo, para avaliação das características no estado fresco dos quatro traços de concreto leve autoadensável produzidos nesse estudo, foram realizados os ensaios para verificação da fluidez, viscosidade aparente, estabilidade visual, habilidade passante e massa específica.

#### 4.1.1 Determinação da fluidez, viscosidade aparente e estabilidade visual

Os parâmetros de autoadensabilidade dos concretos foram determinados conforme preconizado pela NBR 15823 – parte 1 a 3 (ABNT, 2017). A fluidez dos concretos foi determinada através do *Slump Flow Test* com base nas medidas de espalhamento. De acordo com o estabelecido pela NBR 15823-1 (ABNT, 2017), os concretos podem ser classificados em SF1 (550 – 650), SF2 (660 – 750) e SF3 (760 – 850), tendo aplicação específica para cada classe. Assim, conforme mostrado na Figura 15, os concretos CLAA-AE e o CLAA-RBC50 classificam-se como SF2, sendo adequados para a maioria das aplicações de concreto armado, enquanto os concretos CLAA-RBC90 e o CLAA-RPS37 classificam-se como SF1, indicados para estruturas com baixa taxa de armadura, concretos autoadensáveis que precisam de bombeamento e/ou estruturas que exigem pouco espalhamento horizontal. Destaca-se que não foi intuito desse trabalho padronizar as classes de espalhamento dos CLAAAs, uma vez que a padronização poderia ocasionar exsudação e/ou segregação, inviabilizando a produção dos CLAAAs, seja por excesso de aditivo, no caso de tentar tornar as composições CLAA-RBC90 e o CLAA-RPS37 mais fluidas, ou bloqueios nas composições CLAA-AE e o CLAA-RBC50, no caso de torná-las menos fluidas.

Figura 15 – Espalhamento dos concretos estudados.



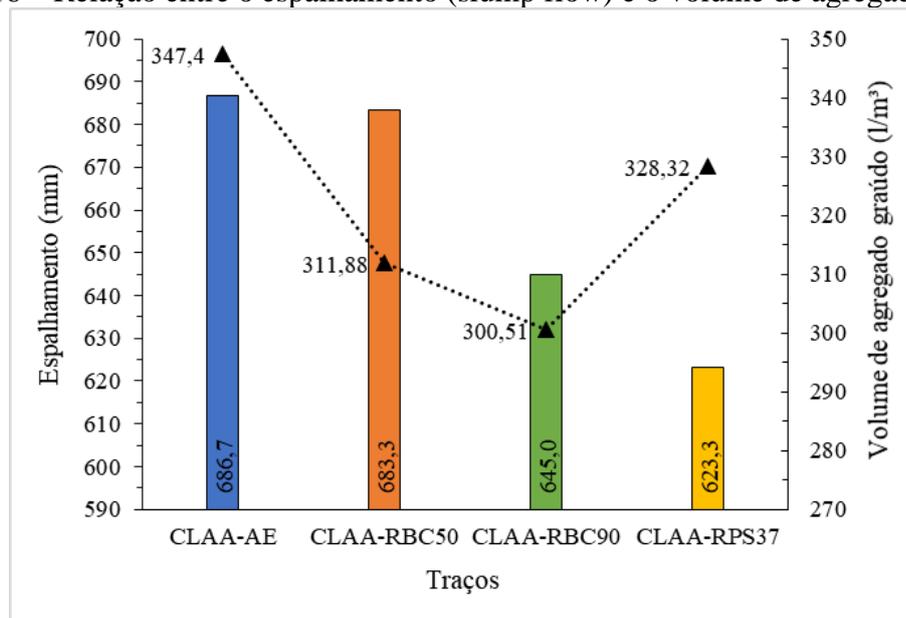
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A diferença no espalhamento do CLAA-AE em relação aos demais concretos, pode ser atribuída à baixa densidade apresentada pelo agregado de argila expandida e por sua superfície vítrea, resultando assim, na maior facilidade de escoamento da matriz cimentícia pelo fácil rolamento dos agregados, corroborando com Erdem (2014) e Borja (2011).

Bogas, Gomes e Pereira (2012) observaram que, em concretos leves autoadensáveis a matriz cimentícia precisa apresentar viscosidade suficiente para neutralizar a sedimentação e/ou flutuação do agregado graúdo, envolvendo-os e auxiliando na diminuição do atrito interno entre as partículas. Quando a composição da argamassa for a mesma em todas as misturas, os autores afirmam que o teor de argamassa se torna então o principal fator a influenciar na capacidade de espalhamento.

Os resultados obtidos nesse trabalho demonstram que o traço com maior espalhamento, o CLAA-AE, apresentou maior teor de argamassa (Tabela 18), embora também possua o maior volume de agregado graúdo por metro cúbico. Nas demais misturas, contudo, observa-se que as características individuais de cada agregado pode ter influenciado de maneira mais significativa no comportamento apresentado. Na Figura 16 é possível observar a relação entre o espalhamento e o volume de agregado graúdo.

Figura 16 – Relação entre o espalhamento (slump flow) e o volume de agregado graúdo.



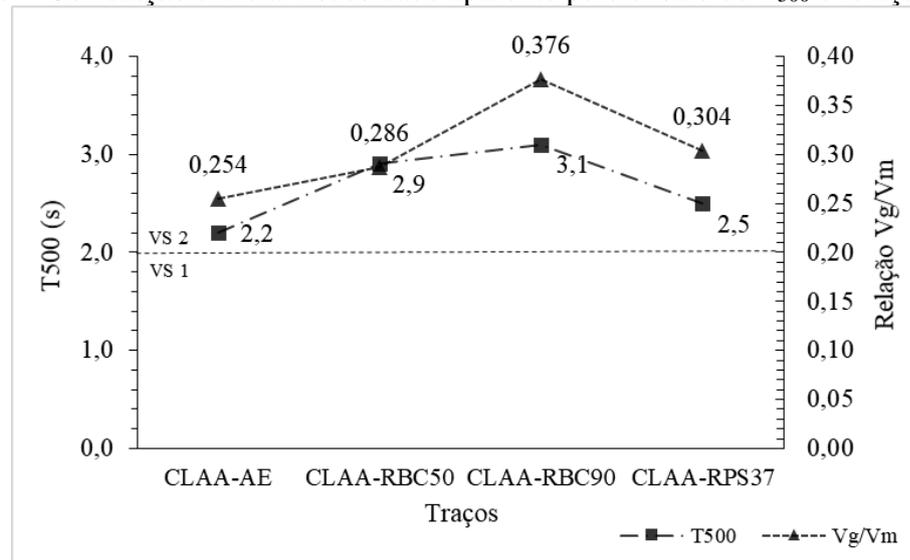
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Comparando as misturas classificadas como SF2, o CLAA-RBC50 apresentou espalhamento ligeiramente menor que o CLAA-AE, apesar de possuir menor volume de agregado graúdo e menor teor de argamassa. Dessa forma, esse comportamento pode ser atribuído à maior densidade do agregado leve RBC 50% quando comparado com o agregado leve de argila expandida.

No caso das misturas classificadas como SF1, embora o agregado do CLAA-RBC90 apresente maior densidade que o agregado do CLAA-RPS37, o resultado de maior espalhamento pode ser justificado pela diferença na absorção dos agregados. A ACI 213 R-03 (2003) salienta que, valores de absorção de água ideais para agregados leves é geralmente entre 5% e 25%. Dessa forma, enquanto o agregado RBC 90% apresenta uma absorção de 15% que, além de facilitar a homogeneização entre agregado e matriz cimentícia, está mais próxima da absorção da argila expandida de 14%, o agregado RPS 37% possui absorção de 2,5%, dificultando dessa forma a rápida adesão entre agregado e pasta.

De maneira conjunta ao *Slump Flow*, aferiu-se o tempo de escoamento de cada mistura até o diâmetro de 500mm. A Figura 17 apresenta os resultados do ensaio de tempo de escoamento ( $t_{500}$ ), que tem como finalidade a aferição da viscosidade aparente, característica essa relacionada com a consistência da mistura, influenciando diretamente a resistência do concreto ao escoamento, relacionando os resultados obtidos com a relação  $V_g/V_m$ .

Figura 17 – Correlação entre a viscosidade aparente pelo ensaio de  $T_{500}$  e relação  $V_g/V_m$ .



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

De acordo com os valores encontrados, todos os concretos classificam-se como VS2, adequando-se à maioria das aplicações correntes e apresentando efeito tixotrópico por acarretar menor pressão sobre as formas e melhor resistência à segregação, conforme definições estabelecidas pela NBR 15823-1 (ABNT, 2017). Ainda, é possível observar uma correspondência diretamente proporcional entre a relação agregado gráúdo/argamassa ( $V_g/V_m$ ) e o tempo de escoamento, exceto pelo traço CLAA-RPS37 por apresentar um alto consumo de agregado gráúdo, quando comparado ao CLAA-RBC50.

Os autores Nepomuceno, Pereira-de-Oliveira e Pereira (2018) e Bogas, Gomes e Pereira (2012) afirmaram que os valores do  $t_{500}$  tenderam a aumentar conforme o volume de agregado por metro cúbico aumentou. Contudo, esse comportamento não foi observado no presente estudo, devido justamente os traços com maiores volumes de agregado leve corresponderem aos maiores teores de argamassa, favorecendo assim o escoamento.

Ainda, concordando com Barnat-Hunek *et. al* (2018), pode-se constatar uma relação entre o aumento do consumo de agregado miúdo (Tabela 18) com a viscosidade, visto que, à medida que a quantidade de areia aumenta no traço, ocorre também o aumento do tempo de escoamento, resultado da diferença de densidade dos agregados e da matriz cimentícia (TING *et al.*, 2019; TOPÇU; UYGUNOGLU, 2010).

Nahhab e Ketab (2020) e Almawla, Mohammed e Al-hadithi (2019) verificaram em seus estudos uma relação inversamente proporcional entre a quantidade volumétrica de agregados leves na mistura e o tempo de escoamento. Conforme apresentado na Tabela 18 e

na Figura 17, podemos observar esse mesmo comportamento no presente estudo. Isso acontece devido o esforço necessário para transportar os agregados graúdos leves na mistura serem menores, quando comparados ao CAA com agregado convencional.

Farias (2019) em seu estudo constatou que, apesar dos concretos possuírem a mesma classificação quanto à viscosidade, os traços com maior quantidade de adições minerais, principalmente de metacaulim, apresentaram valores maiores de viscosidade. No presente estudo, com base na Tabela 18 e na Figura 17, embora a quantidade de metacaulim seja a mesma para todos os traços, é perceptível uma relação diretamente proporcional entre o aumento da viscosidade com a quantidade de finos na mistura.

A Figura 18 mostra o comportamento dos concretos durante o espalhamento, onde é possível obter o índice de estabilidade visual, parâmetro qualitativo para verificação do comportamento dos concretos quanto à segregação e/ou exsudação. De acordo com o observado, todas as composições classificam-se como IEV 0, onde todas as misturas espalharam de maneira uniforme, não apresentando evidências de segregação e/ou exsudação, com a presença de agregados até a borda da circunferência.

Figura 18 – Índice de estabilidade visual pelo detalhamento da borda do espalhamento.



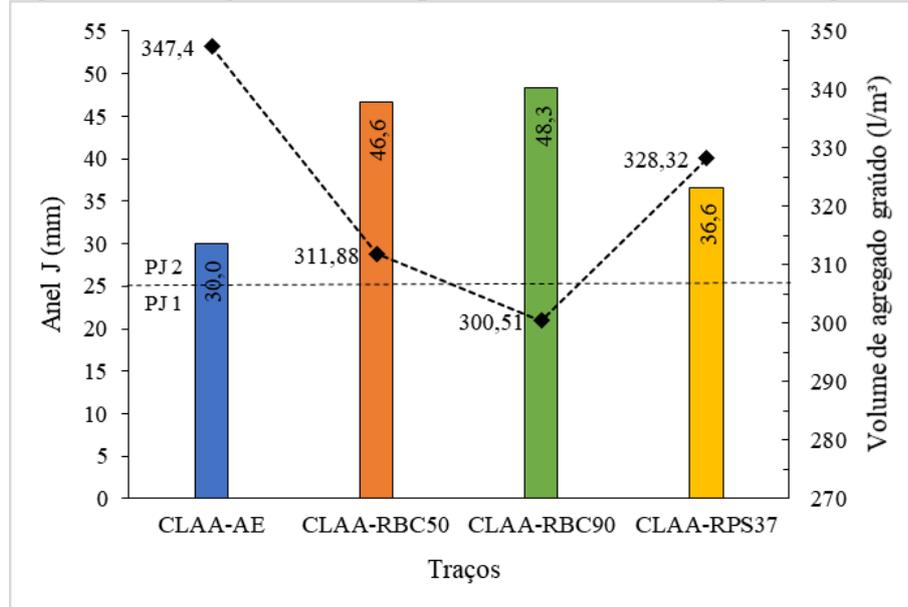
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

#### 4.1.2 Determinação da habilidade passante

A determinação da habilidade passante em concretos autoadensáveis é de suma importância para avaliar a resistência à segregação e o comportamento das misturas na presença de obstruções. A Figura 19 apresenta os resultados obtidos para determinação da

habilidade passante dos CLAAs pelo ensaio do Anel J, relacionando com o volume de agregado graúdo de cada mistura.

Figura 19 – Relação habilidade passante e volume de agregado graúdo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

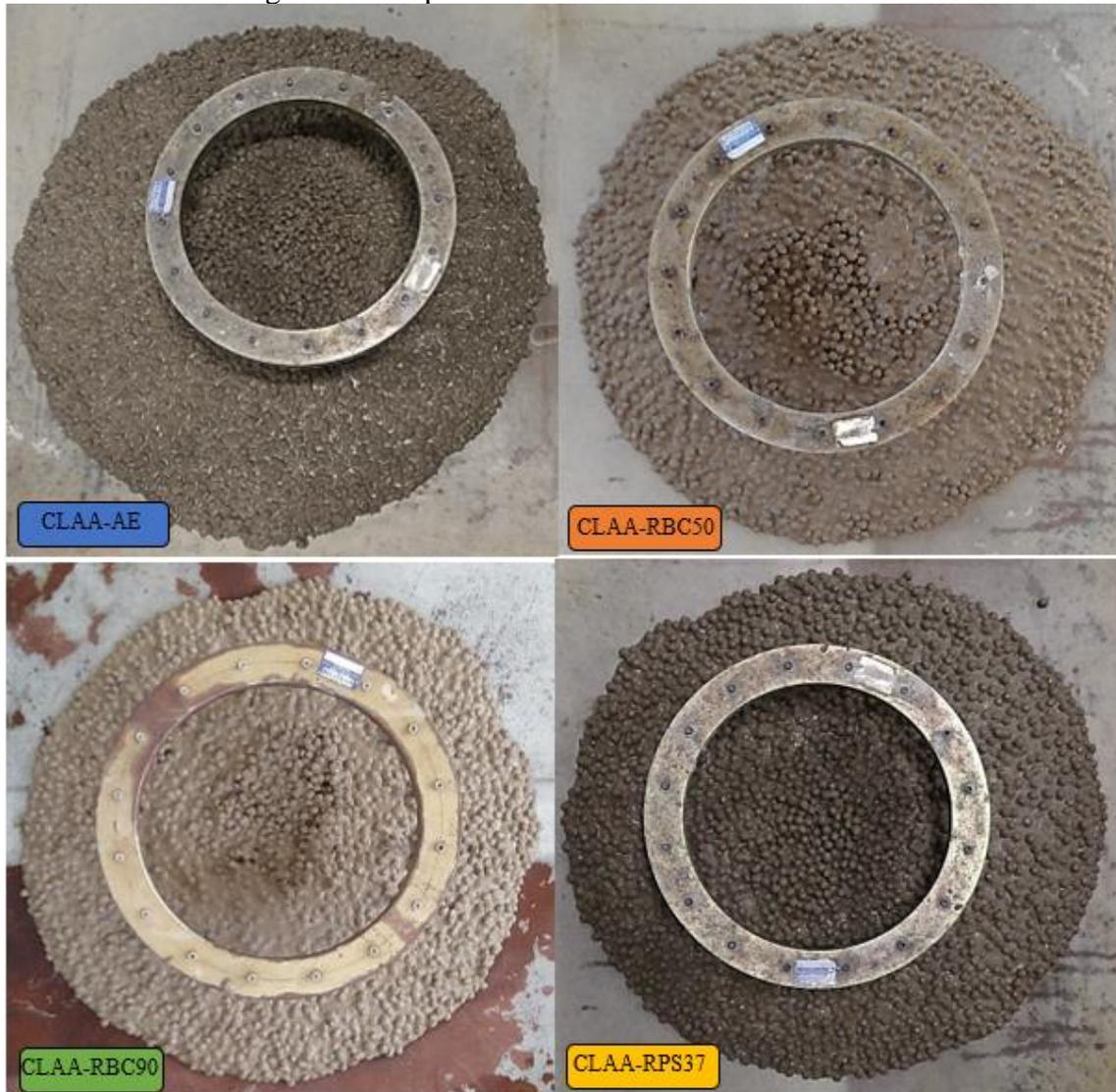
Dessa forma, nota-se pelos resultados apresentados que todas as composições de concretos se classificam como PJ2, sendo adequados para a maioria das aplicações e em elementos estruturais com espaçamento de armadura entre 60mm e 80mm, conforme parâmetros estabelecidos pela NBR 15823-1 (ABNT, 2017). Ainda, é possível observar quanto maior o volume de agregado graúdo, menor a dificuldade de passagem apresentada, o que pode ser justificado pela diminuição do espaçamento entre os agregados na mistura e, conseqüentemente, aumento do atrito interno, fazendo com que o concreto seja impulsionado e flua com maior facilidade entre os obstáculos. Logo, o traço com maior volume de agregado leve apresentou a menor dificuldade de passagem, enquanto o traço com menor volume de agregado demonstrou a maior dificuldade, sendo estes o CLAA-AE e o CLAA-RBC90, respectivamente.

De acordo com os dados da Tabela 19 e da Figura 19, observa-se que os traços com maior dificuldade de passagem, no caso o CLAA-RBC50 e CLAA-RBC90, apresentaram elevados valores da relação  $V_g/V_m$ , sugerindo assim, o aprimoramento da dosagem para aumento da quantidade de argamassa nas misturas. No entanto, não se constatou o mesmo comportamento para a mistura CLAA-RPS37 que, apesar de possuir maior valor de  $V_g/V_m$  em relação ao CLAA-RBC50, apresentou melhor desempenho quanto à habilidade passante,

podendo ser justificado pela baixa absorção do agregado RPS 37% e pela maior quantidade volumétrica de agregado graúdo.

A Figura 20 demonstra o comportamento de cada traço durante a realização do ensaio, sendo possível verificar que todas as misturas apresentaram pequeno acúmulo de agregados no centro, embora não tenham sinais de segregação e exsudação nas extremidades.

Figura 20 – Espalhamento dos CLAAs com Anel J.

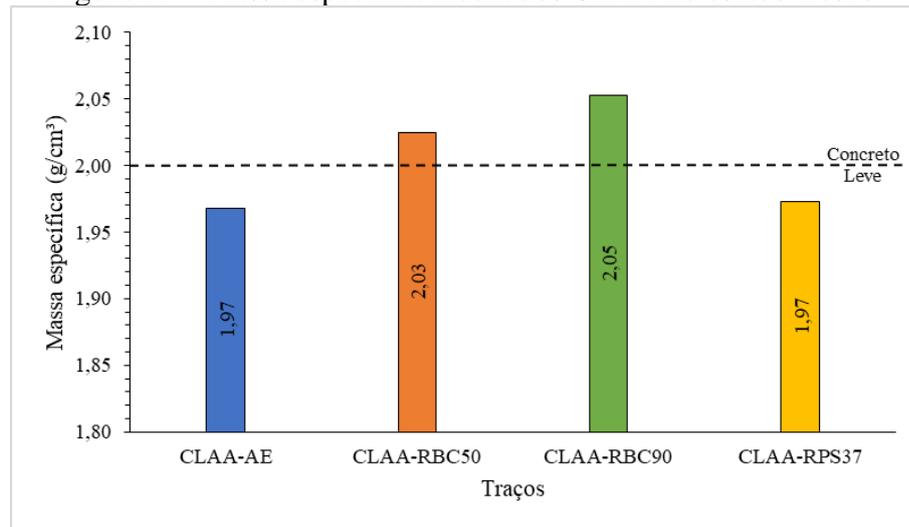


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

#### 4.1.3 Massa específica

A determinação da massa específica foi a última característica avaliada no estado fresco. A avaliação dessa propriedade foi realizada pela pesagem de 6 amostras para cada traço e, posteriormente, calculou-se o valor médio de cada mistura. A Figura 21 apresenta os valores de massa específica média no estado fresco dos concretos estudados.

Figura 21 – Massa específica média dos CLAA no estado fresco.

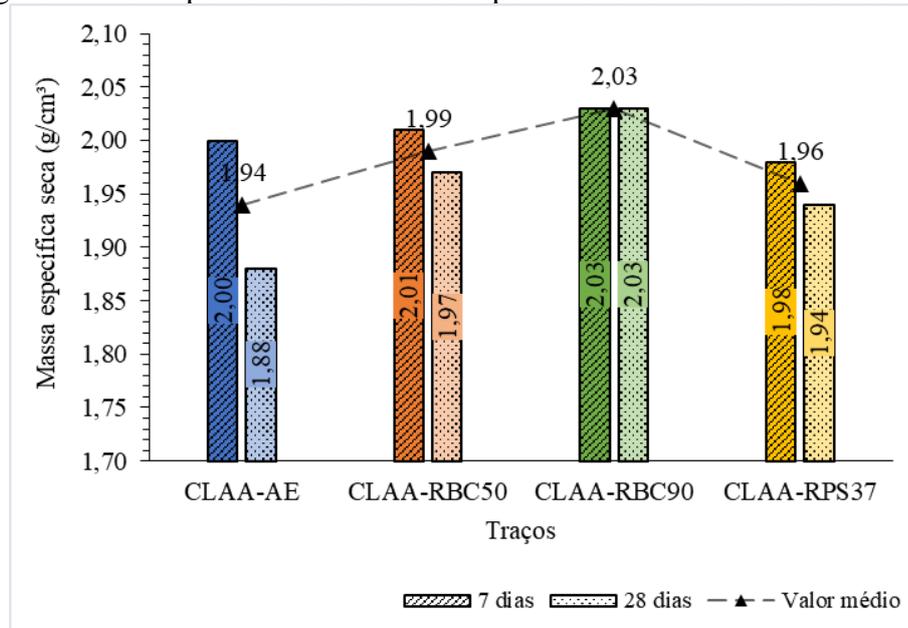


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Devido a alta absorção dos agregados das misturas CLAA-RBC50 e CLAA-RBC90, respectivamente, 25% e 15%, os valores de massa específica no estado fresco ficaram acima do limite normativo para concretos leves autoadensáveis, visto que os agregados leves foram pré-saturados, estando esses valores elevados associados à quantidade de água absorvida pelos agregados no período de saturação. Ainda, pode-se notar que, os traços com menor volume de agregado leve por metro cúbico (Tabela 18), correspondem aos maiores valores de massa específica, corroborando com Nepomuceno, Pereira-de-Oliveira e Pereira (2018), os quais afirmam que a diminuição do volume de agregado leve resulta no aumento da densidade do concreto, estabelecendo assim uma relação inversamente proporcional entre esses fatores.

Além da medição da massa específica no estado fresco, procedeu-se com a determinação da massa específica aos 7 e 28 dias de cura. Dessa forma, a Figura 22 apresenta os valores de massa específica seca aos 7 e 28 dias de cura e o valor médio de massa específica para cada traço em estudo.

Figura 22 – Comportamento da massa específica seca aos 7 e 28 dias de cura.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Diante dos resultados, nota-se que apenas o CLAA-RBC90 apresentou massa específica acima do valor compreendido pela NBR 8953 (ABNT, 2015), de 2,00 g/cm<sup>3</sup>. Contudo, conforme afirmado no parágrafo acima, esse comportamento pode ser justificado devido o menor volume de agregados leves na composição do CLAA-RBC90, como visto na Tabela 18, e pela absorção relativamente maior dos agregados, que acabam por absorver maior quantidade de água, tendo como solução o aumento do diâmetro dos agregados (NAHHAB; KETAB, 2020), visto que quanto maior o agregado leve menor sua massa específica, e/ou diminuir a absorção dos agregados (YANG et al, 2015). Ainda, por se tratar de uma variação pouco expressiva, estudos anteriores (ANGELIN, 2020; NAHHAB; KETAB, 2020; ANGELIN, 2018; NADESAN; DINAKAR, 2017; ASSUNÇÃO, 2016; MADANDOUST; RANJBAR; MOUSAVI, 2011) que obtiveram massas específicas maiores que 2,03 g/cm<sup>3</sup>, mantiveram a classificação como concreto leve autoadensável tendo em vista o cumprimento dos outros requisitos.

Sendo assim, diante dos resultados de caracterização dos concretos no estado fresco apresentados, conclui-se que todas as misturas atenderam aos requisitos estabelecidos em norma, evidenciando a viabilidade, em relação ao comportamento no estado fresco, da utilização dos novos agregados para produção de CLAA quando comparados com o agregado comercial de argila expandida, ressaltando-se o traço com agregado RBC 50% que, apesar das

diferenças características com o agregado comercial, apresentou comportamento constante com valores bem próximos ao traço CLAA-AE.

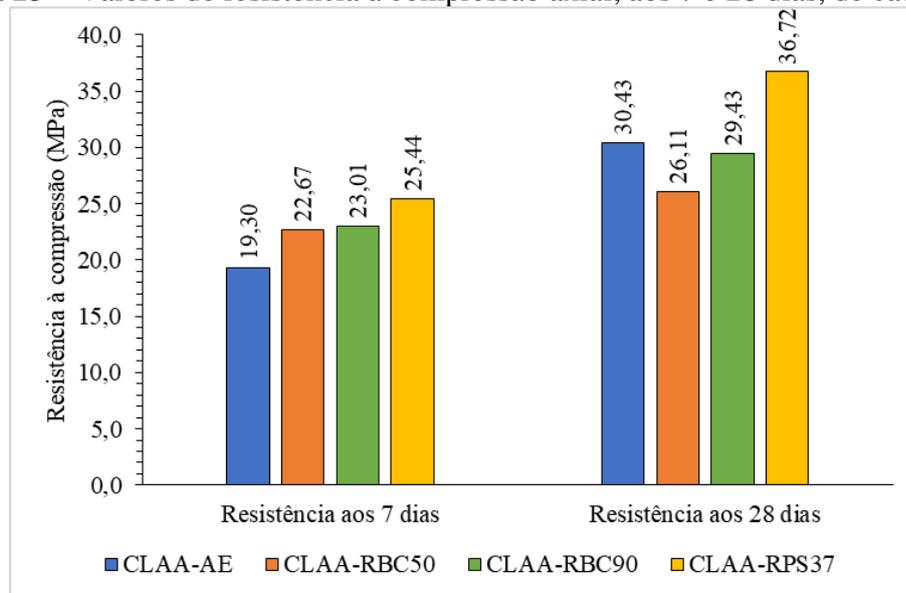
## 4.2 Propriedades no estado endurecido

Para o estudo dos concretos no estado endurecido serão discutidos os resultados do ensaio mecânico de resistência à compressão, bem como a relação dessa resistência com a massa específica pela determinação do fator de eficiência dos concretos. Posteriormente, serão discutidos parâmetros de durabilidade através dos valores do coeficiente de difusão de íons cloreto para cada traço estudado.

### 4.2.1 Resistência à compressão axial

Os concretos foram submetidos à ensaio de ruptura axial para determinação da resistência à compressão, nas idades de 7 e 28 dias contados a partir da moldagem, estando submetidos à cura úmida até as datas previstas para rompimento. Os valores de resistência à compressão foram obtidos a partir da média das resistências de três corpos de prova. A Figura 23 mostra os valores médios de resistência à compressão de cada traço.

Figura 23 – Valores de resistência à compressão axial, aos 7 e 28 dias, de cada traço.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Com base nos resultados obtidos, verifica-se que todos os concretos, ainda aos 7 dias, atenderam aos requisitos mínimos de resistência à compressão estabelecidos para concreto estrutural pela NBR 6118 (ABNT, 2014), de 20 MPa, e para concretos leves estruturais pela ACI 213R-03, de 17 MPa. Aos 28 dias os valores de resistência apresentaram-se bastante

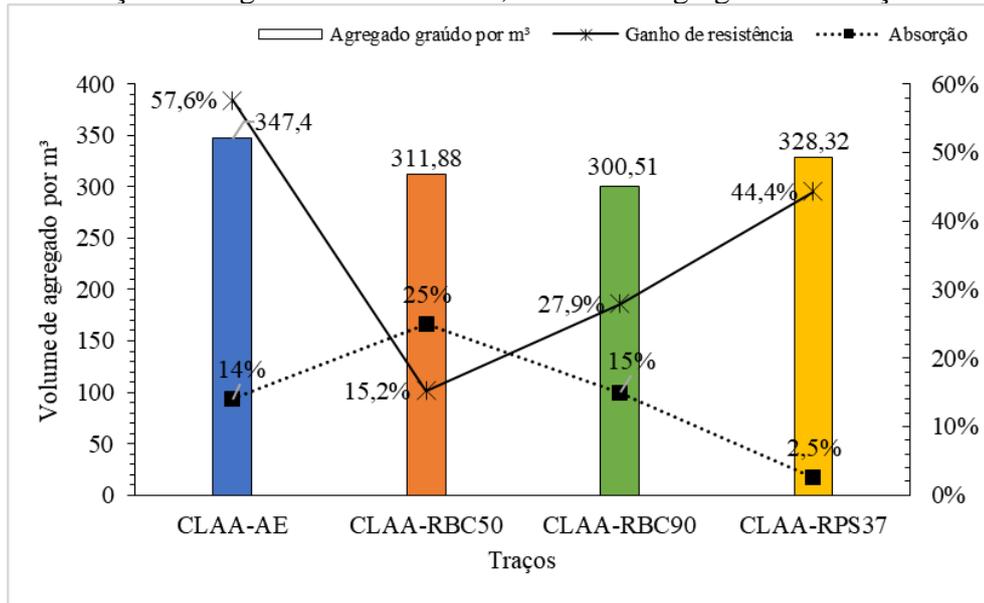
superiores ao mínimo exigido para concretos leves, exibindo ganhos de resistência consideráveis.

Nepomuceno, Pereira-de-Oliveira e Pereira (2018) observaram que, para concretos leves autoadensáveis algumas características dos agregados leves, como densidade das partículas, a resistência ao esmagamento e o índice de forma, bem com o volume de agregado leve por metro cúbico, a resistência da fase argamassa e a relação a/c, podem afetar a resistência à compressão do concreto. Tendo em vista que os agregados utilizados nas misturas tiveram o diâmetro máximo padronizado em 9,5mm e a fase argamassa e a relação a/c permaneceram constantes em todas as misturas, não foi possível observar a influência dessas variáveis nos resultados do presente estudo. Dessa forma, por terem sido utilizados agregados diferentes, a densidade das partículas, a resistência ao esmagamento e o volume de agregado são os principais parâmetros suscetíveis a influenciar o comportamento do concreto quanto a resistência à compressão.

Contudo, a influência desses fatores torna-se visível somente em idades posteriores aos 7 dias, de acordo com Angelin (2018), a qual afirma que nas primeiras idades o agregado leve não interfere na resistência à compressão, sendo a matriz cimentícia a responsável por suportar os esforços mecânicos. Nesse sentido, a relação  $V_p/V_s$  afeta diretamente a resistência à compressão, visto que quanto menor esse valor ( $< 0,60$ ), maior o volume de argamassa e menor o volume de agregado graúdo (NEPOMUCENO; PEREIRA-DE-OLIVEIRA; PEREIRA, 2018).

Na Figura 24, é possível estabelecer uma relação entre o volume de agregado leve por metro cúbico, o ganho de resistência entre os 7 e 28 dias e uma das principais características do agregado leve, a absorção de água.

Figura 24 – Relação entre ganho de resistência, volume de agregado e absorção do agregado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Nota-se que, os maiores ganhos de resistência correspondem aos traços com maiores volumes de agregado por metro cúbico e menores valores de absorção por parte do agregado, no caso, o CLAA-AE e o CLAA-RPS37. As demais misturas correspondem aos menores ganhos de resistência, destacando-se a CLAA-RBC50 que, apesar de apresentar um maior volume de agregado leve comparado ao CLAA-RBC90, seu valor de absorção de água é superior à absorção do agregado do CLAA-RBC90. Sabe-se que a elevada absorção do agregado pode influenciar diretamente na resistência ao esmagamento desse, tornando o agregado mais frágil e contribuindo para o menor desempenho do concreto quanto à resistência à compressão. Dessa forma, corroborando com Bogas, Gomes e Pereira (2012), além da proporção de agregados leves presentes na mistura e de sua absorção à água, outras características particulares dos agregados podem influenciar no comportamento do CLAA, como por exemplo a resistência ao esmagamento. Assim, podemos observar uma relação diretamente proporcional entre a resistência à compressão dos concretos estudados e a resistência ao esmagamento de cada agregado, onde o traço com agregado mais resistente (CLAA-AE) apresentou o maior ganho de resistência, enquanto o traço com agregado menos resistente (CLAA-RBC50) apresentou o menor ganho de resistência aos 28 dias.

Convencionalmente em concretos de peso normal, a resistência à compressão está relacionada, principalmente, ao fator  $a/c$  e à quantidade de ligantes na mistura (HEIZA; EID; MASOUD, 2018; TOPÇU; UYGUNOGLU, 2010). Contudo, para concretos com agregados leves essa relação não pode ser efetivamente aplicada devido à dificuldade em se determinar

quanto da água de amassamento será absorvida pelos agregados (MEHTA; MONTEIRO, 2014; TOPÇU; UYGUNOGLU, 2010) e, no caso dessa pesquisa, o fator a/c não apresenta influência, visto que se adotou a mesma relação a/c para todas as misturas, bem como a água interna absorvida por cada agregado no período de pré-saturação que, apesar de ser diferente para cada agregado, foi desconsiderada por não ser liberada durante a mistura, de acordo com a ACI-213 R03 (2003). Sendo assim, o agregado leve torna-se o principal responsável por limitar e/ou influenciar não apenas a resistência do concreto, mas todas as outras propriedades do concreto (BORJA, 2011; TOPÇU; UYGUNOGLU, 2010).

Complementando os resultados de resistência à compressão, a Figura 25 mostra os concretos leves autoadensáveis após ruptura, possibilitando observar o comportamento dos agregados na matriz quanto à dispersão e homogeneidade.

Figura 25 – Corpos de prova dos CLAAs após ensaio de ruptura axial.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

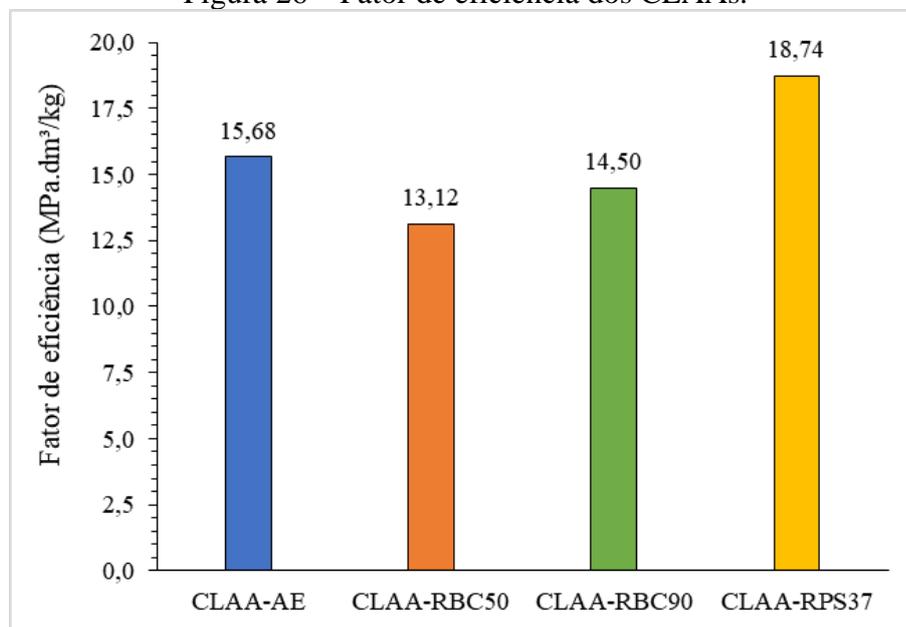
É perceptível em todos os concretos que, diferentemente do concreto convencional, a superfície de ruptura ocorreu através dos agregados, reafirmando a influência dos agregados leves como limitante da resistência à compressão. De acordo com os autores Grabois, Cordeiro e Toledo Filho (2016), Grabois (2012) e Andiç-Çakir *et al.* (2009), isso ocorre devido a melhoria da zona de transição pasta-agregado e por não haver diferença significativa entre os módulos elásticos da pasta e do agregado leve, sobrando então o agregado leve como o elemento mais frágil da mistura. Dessa maneira, a fase argamassa torna-se o principal objeto de estudo para incrementar a resistência à compressão dos CLAAs. Contudo, Nepomuceno, Pereira-de-Oliveira e Pereira (2018) destacam que, o aumento da resistência da argamassa mantendo-se o volume de agregado constante, podem ocasionar o aumento do consumo de cimento sem um aumento correspondente na resistência do concreto, devido as características do agregado leve. Portanto, Rossignolo (2009) propõe o aprimoramento da qualidade da

matriz cimentícia com o uso de aditivos e adições, resultando assim em melhorias consideráveis no desempenho dos CLAAAs em relação à resistência à compressão.

#### 4.2.2 Relação resistência e massa específica seca – Fator de eficiência (FE)

De maneira geral, o Fator de Eficiência é um parâmetro bastante utilizado na caracterização de concretos leves, sendo uma relação entre a resistência à compressão e a massa específica do concreto e, em condições similares de dosagem com concretos convencionais, apresentam valores maiores para concretos leves (ANGELIN, 2018; GRABOIS, 2012; ROSSIGNOLO, 2009). No presente estudo, o fator de eficiência foi determinado para os concretos aos 28 dias, utilizando o valor médio da massa específica seca (ver Figura 22). Na Figura 26 é apresentado o fator de eficiência de cada CLAA.

Figura 26 – Fator de eficiência dos CLAAAs.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

De acordo com os resultados apresentados, observa-se que os valores de fator de eficiência para os concretos leves autoadensáveis variaram entre 13 e 18 MPa.dm³/kg, sendo maiores nos CLAA-RPS37 e CLAA-AE, que foram os traços que apresentaram maiores valores de resistência à compressão e menores valores de massa específica. Estudos anteriores encontraram valores de FE variando entre 22 a 28 MPa.dm³/kg (ANGELIN, 2018) e 22 a 34 MPa.dm³/kg (ASSUNÇÃO, 2016), contudo, para ambos os estudos foram utilizadas combinações de diferentes diâmetros do agregado leve, bem como substituição parcial por agregado graúdo normal, de maneira que a resistência à compressão dos concretos aumentou e, conseqüentemente, os valores do fator de eficiência dos traços.

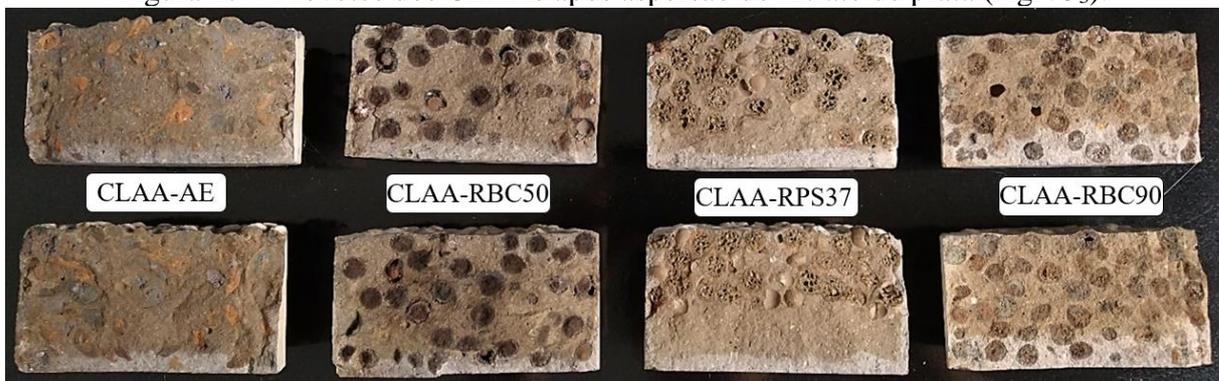
Rossignolo (2009) reforça que o fator de eficiência (FE) é um parâmetro importante no desenvolvimento de projetos estruturais e que concretos com FE acima de 25 MPa.dm<sup>3</sup>/kg podem ser considerados concretos de alto desempenho. No presente estudo, todas as misturas classificam-se como concretos estruturais por atender aos parâmetros de resistência e massa específica estabelecidos pela ACI 213R-03.

#### 4.2.3 Índice de durabilidade – Coeficiente de difusão de íons cloreto

A realização do ensaio para determinar o coeficiente de difusão de íons cloreto nos concretos estudados, ocorreu pelo método de migração em regime não estacionário, segundo procedimentos estabelecidos pela LNEC E-463, na idade de 186 dias, contando a partir da moldagem, sendo 28 dias em cura úmida e os demais dias sob ar livre. Neste ensaio, a penetração dos íons cloreto ocorre em uma única direção, de baixo para cima, sendo forçada pela passagem de corrente elétrica.

Essa análise se torna relevante por possibilitar o entendimento da influência da entrada do cloreto nos concretos, quando esses foram submetidos apenas ao processo de cura normal em água até a idade de 28 dias e, posteriormente, ao ar livre até a idade de realização do ensaio, de 186 dias. Para cada composição, utilizou-se dois corpos de prova, sendo o coeficiente de difusão a média dos resultados encontrados para cada traço. A Figura 27 mostra os concretos após a realização do ensaio e aspersão do nitrato de prata para delimitação da profundidade de penetração dos íons cloreto.

Figura 27 – Provetes dos CLAAAs após aspersão do nitrato de prata (AgNO<sub>3</sub>).



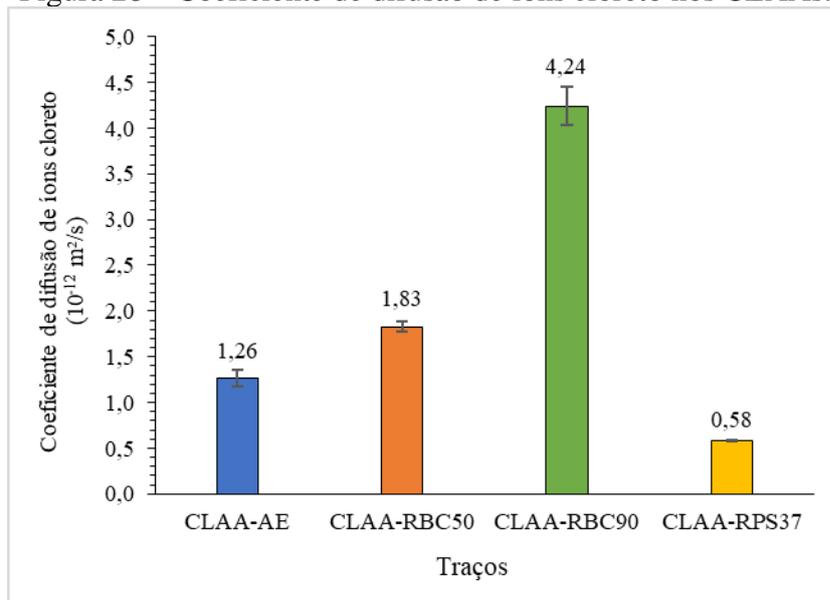
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Avaliando de maneira qualitativa, observa-se que o CLAA-RPS37 apresentou menor frente de penetração dos íons cloreto, seguido pelo CLAA-AE, CLAA-RBC50 e por último, o CLAA-RBC90, apresentando a maior profundidade de penetração. Contudo, percebe-se que os agregados do CLAA-RPS37 flutuaram dentro da pasta e se depositaram na parte superior

do provete, resultando na segregação entre a matriz cimentícia e agregados. Esse comportamento pode ser explicado devido a baixa absorção e densidade relativamente baixa do agregado RPS 37%, impossibilitando a homogeneização entre agregado e pasta por demandar mais tempo para absorver a mistura. Nesse contexto, faz-se necessário a repetição da mistura para nova moldagem e repetição do ensaio de verificação da profundidade de penetração dos íons cloreto. Contudo, devido limitações na quantidade de agregados disponíveis, bem como o cenário pandêmico em que o estudo foi finalizado, não foi possível proceder com a repetição do ensaio. Por outro lado, os agregados com maiores teores de absorção conseguiram se misturar à matriz de forma homogênea, permitindo a aferição da profundidade de penetração conforme estabelecido pela E-463 (LNEC, 2004).

Devido o comportamento apresentado pelo agregado RPS 37%, de acordo com especificações normativas da E-463 (LNEC, 2004), o coeficiente de difusão do CLAA-RPS37 foi desconsiderado por não representar o comportamento adequado da mistura. A Figura 28 apresenta os valores dos coeficientes de difusão de íons cloreto nos concretos leves autoadensáveis, aos 186 dias, quando submetidos apenas ao processo de cura úmida e ao ar livre.

Figura 28 – Coeficiente de difusão de íons cloreto nos CLAAs.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Conforme os resultados apresentados na Figura 28, podemos observar uma relação entre o coeficiente de difusão e o teor de argamassa de cada mistura, de acordo com dados da Tabela 18. Nota-se que, os traços com menores coeficiente de difusão, exceto pelo CLAA-RPS37, possuem os maiores teores de argamassa. Segundo alguns autores (NAHHAB;

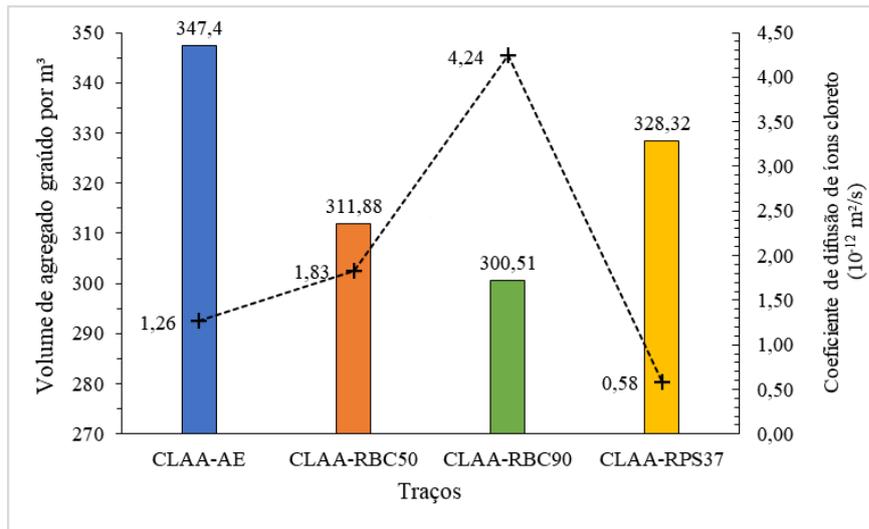
KETAB, 2020; GONEN; YAZICIOGLU, 2017; ASSUNÇÃO, 2016), a presença de agregados porosos contribui para o aumento da permeação dos concretos. No entanto, o maior teor de argamassa produz uma matriz cimentícia mais densa, contribuindo para a diminuição da permeação dos concretos através do aprimoramento da estrutura de poros da matriz, contribuindo assim, para um melhor desempenho quanto à durabilidade das estruturas. Ainda, a melhoria microestrutural decorrente da cura interna promovida pela água retida pelo agregado leve, proporciona o refinamento da interface agregado-matriz, diminuindo as microfissuras, comumente formadas em concretos com agregados convencionais, as quais são as maiores facilitadoras da percolação de agentes agressivos.

Ainda, é possível visualizar o aumento no coeficiente de difusão dos íons cloreto e estabelecer algumas relações com as características de cada traço. Alguns autores (FARIAS, 2019; AZARIJAFARI *et al.*, 2018; REAL; BOGAS; PONTES, 2015; GUNEYISI *et al.*, 2013) observaram que os principais responsáveis por controlar a penetração dos íons cloreto e, conseqüentemente, diminuir o coeficiente de difusão, são a relação  $a/c$ , a quantidade de ligantes e o uso de adições minerais, não havendo influência significativa por parte dos agregados, segundo os autores citados acima. Entretanto, percebe-se que esses fatores não foram determinantes no comportamento dos CLAAs do presente estudo, visto que as misturas possuíam a mesma relação  $a/c$  e, conforme dados da Tabela 19, a relação finos/agregado miúdo ( $V_p/V_s$ ) foi constante para todos os traços.

Os autores Real, Bogas e Pontes (2015) relataram que o agregado leve sozinho não apresenta influência sobre a determinação do coeficiente de difusão, mostrando que não há uma relação clara entre a porosidade do agregado e o coeficiente de difusão. Entretanto, outros fatores como qualidade da matriz cimentícia, relação  $a/c$ , quantidade de ligantes e, principalmente, a pré-saturação de agregados com alto teor de absorção, podem gerar conseqüências na resistência do concreto à entrada de íons cloreto, sendo indicado a não saturação dos agregados a fim de reduzir sua participação na penetração dos cloretos (REAL; BOGAS; PONTES, 2015).

Nesse cenário, com os resultados obtidos é possível estabelecer uma relação entre o volume de agregado leve por metro cúbico e a resistência à penetração dos íons cloreto, como mostra a Figura 29.

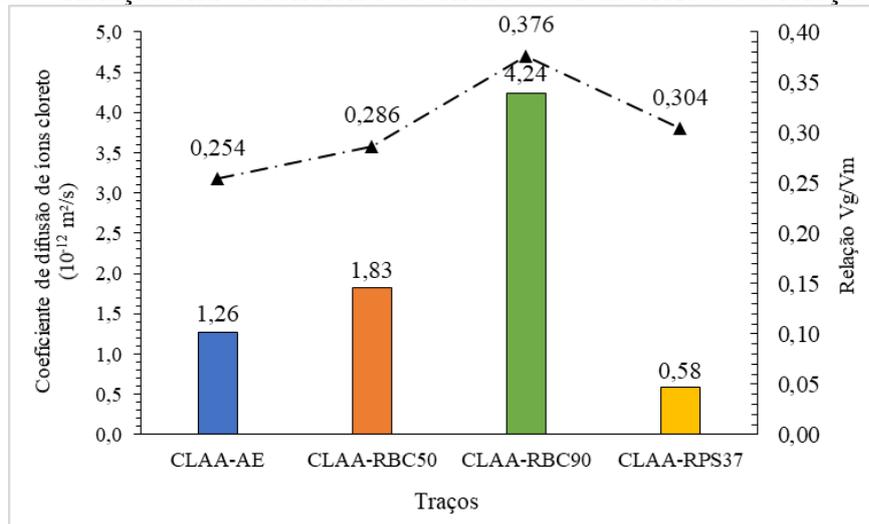
Figura 29 – Relação entre volume de agregado graúdo e coeficiente de difusão de íons cloreto.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Percebe-se que, exceto pelo traço CLAA-RPS37, quanto maior o volume de agregados leves na mistura, menor o coeficiente de difusão, concordando com as afirmações dos autores já citados anteriormente nesse tópico, que a porosidade dos agregados não apresentam uma relação direta, ou significativamente, com a resistência à penetração de íons cloreto. Assim, podemos afirmar que a qualidade da matriz ocasiona maior influência comparado aos agregados leves, visto que o traço com maior suscetibilidade à entrada dos íons cloreto, corresponde ao traço com maior relação  $V_g/V_m$  e menor teor de argamassa (ver tabelas 19 e 18, respectivamente). Dessa maneira, podemos estabelecer uma relação direta entre o coeficiente de difusão e a relação volumétrica agregado graúdo/argamassa ( $V_g/V_m$ ), como mostrado na Figura 30.

Figura 30 – Relação entre coeficiente de difusão de íons cloreto e a relação  $V_g/V_m$ .



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Em suma, apresentados os resultados da caracterização dos concretos no estado endurecido, podemos afirmar que todos os traços atenderam aos requisitos preconizados pelas normas, principalmente no que se refere à resistência à compressão, visto ser esse um dos principais parâmetros para classificação do concreto leve autoadensável. Diante disso, a viabilidade técnica para produção de CLAA com agregados produzidos a partir do reaproveitamento de resíduos fica evidente, enfatizando o comportamento constante apresentado pelos traços CLAA-RBC50 – principalmente – e CLAA-RBC90, quando comparados ao desempenho do traço com agregado leve comercial.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou um estudo sobre concretos leves autoadensáveis com agregados leves produzidos a partir do reaproveitamento de resíduos agroindustrial e de mineração, respectivamente, agregados com o resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC) e o resíduo da produção de scheelita (RPS), fazendo um comparativo com concreto leve autoadensável produzido com agregado comercializado no Brasil, a argila expandida.

Os concretos leves autoadensáveis desenvolvidos foram dosados a partir de um concreto autoadensável convencional, constituídos por cimento Portland V-ARI, metacaulim, areia natural quartzosa, agregados leves e aditivo superplastificante. Pela avaliação no estado fresco e endurecido, todos os CLAAs apresentaram características e propriedades que comprovaram a definição como concreto leve autoadensável. Portanto, pode-se concluir que é possível produzir CLAAs com agregados leves não-convencionais e que apresentem comportamento semelhante ao CLAA com o agregado leve comercial. De maneira específica, podemos tirar as seguintes conclusões:

- Em todas as características avaliadas, tanto para o estado fresco quanto para o estado endurecido, observou-se que o teor de absorção por parte do agregado desempenha influência extremamente significativa, principalmente para teores menores que 5% e a partir de 25%, caso dos agregados RPS 37% e RBC 50%, respectivamente, influenciando diretamente na diminuição da fluidez dos concretos CLAA-RPS37 e CLAA-RBC50. Bem como as propriedades de massa específica e resistência ao esmagamento dos agregados, que também influenciaram no desempenho dos concretos, principalmente em relação às propriedades de fluidez e de resistência à compressão.
- A dosagem dos traços de concreto leve autoadensável, partindo de um traço base para concreto autoadensável, mostrou-se eficiente. Contudo, é necessário aprofundar os conhecimentos sobre o comportamento de cada agregado e adequar o traço de maneira individual, levando em consideração cada particularidade e característica do agregado leve.
- No estado fresco, os resultados demonstraram que todos os concretos estudados atenderam às características de autoadensabilidade. A relação volumétrica  $V_g/V_m$  influenciou de maneira diretamente proporcional no comportamento do CLAA-AE, CLAA-RBC50 e CLAA-90 quanto à fluidez, viscosidade aparente, estabilidade visual e habilidade passante,

excetuando-se o CLAA-RPS37, que apresentou um comportamento à parte, possivelmente relacionado à baixa absorção do agregado. Contudo, os resultados apresentados por todas as misturas foram satisfatórios e atenderam aos parâmetros estabelecidos para CLAA pelas normas.

- A absorção, a massa específica e unitária dos agregados foram as características que mais influenciaram no comportamento dos concretos no estado fresco. Observou-se que quanto maior a absorção e a massa específica, menor a fluidez e viscosidade das misturas. Em relação à massa unitária, quanto maiores os valores, maior o consumo de agregado na mistura, que por sua vez influenciam nas relações volumétricas estabelecidas.

- Os concretos CLAA-AE e CLAA-RPS37 apresentaram os menores valores de massa específica para o estado fresco, enquanto o CLAA-RBC50 e o CLAA-RBC90 apresentaram valores maiores que o limite de  $2,00 \text{ g/cm}^3$ . O mesmo ocorreu na determinação da massa específica seca ao ar, exceto pelo CLAA-RBC50 que mostrou massa específica dentro do limite. Contudo, os valores que ficaram fora do limite estabelecido para concreto leve, podem ser classificados como concreto leve devido a variação ser pouco expressiva. Portanto, todos os traços podem ser classificados como concreto leve autoadensável.

- No estado endurecido, todos os concretos moldados atenderam aos valores mínimos de resistência à compressão axial para concreto leve estrutural. O CLAA-RPS37 e o CLAA-AE, seguidos pelo CLAA-RBC90, apresentaram as maiores resistência à compressão e os maiores valores de FE. Os menores resultados foram apresentados pelo CLAA-RBC50. De maneira decrescente, observou-se que as maiores resistência ao esmagamento e os menores valores de absorção provocaram os melhores resultados de resistência à compressão e fator de eficiência. Os traços CLAA-RPS37 e CLAA-RBC90, quando comparados com o CLAA-AE, apresentaram desempenhos semelhantes a esse.

- Na difusão de íons cloreto, constatou-se que a qualidade da matriz ocasiona maior influência sobre o concreto, quando em comparação com os agregados leves, visto que o traço com maior suscetibilidade à entrada dos íons cloreto (CLAA-RBC90), corresponde ao traço com maior relação agregado gráudo/argamassa ( $V_g/V_m$ ) e menor teor de argamassa. Os traços CLAA-AE e CLAA-RBC50 mostraram-se os mais resistentes à entrada de íons cloreto.

Assim sendo, com base nos resultados encontrados, conclui-se que a obtenção de concretos leves autoadensáveis com novos tipos de agregados leves é possível. Embora, de maneira geral, o concreto com o agregado comercial tenha apresentado comportamento

melhor, os demais concretos também atendem aos requisitos pré-estabelecidos em norma para CLAAs, destacando-se o traço com agregado RBC 50%, que apresentou desempenho constante ao atender os parâmetros normativos, seguido pelo traço com agregado RBC 90% e, por último, com agregado RPS 37%. Dessa forma, todas as misturas apresentaram fluidez, coesão e consistência adequadas para o autoadensamento, assim como resistência à compressão e massa específica que atendem aos parâmetros para classificar como concreto leve autoadensável.

### **5.1 Sugestões de estudos futuros**

Apesar da crescente quantidade de estudo com agregados leves e concreto leve autoadensável, durante a realização da pesquisa notou-se a existência de diversas lacunas em relação ao tema abordado nesse estudo. Dessa maneira, a seguir algumas sugestões de estudos futuros são sugeridas:

- ✓ Realização de estudos para desenvolvimento de um método de dosagem específico para concretos leves autoadensáveis;
- ✓ Verificar a influência nas características dos agregados com a variação de temperatura, das matérias-primas e granulometria, através de planejamento estatístico das misturas;
- ✓ Estudo para mecanização da produção dos agregados, bem como estabelecer parâmetro de qualidade para controle da produção, desde a moldagem até o processo de queima, verificando a influência do fluxo de calor dentro do forno de sinterização;
- ✓ A influência dos tipos de cura nos concretos leves autoadensáveis realizando comparativo entre elas;
- ✓ Avaliação de outros índices de durabilidade de concretos leves autoadensáveis com agregados leves não convencionais;
- ✓ Verificar a influência da variação de outros fatores do concreto, como relação água/cimento e diferentes granulometrias de agregado miúdo;
- ✓ Estudo sobre a absorção dos agregados, sua influência nas propriedades dos concretos e melhor abordagem quanto a pré-saturação.

## REFERÊNCIAS

- ALMAWLA, S. A.; MOHAMMED, M. K.; AL-HADITHI, A. I. Fresh and Mechanical Properties of Self-Compacting Lightweight Concrete Containing Ponza Aggregates. **2019 12Th International Conference on Developments in Esystems Engineering (Dese)**, out. 2019. IEEE.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 211.2-04: **Standard practice for selecting proportions for structural lightweight concrete**, 2004.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 213 R-03: **Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete**, 2003.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C330-09: **Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete**, 2009.
- ANDIÇ-ÇAKIR, O.; YOGURTCU, E.; YAZICI, S.; RAMYAR, K. Self-compacting lightweight aggregate concrete: design and experimental study. **Magazine of Concrete Research**, v. 61, n. 7, p. 519-527, set. 2009.
- ANGELIN, A. F.; LINTZ, R. C. C.; OSÓRIO, W. R.; GACHET, L. A. Evaluation of efficiency factor of a self-compacting lightweight concrete with rubber and expanded clay contents. **Construction and Building Materials**, v. 257, out. 2020.
- ANGELIN, A. F. **Análise dos desempenhos físicos, mecânicos, térmico acústico da microestrutura do concreto leve autoadensável emborrachado (CLAE)**. 2018. 146f. Tese (Doutorado em Tecnologia – Ciência dos Materiais). Universidade Estadual de Campinas. Limeira/SP, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 35: **Agregados leves para concreto estrutural**. Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **Concreto - Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: **Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953: **Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-1: **Concreto autoadensável – Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-2: **Concreto autoadensável – Parte 2: Determinação do espalhamento do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método do cone de Abrams**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-3: **Concreto autoadensável – Parte 3: Determinação da habilidade passante – Método do anel J**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSUNÇÃO, J. W. **Concreto leve autoadensável: Avaliação da influência da argila expandida no processo de dosagem e nas propriedades do concreto**. 2016. 256f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade de São Paulo. São Carlos/SP, 2011.

AYATI, B. et al. Manufacture and performance of lightweight aggregate from waste drill cuttings. **Journal of Cleaner Production**, v. 208, p. 252-260, jan. 2019.

AZARIJAFARI, H. *et al.* Reducing variations in the test results of self-consolidating lightweight concrete by incorporating pozzolanic materials. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 889-897, mar. 2018.

BARNAT-HUNEK, D. et al. The Microstructure-Mechanical Properties of Hybrid Fibres-Reinforced Self-Compacting Lightweight Concrete with Perlite Aggregate. **Materials**, v. 11, n. 7, p. 1093-1111, jun. 2018.

BOGAS, J. A.; BRITO, J.; CABAÇO, J. Long-term behaviour of concrete produced with recycled lightweight expanded clay aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 470-479, ago. 2014.

BOGAS, J. A.; GOMES, A.; PEREIRA, M. F. C. Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 1013-1022, 2012.

BORJA, E. V. **Efeito da adição da argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

BURGOS, D. M. *et al.* Chloride ion resistance of self-compacting concretes incorporating volcanic materials. **Construction and Building Materials**, v. 156, p.565-573, 2017.

DINIZ, H. A. A. **Estudo das propriedades mecânicas e dos parâmetros de durabilidade de concretos autoadensáveis com elevados teores de adições minerais submetidos à carbonatação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

DONDI, M. *et al.* Lightweight aggregates from waste materials: Reappraisal of expansion behavior and prediction schemes for bloating. **Construction and Building Materials**, v. 127, p. 394-409, nov. 2016.

EFNARC - European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. **Specification and guidelines for self-compacting concrete**. London, 2005.

ERDEM, S. X-ray computed tomography and fractal analysis for the evaluation of segregation resistance, strength response and accelerated corrosion behaviour of self-compacting lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, v. 61, p. 10-17, jun. 2014.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 206-9: **Concrete – Part 9: Additional Rules for Self-Compacting Concrete (SCC)**, Brussels, 2010.

FARIAS, E. C. **Avaliação da durabilidade frente ao ataque de CO<sub>2</sub> e Cl<sup>-</sup> em concreto autoadensáveis com elevados teores de resíduo da biomassa da cana-de-açúcar e metacaulim**. 2019. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

GESOGLU, M. *et al.* Shear thickening intensity of self-compacting concretes containing rounded lightweight aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 79, p. 40–47, 2015.

GESOGLU, M. *et al.* Permeation characteristics of self compacting concrete made with partially substitution of natural aggregates with rounded lightweight aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 59, p. 1-9, maio 2014.

GONZÁLEZ-CORROCHANO, B.; ALONSO-AZCÁRATE, J.; RODAS, M. Effect of prefiring and firing dwell times on the properties of artificial lightweight aggregates. **Construction And Building Materials**, v. 53, p. 91-101, fev. 2014.

GONZÁLEZ-CORROCHANO, B.; ALONSO-AZCÁRATE, J.; RODAS, M. Production of lightweight aggregates from mining and industrial wastes. **Journal of Environmental Management**, v. 90, n. 8, p. 2801-2812, jun. 2009.

GONEN, T.; YAZICIOGLU, S. The Effect of Curing Conditions on Permeation of Self-Compacting Lightweight Concrete with Basaltic Pumice Aggregate. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 43, n. 10, p. 5157-5164, nov. 2017.

GRABOIS, T. M.; CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D. Fresh and hardened-state properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with steel fibers. **Construction and Building Materials**, v. 104, p. 284-292, fev. 2016.

GRABOIS, T. M. **Desenvolvimento e caracterização experimental de concretos leves autoadensáveis reforçados com fibras de sisal e aço**. 2012. 144 f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

GUNEYISI, E. *et al.* Durability aspect of concretes composed of cold bonded and sintered fly ash lightweight aggregates. **Composites Part B: Engineering**, v. 53, p. 258-266, out. 2013.

HEIZA, K.; EID, F.; MASOUD, T. Lightweight self-compacting concrete with light expanded clay aggregate (LECA). **Matec Web of Conferences**, v. 162, p. 02031-02038, 2018.

JURADIN, S.; BALOEVI, G.; HARAPIN, A. Experimental testing of the effects of fine particles on the properties of the self-compacting lightweight concrete. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2012.

KAYALI, O. Fly ash lightweight aggregates in high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 12, p. 2393-2399, dez. 2008.

LEAL DE SOUZA, N. S. **Desenvolvimento de agregados leves a partir de resíduos industriais e matérias-primas locais (Nordeste/Brasil)**. 2019. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

LNEC E-463:2004 – Betão. **Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal, 2004. 8p.

LOTFY, A.; HOSSAIN, K. M.A.; LACHEMI, M. Mix design and properties of lightweight self-consolidating concretes developed with furnace slag, expanded clay and expanded shale aggregates. **Journal Of Sustainable Cement-Based Materials**, v. 5, n. 5, p. 297-323, 23 out. 2015.

LIU, M. *et al.* Effects of sintering temperature on the characteristics of lightweight aggregate made from sewage sludge and river sediment. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 748, p. 522-527, jun. 2018.

LIU, X.; CHIA, K. S.; ZHANG, M. Water absorption, permeability, and resistance to chloride-ion penetration of lightweight aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 1, p. 335-343, jan. 2011.

MADANDOUST, R.; RANJBAR, M. M.; MOUSAVI, S. Y. An investigation on the fresh properties of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 9, p. 3721-3731, set. 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. Ed. São Paulo: IBRACON. 2014.

NADESAN, M. S.; DINAKAR, P. Structural concrete using sintered flyash lightweight aggregate: a review. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 928-944, nov. 2017.

NAHHAB, Ali H.; KETAB, Ali K. Influence of content and maximum size of light expanded clay aggregate on the fresh, strength, and durability properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with micro steel fibers. **Construction and Building Materials**, v. 233, fev. 2020.

NEPOMUCENO, M.; PEREIRA-DE-OLIVEIRA, L.; PEREIRA, S. F. Mix design of structural lightweight self-compacting concrete incorporating coarse lightweight expanded clay aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 373-385, mar. 2018.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p. Tradução: Ruy Alberto Cremonini.

OLIVEIRA, A. M.; CASCUDO, O. Effect of mineral additions incorporated in concrete on thermodynamic and kinetic parameters of chloride-induced reinforcement corrosion. **Construction and Building Materials**, v. 192, p. 467-477, dez. 2018.

OLLIVIER, J.; VICHOT, A. **Durabilidade do concreto: Bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. São Paulo: IBRACON, 2014. 615 p. Tradução: Oswaldo Cascudo e Helena Carasek.

PANNEM, R.; KUMAR, P. P. Comparative Study of Self-Compacting Concrete Containing Lightweight and Normal Aggregates. **Slovak Journal of Civil Engineering**, v. 27, n. 2, p. 1-8, 1 jun. 2019.

PARK, H. *et al.* Potential utilization of hazardous mining wastes in the production of lightweight aggregates. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy**, v. 127, n. 1, p.62-71, 13 fev. 2017.

PISZCZ-KARAS, K. *et al.* Utilization of shale cuttings in production of lightweight aggregates. **Journal of Environmental Management**, v. 231, p. 232-240, fev. 2019.

QUINA, M. J. *et al.* Compatibility analysis of municipal solid waste incineration residues and clay for producing lightweight aggregates. **Applied Clay Science**, v. 102, p. 71-80, dez. 2014.

REAL, S.; BOGAS, J. A.; PONTES, J. Chloride migration in structural lightweight aggregate concrete produced with different binders. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 425-436, nov. 2015.

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. Concreto leve estrutural. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 42. p. 1531-1568.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações**. 1. Ed. São Paulo: Pini, 2009.

SOLTAN, A. M. M. *et al.* Lightweight aggregates from mixtures of granite wastes with clay. **Journal of Cleaner Production**, v. 117, p. 139-149, mar. 2016.

SOUZA, M. M. **Desenvolvimento de agregados leves a partir de resíduo de scheelita, lodo de esgoto e cinza da casca do arroz**. 2019. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

TING, T. Z. H. *et al.* Recent development and perspective of lightweight aggregates based self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 201, p. 763-777, mar. 2019.

TOPÇU, I. B.; UYGUNOGLU, T. Effect of aggregate type on properties of hardened self-consolidating lightweight concrete (SCLC). **Construction and building material**, n. 24, p. 1286-1295. 2010.

TUAN, B. L. A. *et al.* Development of lightweight aggregate from sewage sludge and waste glass powder for concrete. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 334-339, out. 2013.

VOLLAND, S. *et al.* Recycling of sand sludge as a resource for lightweight aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 52, p. 361-365, fev. 2014.

YANG, S. *et al.* Properties of self-compacting lightweight concrete containing recycled plastic particles. **Construction and Building Materials**, v. 84, p. 444-453, jun. 2015.